

Дубинский Г. Н., Левин Л. Г.

# Наладка устройств электроснабжения напряжением выше **1000 В**

Издание 2-е,  
переработанное и дополненное

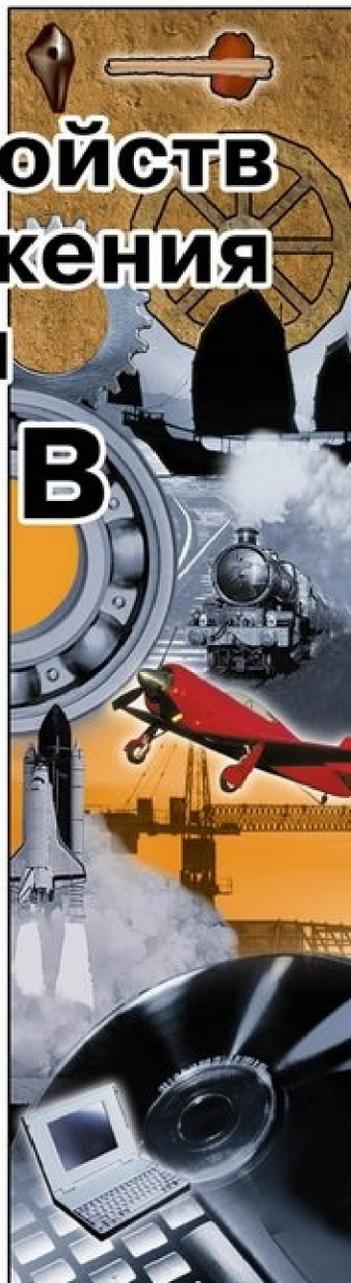
- Силовые трансформаторы
- Распределительные устройства
- Устройства релейной защиты и автоматики
- Теория и практика для специалиста-наладчика
- Секреты наладки и ремонта
- Основные руководящие документы
- Справочная информация

ISBN 978-5-91359-140-1



9 785913 591401

Находка для специалиста!



Дубинский Г.Н., Левин Л.Г.

# **Наладка устройств электроснабжения выше 1000 В**

Издание 2-е,  
переработанное и дополненное

Москва  
СОЛОН-Пресс  
2015

УДК 621.399  
ББК 32.882  
Д 93

**Дубинский Г. Н., Левин Л. Г.**

**Наладка устройств электроснабжения выше 1000 В.** Издание 2-е, переработанное и дополненное. — М.: СОЛОН-Пресс, 2015. — 538 с.: ил.

ISBN 978-5-91359-140-1

В книге изложены методы наладки высоковольтных систем электроснабжения широкого диапазона применения. Рассматриваются вопросы электрических измерений, испытательного оборудования и собственно типовые методики испытаний в соответствии с ПУЭ.

Книга написана на уровне доступном для специалистов среднего звена: техников-электриков и электромонтеров предприятий промышленного, сельскохозяйственного и культурного назначения, жилищно-коммунального хозяйства. Может быть использована для учащихся средних специальных учебных заведений, курсов повышения квалификации.

**Сайт журнала «Ремонт & Сервис»: [www.remserv.ru](http://www.remserv.ru)  
Сайт издательства «СОЛОН-ПРЕСС»: [www.solon-press.ru](http://www.solon-press.ru)**

### **КНИГА — ПОЧТОЙ**

Книги издательства «СОЛОН-ПРЕСС» можно заказать наложенным платежом (оплата при получении) по фиксированной цене. Заказ оформляется одним из трех способов:

1. Послать открытку или письмо по адресу: 123001, Москва, а/я 82.
2. Оформить заказ можно на сайте [www.solon-press.ru](http://www.solon-press.ru) в разделе «Книга — почтой».
3. Заказать по тел.: (495) 617-39-64, (495) 617-39-65.

Каталог издательства высылается по почте бесплатно.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя. Желательно указать дополнительно свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-ПРЕСС», считав его с адреса [www.solon-press.ru/kat.doc](http://www.solon-press.ru/kat.doc).

Интернет-магазин размещен на сайте [www.solon-press.ru](http://www.solon-press.ru).

По вопросам приобретения обращаться:

**ООО «ПЛАНЕТА АЛЬЯНС»**

Тел: (499) 782-38-89

[www.aliants-kniga.ru](http://www.aliants-kniga.ru)

ISBN 978-5-91359-140-1

© Дубинский Г. Н., Левин Л. Г., 2015

© Обложка, «СОЛОН-Пресс», 2015

# Содержание

Предисловие ко 2-му изданию-----	5
Глава 1. Электрические измерения -----	6
1.1. Метрология. Погрешности измерений.	6
1.5. Организация измерений.	63
Глава 2. Общие испытания и проверка электрооборудования подстанций-----	66
2.1. Регулирование электрических величин.	66
2.2. Фазировка.	77
2.3. Построение векторных диаграмм.	81
2.4. Испытание электрической изоляции.	88
2.5. Проверка заземления.	111
Глава 3. Силовые трансформаторы -----	145
3.1. Общие сведения.	145
3.2. Измерение характеристик и испытание электрической изоляции.	147
3.3. Проверка обмоток трансформатора.	151
3.4. Измерение тока и потерь холостого хода (XX).	157
3.5. Опыт короткого замыкания трансформатора.	160
3.6. Измерение сопротивления нулевой последовательности.	162
3.7. Проверка работы переключающего устройства (РПН).	162
3.8. Включение трансформатора на параллельную работу.	166
3.9. Испытание включением толчком на номинальное напряжение	168
3.10. Включение трансформаторов в эксплуатацию.	168
3.11. Цифровые устройства для испытания трансформаторов.	169
Глава 4. Распределительные устройства. -----	171
4.1. Основные элементы распределительных устройств.	171
4.2. Подготовительные работы.	173
4.3. Масляные выключатели.	174
4.4. Воздушные выключатели (ВВ).	188
4.5. Электромагнитные, элегазовые и вакуумные выключатели.	194
4.6. Выключатели нагрузки, разъединители, отделители и короткозамыкатели.	199
4.7. Разъединители, отделители и короткозамыкатели.	200
4.8. Электронные и контактно – электронные коммутационные аппараты.	201
4.9. Реакторы.	204
4.10. Разрядники и ограничители перенапряжений.	206
4.11. Измерительные трансформаторы напряжения (электромагнитные).	210
4.12. Измерительные трансформаторы тока.	217
4.13. Изоляторы.	231
4.14. Шины и токопроводы.	235

4.15. Конденсаторы.	237
4.16. Комплектные распределительные устройства внутренней и наружной установки.	240
Глава 5. Линии электропередач. -----	247
5.1. Проверка воздушных линий электропередач (ВЛ).	247
5.2. Измерение характеристик и испытания силовых кабельных линий (КЛ).	249
5.3. Определение мест повреждения линий.	259
5.4. Методы определения МП.	273
5.5. Низкочастотные методы ОМП.	285
5.6. Особенности ОМП на воздушных линиях.	300
Глава 6. Защита от повреждений и ненормальных режимов -----	309
6.1. Основные понятия.	309
6.2. Виды повреждений и ненормальных режимов.	311
6.3. Виды защит	320
6.4. Защита отдельных видов электрооборудования	345
Глава 7. Органы релейной защиты и автоматики (РЗА) и их элементная база. -----	389
7.1. Электромеханические реле.	389
7.2. Реле дифференциальных, направленных и фильтровых защит.	405
7.3. Бесконтактные элементы релейной защиты и автоматики.	418
Глава 8. Наладка устройств релейной защиты и автоматики -----	456
8.1. Проверка элементов РЗА	456
8.2. Комплексная проверка РЗА.	496
8.3. Контроль качества электрической энергии	519
Литература-----	535
Список основных сокращений-----	537

## Предисловие ко 2-му изданию

Цель настоящего издания, как и первого, – способствовать проведению наладочных работ с высоким качеством, наиболее рациональными методами. Выполнение этого условия является первым шагом на пути к обеспечению надежной и безаварийной работы смонтированной электроустановки, за которым должна следовать ее правильная эксплуатация. Нарушение этих требований чревато подчас тяжелыми последствиями. Так, например, авария на Чагинской подстанции «Мосэнерго» в мае 2005 года вызвала каскадное отключение электроснабжения на территории Москвы, Московской, Калужской и Тульской областей, нарушившее нормальное функционирование предприятий и транспорта на два дня. При этом в числе причин многих аварий часто называют «человеческий фактор»: слабую подготовку, недостаточную квалификацию персонала, подчас и безответственность.

По сравнению с первым изданием книга подверглась значительной переработке. Изменена ее компоновка: она начинается изложением общих вопросов электроизмерений и испытаний электрооборудования (главы 1 и 2). Здесь материал первого издания дополнен сведениями об осциллографах, снятии векторных диаграмм, фазировке, проверке заземления. Далее описывается методика приемосдаточных испытаний силовых трансформаторов и высоковольтного оборудования распределительных устройств; здесь сокращен объем, касающийся воздушных выключателей, которые с успехом заменяются элегазовыми и вакуумными (главы 3 и 4). Материал этих глав дополнен краткими сведениями о возможностях цифровой диагностики. Введена новая глава 5, посвященная линиям электропередач, в основном кабельным, – их испытаниям и отысканию мест повреждения. В главах 6 и 7 описываются основные типы релейных защит и их элементов, в главе 8 – приемы наладки и комплексной проверки релейной защиты, а также качества электрической энергии. Уделено значительно большее внимание защитах на базе микропроцессоров.

# Глава 1.

## Электрические измерения

### 1.1. Метрология. Погрешности измерений.

#### 1.1.1. Основные понятия и определения.

Измерение значений физических величин производят с помощью *средств измерения* (СИ). Измерения с помощью электрических приборов называют *электрическими измерениями*. При *прямом* измерении значение измеряемой величины получают непосредственно из опыта, пример – измерение электрического напряжения вольтметром. При *косвенном* измерении искомое значение находят расчётным путём на основании известной зависимости между измеряемой величиной и другими величинами, которые можно измерить непосредственно; пример – расчёт сопротивления резистора на основании закона Ома по значениям тока через резистор и падения напряжения на нём, измеренным посредством амперметра и вольтметра.

Результат измерения всегда отличается от истинного значения измеряемой величины из-за погрешности измерений. *Абсолютная погрешность*  $\Delta A$  равна разности между измеренным  $A_{из}$  и действительным  $A_{д}$  значениями измеряемой величины  $A$ :

$$\Delta A = A_{из} - A_{д}.$$

Под действительным значением измеряемой величины понимают то значение её, которое найдено экспериментальным путём с помощью образцовых приборов и для данной цели может быть принято за истинное.

*Относительной погрешностью* измерения называют отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины:

$$\delta_A = \Delta A / A_{д}.$$

Приведённой относительной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности к разности между верхним и нижним пределами измерительного прибора, а если нижний предел равен нулю, то – к верхнему пределу измерения в данном диапазоне  $a_v$  (для двусторонней шкалы – к сумме верхних пределов):

$$\delta_{пр} = \Delta A / a_v.$$

Предельное значение приведённой относительной погрешности, выраженное в процентах, указывает класс точности приборов, погрешность которых не зависит от значения измеряемой величины; к ним относятся большинство стрелочных показывающих и самопишущих приборов. Предельная относительная погрешность приборов, зависящая от измеряемой величины, определяется формулой

$$\delta_m = c + d (x_k/x - 1),$$

а класс прибора – отношением  $c/d$ , где  $c$  и  $d$  – постоянные числа,  $x_k$  – конечное значение диапазона измерений,  $x$  – значение измеренной величины. Пример:

$\delta_m = 0,05 + 0,02(U_k/U - 1)$ , класс точности 0,05/0,02 (вольтметр) или

$\delta_m = 0,02 + 0,01(I_k/I - 1)$ , класс точности 0,02/0,01 (амперметр).

Стандартизованы классы 0,05...4,0, но выпускаются и приборы с нормированной погрешностью (10...15)%.

Погрешность при косвенных измерениях зависит от того, какими соотношениями связана искомая величина с непосредственно измеряемыми величинами, и от погрешностей измерения этих величин. Если результат косвенных измерений величины  $A$  равен сумме или разности двух или нескольких величин, например  $A = B \pm C$ , то наибольшая возможная относительная погрешность будет:

$$\delta_a = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta B + \Delta C}{B \pm C},$$

где  $\Delta B$  и  $\Delta C$  – наибольшие возможные погрешности измерения величин  $B$  и  $C$ , а знак «+» или «-» выбирается в зависимости от того, складываются или вычитаются эти величины в формуле  $A = B \pm C$ .

Если искомая величина вычисляется как произведение нескольких величин, например

$$A = B^m C^n,$$

то наибольшая возможная относительная погрешность находится по формуле

$$\delta_a = m\delta_B + n\delta_C,$$

где  $\delta_B$  и  $\delta_C$  – относительные погрешности непосредственного измерения величин  $B$  и  $C$ .

Когда погрешности отдельных непосредственных измерений имеют разные знаки, то для учёта самого неблагоприятного случая эти погрешности суммируют с одинаковыми знаками.

Различают систематические и случайные погрешности измерений. При повторных измерениях одной и той же величины *систематическая* погрешность остаётся неизменной или изменяется закономерно, а *случайная* изменяется произвольным образом. Постоянная систематическая погрешность может возникать, например, при пользовании СИ, параметры которых отличны от номинальных, переменная – вследствие закономерного изменения напряжения источника питания, в частности, из-за разряда аккумулятора. Эпизодические причины либо неизвестны, либо проявление их носит случайный характер (например, наводки от электромагнитных полей). Снижение случайных погрешностей достигается либо уменьшением их влияния (например, экранировкой измерительных цепей), либо повторением измерений.

### 1.1.2. Типичные составляющие погрешности измерений.

Методические погрешности измерений (погрешности метода) и их причины.

а) Несоответствие выбранного прибора или метода измерения реальным характеристикам измеряемой величины. Пример: измеряется амплитудное значение  $U_m$  напряжения переменного тока вольтметром, реагирующим на действующее значение напряжения  $U$ . Предполагая, что измеряемое напряжение имеет синусоидальную форму, вычисляют амплитудное значение как  $U_m = \sqrt{2} U$ . Возникающая при этом систематическая ошибка будет тем большей, чем больше степень отклонения реальной кривой напряжения от синусоиды.

б) Выход значений контролируемого параметра за пределы принятого диапазона. Пример: измеряется ток нагрузки линии с помощью трансформатора тока. Известно, что при большой кратности тока погрешность измерения может превысить допустимые пределы.

в) Отклонение за допустимые пределы разницы между значениями измеряемого параметра на входе прибора и в точке отбора. Пример – измерение напряжения на нагрузке: погрешность зависит от падения напряжения на соединительных проводах, а значит, и от расстояния до вольтметра.

г) Отличие принятого алгоритма вычислений от более строгой функциональной зависимости, связывающей искомую величину с результатами прямых измерений. Например, изменение активного сопротивления с температурой обычно выражают следующим алгоритмом:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(T_2 - T_1)],$$

где  $R_1$  – сопротивление, измеренное при температуре  $T_1$ ;  $R_2$  – сопротивление, измеренное при температуре  $T_2$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

В то же время для прецизионных измерений применяют более точную трёхчленную формулу академика Б. С. Якоби:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1)^2],$$

где  $\beta$  – второй температурный коэффициент.

#### *Инструментальные погрешности.*

а) Погрешности, вызываемые медленно меняющимися внешними причинами, как то: погодные параметры, напряженность электрических и магнитных полей, напряжение источников питания и пр.

б) Погрешности, обусловленные ограниченной разрешающей способностью СИ. Пример: измерение параметра, значение которого соизмеримо с ценой деления шкалы прибора.

в) Динамические погрешности, обусловленные инерционностью прибора. Зависят как от свойств самого прибора, так и от характера изменения во времени измеряемой величины. Пример: измерение параметров быстропеременных процессов с помощью самописца.

г) Погрешности, вызываемые взаимодействием данного СИ с объектом измерения и другими приборами. Пример: измерение напряжения источника малой мощности вольтметром с невысоким внутренним сопротивлением.

д) Погрешности передачи измерительной информации. Примеры: падение напряжения в соединительных проводах, «размытое» изображение на экране осциллографа.

*Погрешности, вносимые оператором* (субъективные погрешности).

а) Погрешности считывания значений измеряемых величин со шкал и диаграмм.

б) Погрешности обработки кривых без применения технических средств. Пример: обработка осциллограмм с целью определения мгновенных значений тока или напряжения, сдвига фаз и др. параметров.

в) Погрешности, вызываемые воздействием оператора на объект измерения и СИ. Пример: влияние оператора и расположения проводов при измерении малых емкостей, параметров полевых транзисторов, микросхем и т.п.

Кроме того, свою долю погрешности могут внести средства вычислительной техники (калькуляторы, компьютеры и пр.), применяемые при обработке промежуточных результатов измерения (погрешность вычислений).

*Основная и дополнительная погрешности СИ.* Погрешности, зависящие от внешних условий (влияющих факторов), принято подразделять на основные и дополнительные. *Основной погрешностью* ( $\delta_o$ ) называют погрешность в условиях, принятых за *нормальные*. Так, для многих типов СИ нормальными условиями являются: температура  $(293 \pm 5)$  К, или  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ , относительная влажность  $(65 \pm 15)\%$ , напряжение сети  $220 \text{ В} \pm 10\%$ . Дополнительные погрешности ( $\delta_d$ ) возникают в *рабочих* условиях при отклонении влияющих факторов от нормальных значений. В число влияющих факторов входят:

а) Изменение температуры. Отклонение температуры, при которой производится измерение, от той, при которой градуировался прибор, вызывает погрешность ( $\delta_t$ ), равную основной на каждые  $10^\circ\text{C}$  отклонения.

б) Отклонение напряжения от номинального значения. Эту погрешность ( $\delta_n$ ) следует учитывать при настройке частотных реле, ею можно пренебречь при снятии векторных диаграмм, в других случаях – исключить выбором соответствующей схемы испытания.

в) Влияние внешних магнитных полей. Погрешность ( $\delta_m$ ) зависит от конструкции и степени защиты прибора и определяется в функции напряженности магнитного поля.

г) Отклонение положения прибора от нормального. При отклонении положения прибора на  $10^\circ$  погрешность ( $\delta_p$ ) численно равна классу прибора.

д) Погрешность измерительных трансформаторов ( $\delta_k$ ), возникающая из-за отклонения коэффициента трансформации от номинального значения.

*Общая погрешность.* Суммарная дополнительная погрешность рассчитывается как

$$\delta_d = \sqrt{\delta_t^2 + \delta_n^2 + \delta_m^2 + \delta_p^2 + \delta_k^2},$$

а общая погрешность будет

$$\delta = \sqrt{\delta_o^2 + \delta_d^2}.$$

Пример. Определить возможную погрешность измерения напряжения срабатывания реле 50 В при следующих условиях: температура окружающей среды +5°C; измерение производится вольтметром с пределом 150 В, класс точности 0,5. Пусть известно, что напряжённость внешнего магнитного поля в месте расположения вольтметра составляет 1 Э (79,6 А/м), соответствующая погрешность пропорциональна напряжённости и при 5 Э (398 А/м) приведенная погрешность равна 2,5%; наклон прибора от горизонтального положения 10°.

Предельное значение основной погрешности вольтметра на делении 50 В составит  $\delta_0 = 0,5 \cdot 150 / 50 = 1,5\%$ . Если прибор градуировался при 15 °С, то дополнительная погрешность от изменения температуры будет также 1,5%.

Дополнительная погрешность от влияния магнитного поля составит  $2,5 \cdot 3 / 5 = 1,5\%$ , от наклона прибора  $0,5 \cdot 3 = 1,5\%$ ; погрешности от изменения напряжения вольтметр не имеет.

Возможная суммарная дополнительная погрешность составит тогда

$$\delta_d = \sqrt{1,5^2 + 1,5^2 + 1,5^2} = 2,6\%,$$

а возможная полная погрешность

$$\delta = \sqrt{1,5^2 + 2,6^2} = 3,0\%.$$

Погрешность можно снизить, применив вольтметр с меньшим верхним пределом измерения, например 100 или 50 В: тогда основная погрешность уменьшится соответственно до 1 или 0,5%, а полная до 2,0 или 1,0%. Дальнейшего снижения погрешности можно достичь путём устранения или уменьшения воздействия влияющих факторов, например, установив вольтметр в нормальное положение.

## 1.2. Электроизмерительные приборы.

Измерительные приборы, показания которых являются непрерывной функцией измеряемой величины, называют *аналоговыми*. Эти приборы имеют оцифрованную шкалу, а перемещение их подвижной части (угловое или линейное) с указателем (стрелкой) определяется значением измеряемой величины. Отношение перемещения указателя к соответствующему значению измеряемой величины называется *чувствительностью*, обратная величина – *постоянной* прибора. Например, чувствительность к току может быть выражена в размерности деление/А, к напряжению – деление/В. Разность значений, обозначенных на двух соседних делениях шкалы, называется *ценой деления*.

*Цифровые* приборы преобразуют непрерывную входную величину (напряжение, ток и др.) в отдельные (дискретные) сигналы, а измерительная информация представляется в числовой форме на цифровом индикаторе (дисплее, табло). Поэтому цифровой прибор всегда содержит два основных функциональных узла: аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровое отсчётное устройство. Система приборов отечественного производства часто обозначается буквами русского алфавита:

цифровая – буквой Ц, аналоговые – в зависимости от конструкции измерительного механизма (ниже – в скобках).

### 1.2.1. Аналоговые приборы.

В приборах *магнитоэлектрической* системы (М) подвижная часть механизма отклоняется в результате взаимодействия двух магнитных полей: постоянного магнита и катушки с током. Угол поворота стрелки прямо пропорционален току в катушке (измеряемой величине), а направление поворота (знак угла) зависит от направления тока. Особо чувствительные магнитоэлектрические приборы называются *гальванометрами*.

В обычных магнитоэлектрических вольтметрах и амперметрах подвижная часть установлена на подпятниках, из-за трения в которых эти приборы пригодны только для измерения сравнительно больших токов. В гальванометрах подвижная катушка подвешивается на металлической нити или ленте, благодаря чему устраняется трение в опорах и уменьшается противодействующий момент, а следовательно повышается чувствительность прибора и уменьшается погрешность. Измерение угла поворота катушки оптическим путём обеспечивается с помощью зеркальца, в связи с чем такие гальванометры часто называют зеркальными. При эксплуатации они должны устанавливаться по уровню или отвесу.

Зеркальный отсчёт выполняется субъективным или объективным методом. В первом случае перед зеркалом размещается освещённая шкала с делениями. Отражённый от зеркальца луч света направляется в зрительную трубу, в которой видна часть шкалы. Одну из отметок шкалы совмещают с вертикальной чертой на объективе, и при повороте катушки оператор увидит другую отметку шкалы, – деление, соответствующее измеряемой величине. Во втором случае узкий луч света направляют непосредственно на зеркальце. Отразившийся от него луч попадает на шкалу в виде тонкой световой полоски, которая перемещается по шкале на расстояние, пропорциональное углу поворота катушки. Когда не представляется возможным пользоваться зеркальными гальванометрами, требующими стационарной установки, применяют переносные гальванометры меньшей чувствительности (например, микроамперметры).

Катушка гальванометра замыкается на сопротивление, от значения которого зависит характер и время её движения. Это объясняется тем, что при повороте катушки в поле постоянного магнита в ней индуцируется ЭДС, и возникающий в замкнутой цепи ток тормозит движение катушки. Кроме того, движение катушки тормозится трением о воздух и закручиванием подвеса. Суммарное действие сил, тормозящих (успокаивающих) движение катушки, оценивается так называемым *коэффициентом успокоения*  $\beta$ , по значению которого судят о характере движения. При  $\beta < 1$  процесс носит колебательный характер, причём при  $\beta = 0$  колебания становятся незатухающими. Если  $\beta > 1$ , катушка аperiодически приближается к положению равновесия, не переходя его. Пограничный случай  $\beta = 1$  называют режимом критического успокоения, когда катушка движется тоже аperiодически, но наиболее ускоренно. Сопротивление, на которое замкнута катушка в этом режиме, называют *внешним критическим сопротивлением*.

Гальванометры с повышенным моментом инерции подвижной части называют *баллистическими*. Наибольшее отклонение  $\alpha_m$  подвижной части такого гальванометра пропорционально количеству электричества  $Q$  импульса тока, протекшего через катушку:

$$C_q \alpha_m = Q,$$

где  $C_q$  – баллистическая постоянная (в кулонах на деление шкалы прибора). Наибольшая чувствительность получается при коэффициенте успокоения  $\beta = 0$ , что может иметь место при очень большом сопротивлении внешней цепи гальванометра. По мере увеличения  $\beta$  чувствительность падает, при критическом успокоении – в 2,7 раза.

Магнитоэлектрические измерительные механизмы выполняются обычно на ток до 0,1 А. Для измерения больших токов применяются встроенные или наружные шунты – прецизионные резисторы с малым сопротивлением (порядка десятых, тысячных долей ома и меньше). Шунт параллельно с катушкой включается в цепь измеряемого тока последовательно с нагрузкой. Номинальные значения падения напряжения на шунте стандартизированы и составляют обычно 75 или (реже) 45 мВ. Внутренние (встроенные в прибор) шунты изготавливаются на токи до нескольких десятков ампер. Такие амперметры называют прямоточными и включают в цепь тока непосредственно. Наружные шунты на большие токи (сотни и тысячи ампер) снабжаются двумя парами зажимов: внешняя (токовая) служит для подключения в цепь измерительного тока, внутренняя (потенциальная) – для соединения с прибором (милливольтметром, градуированным в амперах). Такое устройство позволяет избежать погрешности от включения в измерительную цепь падения напряжения на токовых зажимах.

В вольтметрах последовательно с чувствительным измерительным элементом включается встроенный резистор с достаточно большим сопротивлением; для расширения пределов измерения применяются наружные добавочные резисторы. Вольтметр подключается к тем точкам цепи, напряжение между которыми требуется измерить, в частности, параллельно нагрузке. При этом надо учитывать, что сопротивление цепи вольтметра должно быть существенно выше внутреннего сопротивления объекта измерения – практически не менее чем на порядок.

Основные достоинства приборов магнитоэлектрической системы – равномерная (линейная) шкала, высокая точность (классы от 0,1 до 1,5), большая чувствительность, малое собственное потребление, незначительное влияние внешних магнитных полей; недостатки – непосредственное измерение только постоянного тока, чувствительность к перегрузкам и механическим воздействиям и др.

В цепях переменного тока измерители магнитоэлектрического типа могут использоваться лишь в двух случаях: 1) подвижная часть прибора имеет малый момент инерции, что позволяет ей следовать за изменением измеряемого сигнала, и 2) прибор применяется совместно с выпрямителем или термообразователем. Во всех остальных случаях магнитоэлектрический прибор измерит только постоянную составляющую сигнала, а в цепи синусоидального тока промышленной частоты и выше его показания будут равны нулю; на промышленной частоте заметны вибрация стрелки и характерный звук.

*Электромагнитные* приборы (Э) содержат неподвижную катушку и ферромагнитный сердечник, который втягивается внутрь катушки, когда по ней проходит изменяемый ток. Угол отклонения подвижной части пропорционален квадрату тока в катушке, поэтому направление поворота указателя не зависит от полярности тока. В цепи переменного тока прибор измеряет действующее (эффективное) значение тока. Шкала прибора в начале сжата, а в конце растянута.

Достоинства электромагнитных приборов – простота конструкции, надежность, пригодность для измерений в цепях как постоянного, так и переменного тока, способность выдерживать большие перегрузки (в 2...3 раза). Недостатки – большое собственное потребление, невысокая точность (обычно 1,5...2,5%), малая чувствительность, неравномерность шкалы. Существенное влияние на показания приборов оказывают внешние магнитные поля. Это влияние почти полностью исключается в так наз. *астатических* приборах. Астатический измерительный механизм содержит два одинаковых электромагнитных элемента, расположенных так, что действие внешнего магнитного поля на них взаимно компенсируется. Однако астатические приборы значительно сложнее и дороже.

Приборы электромагнитной системы рекомендуется применять для измерения переменного тока и напряжения. Сравнительно простые, надёжные и дешёвые, они получили широкое распространение в качестве щитовых приборов.

Рассмотренные электромагнитные приборы относят к группе нерезонансного типа: частота собственных колебаний их подвижной части намного меньше частоты измеряемого сигнала. Существуют и применяются также электромагнитные приборы резонансного типа, частота собственных колебаний подвижной части которых равна частоте тока в катушке. На этом принципе действуют электромагнитные частотомеры и вибрационные гальванометры.

*Электродинамические* приборы (Д) используют взаимодействие катушек с током, одна из которых неподвижна, а другая может поворачиваться на оси. Угол поворота подвижной части пропорционален произведению токов в этих катушках, или квадрату измеряемого тока (напряжения), если катушки соединены последовательно. Совершенствование конструкции позволяет приблизить шкалу к равномерной, кроме её начальной части. В ваттметрах катушки не соединяются, а включаются в отдельные цепи: одна – параллельно нагрузке, другая – последовательно с ней. Электродинамические приборы применяются преимущественно на переменном токе, но могут работать и в цепях постоянного тока.

Достоинства приборов – высокая точность (до 0,1%), работа на постоянном и переменном токе, измерение действующего значения переменного тока и напряжения. Недостатки: невысокая чувствительность, влияние температуры на показания, значительное собственное потребление, ограниченный частотный диапазон (до 1...5 кГц).

К электродинамической системе относятся и так называемые *ферродинамические* приборы, в которых для усиления индукции применен магнитопровод из магнитомягкого материала. Этим достигается увеличение вращающего момента и уменьшение влияния внешних магнитных полей, повышение чувствительности и снижение потребления. Вместе с тем наличие нелинейного элемента (магнитопровода) снижает точность приборов. Такие измерительные механизмы находят применение в самписцах, где требуется большой вращающий момент, а также в условиях тряски, вибрации, внешних магнитных полей.

*Индукционный* измерительный механизм (**И**) содержит неподвижные электромагниты и подвижную проводящую часть в виде, например, алюминиевого диска. Обмотки электромагнитов питаются переменным током. Переменные магнитные потоки электромагнитов пронизывают подвижную часть, индуцируют в ней токи и, взаимодействуя с ними, вызывают её перемещение. Таким образом, индукционные измерительные механизмы могут работать только в цепи переменного тока. Применяются они как счётчики электрической энергии и реже как ваттметры. При этом обмотка одного из электромагнитов включается последовательно в цепь нагрузки, обмотка другого – параллельно нагрузке. Магнитные потоки этих обмоток  $\Phi_1$  и  $\Phi_U$ , пропорциональные соответственно току нагрузки и напряжению на ней, создают на диске вращающий момент

$$M = k\Phi_1\Phi_U \sin \psi,$$

где  $k$  – коэффициент,  $\psi$  – угол между векторами потоков.

Путём надлежащего выбора конструктивных и схемных элементов можно добиться выполнения условий  $\psi = 90^\circ$  – ф или  $\psi = \varphi$  ( $\cos \varphi$  – коэффициент мощности). В первом случае вращающий момент будет пропорционален активной мощности  $P = UI \cos \varphi$ , во втором – реактивной  $Q = UI \sin \varphi$ . Спиральная пружина создаёт противодействующий момент, так что угол поворота диска пропорционален мощности. При отсутствии противодействующей пружины и равномерном вращении диска такое устройство будет отсчитывать соответственно активную и реактивную электрическую энергию, т.е. мощность, умноженную на время вращения диска.

Индукционные механизмы имеют большой вращающий момент, устойчивы к перегрузкам и влиянию внешних магнитных полей; недостатки их – инерционность, невысокая точность.

На основе рассмотренных систем строятся *логометры* – приборы, реагирующие на отношение двух электрических величин. Подвижная часть логометра состоит из двух катушек, жёстко укреплённых на одной оси в магнитном поле неподвижных катушек. При отсутствии токов подвижная часть логометра может занимать любое положение. Напряжение на подвижные катушки подаётся от общего источника. Вращающие моменты  $M_1$  и  $M_2$  этих катушек зависят от токов  $I_1$  и  $I_2$  в них и угла поворота подвижной части  $\alpha$ :

$$M_1 = I_1 F_1(\alpha); M_2 = I_2 F_2(\alpha).$$

Моменты  $M_1$  и  $M_2$  направлены противоположно и при установившемся положении подвижной части равны друг другу, так что

$$I_1/I_2 = F_2(\alpha)/F_1(\alpha),$$

то есть угол поворота подвижной части пропорционален отношению токов:

$$\alpha = F(I_1/I_2).$$

Поскольку токи в катушках зависят от сопротивления в их цепи, логометр может быть использован для измерения полного сопротивления, включённого в цепь одной

из катушек, если известно сопротивление в другой. На постоянном токе измерительные механизмы в виде логометра применяются в омметрах, на переменном – в фазометрах, частотомерах, фарадметрах.

*Электростатические приборы (С)*. Вращающий момент в них возникает в результате взаимодействия двух систем заряженных металлических пластин, одна из которых подвижная, другая – неподвижная. Отклонение подвижной части вызывает изменение ёмкости, образуемой пластинами. Когда к подвижным и неподвижным пластинам подводится измеряемое напряжение, они заряжаются с противоположным знаком и притягиваются друг к другу. Перемещение подвижных пластин передаётся на указатель и отсчитывается по шкале. Отклонение подвижной части пропорционально квадрату напряжения и изменению ёмкости прибора, но благодаря надлежащему подбору формы и размеров пластин шкала прибора на участке от 15...25 до 100% практически равномерна.

Электростатические приборы используются для измерения постоянного напряжения и переменного напряжения частотой до нескольких мегагерц, преимущественно – для измерения высоких напряжений. Собственное потребление на постоянном токе близко к нулю, на переменном – весьма мало. На показания приборов практически не влияют частота измеряемого напряжения, температура окружающего воздуха и посторонние магнитные поля, но в сильной степени сказывается влияние электрических полей и влажности воздуха. Для уменьшения влияния внешних электрических полей применяется экранирование прибора; экран соединяется с одним из его зажимов, который при измерении заземляется.

*Термоэлектрический (Т)* прибор представляет собой совокупность одного или нескольких термопреобразователей с магнитоэлектрическим измерительным механизмом. Преобразователь состоит из термопары и нагревателя, через который пропускается измеряемый ток. ТермоЭДС преобразователя пропорциональна количеству теплоты, выделенной в нагревателе, т.е. квадрату действующего значения измеряемого тока. Поскольку это значение не зависит от частоты тока, термоэлектрическими приборами можно пользоваться и на постоянном, и на переменном токе, включая радиочастоты. К недостаткам приборов относятся инерционность, зависимость показаний от температуры окружающей среды, недопустимость перегрузки, небольшой срок службы и значительное собственное потребление.

Приборы, содержащие *электронные* компоненты (**Ф**), представляют собой сочетание выпрямителя, усилителя постоянного тока и магнитоэлектрического измерительного механизма.

Различают вольтметры среднего  $U_{cp}$ , действующего (эффективного)  $U$  и амплитудного (максимального)  $U_m$  значения. Связь между ними устанавливается посредством коэффициентов амплитуды  $k_a$  и формы  $k_\Phi$ :

$$k_a = U_m / U; k_\Phi = U / U_{cp}.$$

При синусоидальной форме напряжения  $k_a = \sqrt{2} = 1,41$ ;  $k_\Phi = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$ .

Электронные вольтметры среднего значения содержат одно- или двухполупериодные выпрямители, диоды которых работают на линейной части своей вольт – ампер-

ной характеристики. В электронных вольтметрах действующего значения используют детекторы среднего квадратического значения. В таких детекторах применяются либо вентили с участком квадратичной вольт – амперной характеристики, либо термоэлектрические преобразователи, либо же квадратичная характеристика аппроксимируется с помощью резистивно-емкостных цепочек. Электронные вольтметры действующего значения с электростатическим измерительным механизмом не требуют использования преобразователей.

Вольтметрами амплитудного (пикового) значения (амплитудными вольтметрами) называют приборы, показания которых соответствуют амплитуде измеряемого синусоидального напряжения или максимальному значению напряжения, форма которого отличается от синусоиды. С этой целью в схему аналогового вольтметра вводятся выпрямитель и элемент памяти в виде конденсатора.

Различают амплитудные вольтметры с открытым или закрытым входом. Если измеряемое напряжение содержит постоянную составляющую  $U_0$ , амплитудный детектор с открытым входом измерит суммарную величину  $U_m + U_0$ . Чтобы измерить амплитуду  $U_m$ , применяют схему с закрытым входом, содержащим последовательно включённый конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую.

Главные достоинства электронных вольтметров – высокая чувствительность (0,1...1,0 мкВ), малое собственное потребление, широкий диапазон измеряемых напряжений (от микровольт до киловольта) и рабочих частот (до сотен мегагерц).

Электронные счётчики содержат преобразователи мощности в частоту и счётчик импульсов для дальнейшего преобразования её в сигнал, пропорциональный измеряемой электрической энергии. Широкое распространение получили электронные мегаомметры и др. К недостаткам электронных приборов относятся сравнительно большая погрешность (1,5...4%) и необходимость источника питания.

*Комбинированные* аналоговые приборы (**Ц**) – ампервольтметры (авометры, или тестеры, мультиметры) – универсальные многопредельные измерители, содержащие магнитоэлектрический прибор с добавочными резисторами и шунтами. Поскольку при измерении переменных токов и напряжений используются выпрямители, угол отклонения стрелки измерительного механизма соответствует среднему значению измеряемой переменной величины. Однако надо иметь в виду, что градуируется такой прибор по расчётному действующему значению синусоидальной величины, т.е. с учётом коэффициента формы 1,11. По этой причине при измерении параметров сигнала переменного тока, форма которого отличается от синусоиды, может быть получена значительная погрешность, тем большая, тем больше это отличие.

### 1.2.2. Цифровые приборы.

*Цифровые* приборы (**Ц**) быстро вытесняют аналоговые. В наладочной практике широко применяются цифровые вольтметры, частотомеры, омметры, мультиметры, регистрирующие приборы. Они по всем основным показателям превосходят аналоговые приборы, а по стоимости приближаются к ним.

Общим узлом для всех цифровых приборов является аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). Назначение АЦП – преобразование бесконечного множества значений непрерывной (аналоговой) величины в набор ограниченного количества цифровых эквивалентов, кодов. Основными *характеристиками АЦП* являются следующие.

- Длина шкалы  $L$  характеризует число ступеней преобразования (аналогично числу делений шкалы аналоговых приборов) и определяется разрядностью АЦП.
- Разрядность  $n$  – это число двоичных (бит) или десятичных разрядов и соответственно длина шкалы будет  $L = 2^n$  или  $L = 10^n$ .
- Разрешающая способность  $R = 1/L$  характеризует чувствительность АЦП.
- Квант  $q$  – единица младшего значащего разряда (в англоязычной терминологии – последний значащий бит или цифра). Его значение (вес) определяется как отношение верхнего предела измерения, например, номинального напряжения  $U_n$ , к длине шкалы  $L$ :  $q = U_n / L$ . Чем меньше вес кванта, тем выше чувствительность прибора.
- Погрешность квантования  $\Delta_{\text{кв}}$  является следствием преобразования бесконечного множества значений входного аналогового сигнала в ограниченное число возможных уровней выходного кода, в результате которого линейная зависимость между входной и выходной величинами заменяется ступенчатой. Максимальное значение этой погрешности  $\Delta_{\text{кв}} = q / 2$ .

Цифровые индикаторы (дисплеи) приборов отражают значение измеряемой величины в десятичной системе счисления. Разрядность цифрового дисплея—это число полных десятичных разрядов, которые индицируются цифрами от 0 до 10. Число десятичных разрядов может быть как целым, например,  $n = 3$  или 4, так и дробным, например,  $n = 3\frac{1}{2}$  или  $6\frac{1}{2}$ . Полной шкале трехразрядного прибора соответствует максимальное число 999, четырехразрядного – 9999 и т.д.

Но в ряде случаев наибольшие возможные значения измеряемой величины далеко не достигают этих чисел в данном диапазоне, а измерения в начале шкалы связаны с большой относительной погрешностью. Чтобы получить возможность работать в конце или середине шкалы, в старшем разряде оставляют только одну значащую цифру – обычно 1, иногда 4, редко 2. При этом разрядность числа определяется только по количеству полных разрядов, а неполный старший разряд обозначается правильной дробью и служит для расширения диапазона без снижения точности измерений.

Пусть, например, измеряется напряжение в сети 110 В. Трехразрядный прибор на пределе «100» может показать максимальное число 99,9, что недостаточно. Но если ввести еще один полный разряд и перейти таким образом к четырехразрядным числам, то номинальное напряжение сети составит только 11% от максимального числа 999,9 и измерения придется проводить в начале шкалы. При этом по формуле п.1.1.1, приняв для простоты  $s = d = 1$ , получим погрешность 9,1%. Если же в дополнение к полным трем разрядам ввести неполный старший разряд, содержащий только 1, то можно получить максимальное число 199,9 и тем самым расширить трехразрядный диапазон вдвое. Разрядность такого прибора будет  $3\frac{1}{2}$ , а погрешность 1,8%, т.е. в 5 раз меньше, чем в варианте с четырехразрядной индикацией. Аналогично, добавление числа 2 даст расширение диапазона втрое, числа 4 – в 5 раз.

Преобразование аналог-код может выполняться различными методами. Метод последовательного приближения (поразрядного взвешивания) заключается в последовательном сравнении измеряемого напряжения с рядом ступеней образцового на-

пряжения таким образом, чтобы сумма их стала как можно ближе к измеряемому значению (подобно тому, как при взвешивании груза подбирают ряд гирь, начиная с самой тяжелой). Каждой ступени приписывается соответствующий двоичный разряд, и результат преобразования получается в двоичном коде. Образцовые напряжения создают, например, с помощью цепочки прецизионных резисторов, питаемых от стабилизированного источника. Этот метод обеспечивает высокое быстродействие и приемлемую точность.

Наиболее высокое быстродействие, но небольшая точность свойственны методу параллельного преобразования. Здесь входной сигнал сравнивается с опорными напряжениями одновременно с помощью большого числа компараторов. Результат сравнения преобразуется в двоичный код с разрядностью  $n$  бит, соответствующей числу компараторов  $2^n$ : например, для получения 8-разрядных слов требуется  $2^8 = 256$  компараторов.

Для измерения медленно меняющихся или постоянных величин применяются АЦП интегрирующего типа. Такие АЦП имеют самые высокие точность, чувствительность, помехоустойчивость, но малое быстродействие. Разновидностями данного типа являются время-импульсный и частотно-импульсный методы. В основу время-импульсного метода положен принцип преобразования входного сигнала во временной интервал, длительность которого пропорциональна значению сигнала. Этот интервал заполняется импульсами известной частоты, количество которых подсчитывается и отображается устройством цифрового отсчета в единицах входной величины.

Согласно частотно-импульсному методу входной сигнал преобразуется в частоту следования импульсов, пропорциональную значению входной величины. Эти импульсы в течение известного интервала времени поступают на отсчетное устройство; подсчитанное таким образом количество импульсов будет пропорционально значению входной величины.

На этих принципах строятся самые различные цифровые *измерительные приборы*. Цифровые частотомеры могут измерять частоту периодического сигнала и интервалы времени. Входной сигнал преобразуется в серию прямоугольных импульсов одинаковой амплитуды, следующих с частотой входного сигнала. Далее подсчитывается количество импульсов за равные интервалы времени, которое, таким образом, оказывается пропорциональным частоте входного сигнала. Если, например, длительность интервала принята равной 0,2 с, и за это время на отсчетное устройство поступило 200 импульсов, то измеряемая частота составляет  $200/0,2 = 1000$  Гц. В режиме измерения интервала времени или периода входной сигнал преобразуется в прямоугольный импульс фиксированной амплитуды, длительность которого равна периоду входного сигнала, и подсчитывается число тактовых импульсов стабильной частоты за этот интервал времени. Если, например, тактовая частота принята равной 1000 Гц, а в продолжение периода прошло 200 импульсов, то длительность его составляет  $200/1000 = 0,2$  с. Обычно предусматривается несколько значений тактовой частоты, т.е. несколько диапазонов измерения.

Одним из серийных приборов такого типа является частотомер ЧЗ-18. Его технические характеристики: диапазон измерения частоты 10 Гц ... 50 МГц, диапазон измерения интервала времени 10 мкс ... 10 с, разрешающая способность 100 нс, входное сопротивление 10 кОм, входная емкость 50 пФ. Этот прибор может служить также источником стабильной частоты.

В цифровых вольтметрах входное напряжение преобразуется (усиливается или ослабляется, выпрямляется, фильтруется) и обрабатывается в соответствии с принятым алгоритмом в аналоговый сигнал, пропорциональный измеряемому параметру (например, действующему значению напряжения). Для перехода к цифровой форме служит, как правило, интегрирующее АЦП. Режим работы прибора задается клавиатурой. Некоторые модели содержат терминал для связи с компьютером.

Портативный цифровой мультиметр – один из самых употребительных приборов, применяемых при производстве наладочных работ для измерения напряжения (до 1000 В), тока (до 20 А), сопротивления (от долей ома до десятков мегаом), частоты. Некоторые модели имеют и другие опции: измерение емкости, проверка полупроводниковых приборов, «прозвонка» электрических цепей и др. Отличие от прочих цифровых приборов состоит в наличии на входе специальных преобразователей различных электрических величин в пропорциональное напряжение постоянного тока, которое и поступает на АЦП для преобразования в код. Конкретная величина и предел измерения выбираются с помощью переключателя. В режиме измерения тока используется внутренний шунт. Класс точности указывается для каждого параметра в отдельности, обычно в диапазоне от 0,1 до 5%. Большинство современных приборов обеспечивают автоматический выбор полярности и диапазона измерения, а также автоматическое отключение при длительном перерыве в работе. Масса цифровых мультиметров – менее 1 кг.

Цифровые приборы с микропроцессорами имеют более сложную структуру, но и более широкие возможности. Помимо микропроцессора, такой прибор содержит постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), в котором хранятся программы работы, и оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), в котором хранятся данные. Такая структура обеспечивает самые широкие возможности по преобразованию, хранению и передаче информации. Микропроцессорный прибор может не только автоматически выбирать диапазон и полярность входного сигнала, но и находить его максимальное, минимальное, среднее и действующее значения, производить математические операции, запоминать сотни результатов отдельных измерений.

К примеру, компания Metrel предлагает российскому потребителю представительную линейку многофункциональных цифровых измерительных приборов, отвечающих требованиям ПУЭ и ПТЭЭП и предназначенных для тестирования электрооборудования. Особо следует отметить фирменную технологию тестирования AUTO-SEQUENCE, позволяющую оператору провести все необходимые испытания и измерения посредством нажатия одной клавиши прибора. Такой подход позволяет в несколько раз сократить время испытаний, снизить риск ошибок и повысить уровень электробезопасности. Определенное количество последовательностей измерений запрограммировано в памяти приборов и пользователю остается только выбрать наиболее приемлемую из них. Кроме того, пользователь имеет возможность программировать и сохранять собственные автопоследовательности с учетом конкретных условий. Для отдельных измерений могут быть заданы предельные значения контролируемых параметров и получено заключение «соответствует / не соответствует». Перед запуском каждого следующего шага прибор анализирует условия на измерительных входах, и при некорректных значениях параметров измерения приостанавливаются, а пользователь извещается об этом звуковым сигналом. Все результаты могут быть сохранены в памяти прибора и выданы на ПК. Программное обеспечение Eu-

гоLink PRO / EuroLink PRO Plus позволяет обрабатывать полученные результаты и быстро создавать протоколы испытаний и измерений.

### 1.3. Техника измерений.

#### 1.3.1. Измерение постоянного тока и напряжения.

Эти параметры измеряют стрелочными приборами преимущественно магнито-электрической системы, а также электромагнитными, электродинамическими, электронными и комбинированными и, конечно, цифровыми приборами. Весьма малые напряжения (милливольты, доли милливольт) измеряют электронными приборами и магнитоэлектрическими гальванометрами.

Для расширения пределов измерения напряжения на постоянном токе применяются добавочные резисторы. Сопротивление добавочного наружного резистора можно вычислить по формуле

$$R_d = U_{пр} / I_n - R_b,$$

где  $U_{пр}$  – требуемый предел измерения вольтметра;  $I_n$  – ток полного отклонения указателя;  $R_b$  – внутреннее сопротивление вольтметра (катушки измерительного элемента и встроенного резистора). Пусть, например, требуется подобрать добавочный резистор для расширения до 500 В пределов измерения вольтметра на номинальное напряжение 100 В. Ток полного отклонения измерителя  $I_n = 50$  мкА, сопротивление рамки 2 кОм, сопротивление встроенного резистора 1998 кОм; тогда внутреннее сопротивление прибора  $R_b = 1998 + 2 = 2000$  кОм = 2 МОм, и сопротивление добавочного резистора должно быть  $R_d = 500/50 - 2 = 8$  МОм.

Когда для расширения пределов измерения измерения вольтметра применяются добавочные резисторы, измеренное напряжение рассчитывается по формуле

$$U = pU_b,$$

где  $p = \frac{R_d}{R_b} + 1$ ;  $U_b$  – показание вольтметра;  $R_b$  – внутреннее сопротивление вольтметра;  $R_d$  – сопротивление добавочного резистора. В данном случае  $p = 8/2 + 1 = 5$  и если, например, вольтметр покажет «50», то измеренное напряжение будет  $5 \times 50 = 250$  В.

Для расширения пределов измерения применяются также делители напряжения (потенциометры) с фиксированным коэффициентом деления, обычно кратным 10. Сопротивление делителя должно быть значительно больше выходного сопротивления объекта измерения, но меньше внутреннего сопротивления прибора. На постоянном токе делители напряжения выполняются из резисторов, на переменном – из резисторов (рис.1.1.а) или конденсаторов (рис.1.1.б). При условии  $R_{вх} \gg R_2$  напряжение на выходе резистивного делителя напряжения будет

$$U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2} = U k_d,$$

где  $k_d$  – коэффициент деления.

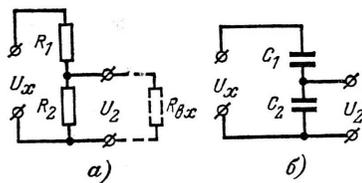


Рис.1.1. Резисторный (а) и емкостный (б) делители напряжения

Если значения сопротивлений выходного плеча делителя  $R_2$  и внутреннего сопротивления вольтметра  $R_{вх}$  соизмеримы, то в качестве выходного сопротивления делителя следует принять не  $R_2$ , а величину, представленную параллельным соединением сопротивлений  $R_2$  и  $R_{вх}$ . Значение ее будет меньше  $R_2$  и вследствие уменьшения коэффициента деления результат измерения напряжения будет получен с соответствующей погрешностью. Пример: плечи делителя  $R_1 = 9$  кОм,  $R_2 = 1$  кОм; внутреннее сопротивление вольтметра равно 2 кОм. В этом случае эквивалентное сопротивление выходного плеча делителя будет  $\frac{1 \cdot 2}{1+2} = 0,67$  кОм и коэффициент деления  $0,67/9,67 =$

0,069 вместо 0,10; ошибка 31%. Аналогичный подсчет показывает, что в случае применения вольтметра с внутренним сопротивлением 10 кОм ошибка уменьшится до 8%, 20 кОм – до 4,5%, и только при 50 кОм – до приемлемого значения 2%. Поэтому делители используются либо для грубых измерений, либо с электронными и цифровыми вольтметрами, входное сопротивление которых достигает сотен мегаом.

Малые токи (от нескольких микроампер до 20...50 мА) измеряют микро- и миллиамперметрами, включая их в разрыв цепи тока непосредственно. Для измерения токов до нескольких тысяч ампер применяют шунты, свыше – трансформаторы постоянного тока (например, в электролизном производстве). Разумеется, постоянный ток в таких преобразователях непосредственно не трансформируется.

Как и трансформаторы переменного тока, они содержат магнитопровод с первичной и вторичной обмотками, причём первичной обмоткой может служить и сам токопровод с измеряемым током. В конструкциях с дросселями насыщения вторичная обмотка подключается к вспомогательному источнику переменного тока и при равенстве ампервитков переменного и постоянного тока в ней возникает ЭДС. Сила тока в этой обмотке оказывается пропорциональной значению измеряемого постоянного тока, т.е. такое устройство действительно выполняет функции измерительного трансформатора.

Однако конструкции этого типа громоздки, погрешности коэффициента трансформации составляют 2...3%. Лучшие показатели (погрешность до 1%) достигаются применением компараторного принципа. На магнитопроводе такого трансформатора размещена компенсационная обмотка, питаемая от вспомогательного источника постоянного тока. Регулируя сопротивление переменного резистора, измеряют силу тока в её цепи. Когда нуль-магнитометр (например, датчик Холла) в магнитопроводе покажет, что индукция стала равна нулю, значение тока в компенсационной обмотке будет соответствовать измеряемому току.

### 1.3.2. Измерение переменного тока и напряжения.

Эти величины можно измерять непосредственно приборами любой системы, кроме магнитоэлектрической. При больших значениях тока применяются трансформаторы тока, а для расширения пределов измерения вольтметров используют добавочные сопротивления и делители напряжения, в частности, емкостные (рис.1,б). В последнем случае вместо активных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  используются реактивные (емкостные) сопротивления

$$X_1 = 1/\omega C_1 \text{ и } X_2 = 1/\omega C_2,$$

а коэффициент деления будет

$$k_d = \frac{X_2}{X_1 + X_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}.$$

Тогда, например, коэффициент деления 0,1 можно получить при значениях емкостей  $C_1 = 1$  мкФ,  $C_2 = 9$  мкФ, но при условии, конечно, что входное сопротивление вольтметра достаточно велико по сравнению с выходным сопротивлением  $X_2$  делителя.

Измерительный трансформатор тока (электромагнитный) содержит стальной магнитопровод с первичной и вторичной обмотками. Первичной обмоткой может служить проводник с измеряемым током, пропущенный в окно сердечника, или катушка из нескольких витков, которая включается последовательно в цепь тока (в расщелку токопровода). Вторичная обмотка питает низкоомные токовые цепи и выполняется, как правило, на номинальный ток 5 А, реже – 1А; последнее значение встречается преимущественно у электронных защит с малым собственным потреблением, в длинных цепях РЗА и др.

Работают эти трансформаторы в режиме, близком к короткому замыканию. Значение сопротивления нагрузки, превышение которого приведет к увеличению погрешности сверх номинальной, указывается в паспорте трансформатора. Чем выше класс точности, тем это значение меньше, например, от 0,2 до 1,2 Ом для трансформаторов класса 0,2; 0,5 и 1.

В этом режиме угол фазного сдвига между магнитными потоками  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , создаваемыми в магнитопроводе токами первичной и вторичной обмоток, близок к  $180^\circ$ . Поэтому результирующий магнитный поток  $\Phi$ , равный их геометрической сумме и намагничивающий сердечник, составляет лишь несколько процентов от потока  $\Phi_1$  и индуцирует в замкнутой вторичной обмотке небольшую ЭДС. Но когда по какой – либо причине цепь нагрузки разрывается и поток  $\Phi_2$  исчезает, весь поток  $\Phi_1$  становится намагничивающим и вторичная ЭДС резко возрастает, создавая опасность электропоражения людей и повреждения изоляции трансформатора. В связи с этим разрывать вторичную цепь включённого трансформатора тока не допускается. Если всё же такая необходимость возникает, например, при замене измерительных приборов, следует предварительно вторичную обмотку трансформатора замкнуть накоротко. Для этого на клеммных сборках предусматриваются штатные перемычки.

Измерив вторичный ток  $I_2$ , можно рассчитать первичный ток  $I_1$ , зная действительный коэффициент трансформации  $n = I_1/I_2$ . На практике с этой целью используют значение номинального коэффициента трансформации  $n_n = I_{1н}/I_{2н}$ , которое приводится на шитке и в паспорте трансформатора в виде отношения номинальных значений первичного и вторичного токов, например, 300/5. Иначе говоря, вместо действительного значения первичного тока  $I_1 = nI_2$  принимается его расчётное значение  $I_{1р} = n_n I_2$ , в результате чего возникает погрешность  $\Delta I = I_{1р} - I_1 = (n_n - n)I_2$ ; относительная погрешность по току будет

$$\delta I = \frac{I_{1р} - I_1}{I_1} = \frac{n_n - n}{n} 100\%.$$

Погрешность по току обычно отрицательна и тем больше, чем больше значение первичного тока отличается от номинального и чем выше сопротивление нагрузки во вторичной цепи. Полезно иметь в виду, что трансформаторы допускают значительную перегрузку по току против номинального значения, а токовая погрешность при этом возрастает сравнительно медленно.

Низковольтные переносные (лабораторные) трансформаторы тока, применяемые при наладке, изготавливаются обычно на несколько пределов измерений тока, для чего у первичной, а иногда и у вторичной обмотки делаются отводы. Кроме того, через отверстие в корпусе можно продеть проводник с измеряемым током сквозь окно сердечника, и тогда он будет служить первичной обмоткой. Если этот проводник пройдёт через окно один раз, коэффициент трансформации будет наибольшим, например, 600/5, а если пропустить его в окно несколько раз, намотав витки первичной обмотки поверх кожуха, то во столько же раз уменьшится коэффициент трансформации: до 300/5 при двух витках, 200/5 при трёх и т.д.

На рис.1.2 показан внешний вид малогабаритного (масса 1,5 кг) лабораторного трансформатора тока типа УТТ-5М на семь пределов измерения, верхний – 600/5. Первичная обмотка имеет отводы на токи 15 и 50 А. Зажимы вторичной обмотки И1-И2 могут соединяться накоротко перемычкой, которую снимают во время испытаний при полностью собранной вторичной цепи.

Трансформатор тока УТТ-6М2 имеет верхний предел измерения 2000/5.

Для измерения тока без разрыва цепи служат переносные трансформаторы тока с разъёмным сердечником, который надевается на токоведущий провод. Эти так называемые токоизмерительные клещи выпускаются как с аналоговой, так и с цифровой системами измерения в цепях переменного и постоянного тока, и в современном исполнении являются многофункциональными приборами, которыми можно измерять не только ток, но и другие электрические параметры. Клещи токоизмерительные типа Ц91 предназначены для измерения тока до 500 А и напряжения до 600 В; клещи Ц4501 (взамен Ц91) – тока до 500 А, напряжения до 600 В и сопротивления до 2 кОм; клещи ЭЛ9000 могут измерять и мощность до 75 кВт. На рис.1.3 показаны токопреобразующие клещи фирмы НЮКІ моделей 3127 и 3128. Переключателем устанавливают пределы измерения: тока от 6 до 300 А (3127) и от 15 до 1500 А (3128); напряжения переменного тока от 150 до 750 В, постоянного 75 В; сопротивления 1 и

100 кОм; температуры от  $-50$  до  $200^{\circ}\text{C}$ . Выпускаются и токоизмерительные клещи для работы в цепях высокого напряжения, например типа Ц4502.



Рис.1.2. Трансформатор тока типа УТТ-5М

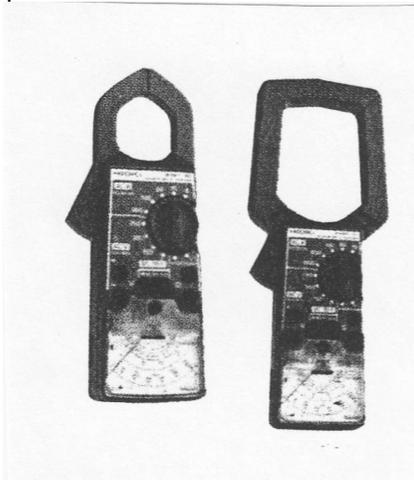


Рис.1.3. Внешний вид токоизмерительных клещей НЮКИ

### 1.3.3. Измерение электрического сопротивления.

В общем случае цепь переменного тока может содержать *активное*  $r$  и *реактивные* сопротивления:  $x_L$  – индуктивное,  $x_C$  – емкостное. Полное сопротивление определяется как

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2},$$

причём  $x_L = \omega L$ ,  $x_C = 1/\omega C$ , где  $L$  – индуктивность,  $C$  – ёмкость;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота.

В наладочной практике чаще всего приходится измерять сопротивление постоянному току (его называют также омическим). При промышленной частоте омическое

сопротивление проводников из цветного металла мало отличается от активного. При повышенных частотах активное сопротивление возрастает и может стать больше омического из-за влияния поверхностного эффекта. Этот термин, или скин-эффект, обозначает вытеснение переменного тока к поверхности проводника, из-за чего сечение проводящего канала уменьшается и сопротивление его увеличивается.

Непосредственное измерение сопротивления постоянному току производят омметрами. Аналоговые омметры часто строятся на основе измерительного механизма магнитоэлектрической системы. В простейших конструкциях измеряемое сопротивление подключается последовательно с катушкой измерительного механизма (рис.1.4,а) или параллельно с ней (рис.1.4,б), если значение сопротивления не превышает 1 Ом. В обоих случаях при неизменном значении ЭДС источника питания ( $E$ ) сила тока через измерительный прибор, т.е. отклонение подвижной части его измерительного механизма, будет зависеть только от значения измеряемого сопротивления ( $R_x$ ), в единицах которого и градуируется шкала прибора.

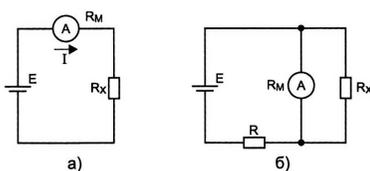


Рис.1.4. Схемы омметров: а – последовательная; б – параллельная

Шкалы приборов при обеих схемах неравномерны. Погрешность измерения сравнительно велика, показания омметра зависят от состояния элемента питания. Корректировка производится регулируемым магнитным шунтом или резистором. Магнитный шунт представляет собой передвижную ферромагнитную пластинку, перемещая которую с помощью рукоятки на панели прибора, можно изменять рабочий воздушный зазор магнитной системы измерительного механизма и тем самым индукцию в нём. Переменный резистор включается последовательно с батареей питания. Для корректировки омметра с последовательной схемой цепь измерения (зажимы  $R_x$ ) замыкают накоротко и устанавливают стрелку прибора на отметку «0», а с параллельной схемой – размыкают цепь измерения и устанавливают стрелку на отметку « $\infty$ ». Замыкание и разрыв цепи производят специальной кнопкой. Омметры с последовательной схемой более пригодны для измерения больших сопротивлений, с параллельной – малых. Необходимость регулировки является существенным недостатком таких распространённых приборов, как М371, М41070, в остальном имеющих неплохие показатели: класс точности 1,5; диапазон измерения от нескольких ом до нескольких мегаом; масса 0,5 кг.

Этого недостатка лишены омметры с логотрической измерительной частью. Здесь в цепи одной из катушек постоянно включено калиброванное сопротивление, в цепь другой вводится измеряемое сопротивление. Достоинством таких приборов является независимость показаний от напряжения источника питания, недостатком –

сравнительно невысокая точность. Логометрические системы постоянного тока находят широкое применение в приборах для измерения очень больших сопротивлений (мегаомметры).

Независимость показаний наряду с высокой точностью достигается в уравновешенных измерительных мостах постоянного и переменного тока. В общем случае плечи моста могут содержать полные (комплексные) сопротивления  $Z_x, Z_2, Z_3$  и  $Z_4$ ; одна из диагоналей подключается к источнику переменного тока, в другую включают нуль-индикатор (рис.1.5). При равновесии моста ток через индикатор равен нулю. Это состояние достигается при выполнении двух условий:

$$Z_x Z_4 = Z_2 Z_3;$$

$$\varphi_x + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3,$$

где  $z$  – модули (абсолютные значения) полных сопротивлений плеч моста;  $\varphi$  – углы фазного сдвига тока относительно напряжения в соответствующих плечах.

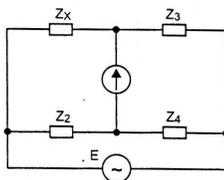


Рис.1.5. Принципиальная схема моста переменного тока

Преимущественное распространение получили мосты постоянного тока – с активными сопротивлениями плеч и питанием от источника постоянного тока (рис.1.6). Условие равновесия одно:  $R_x R_4 = R_2 R_3$ .

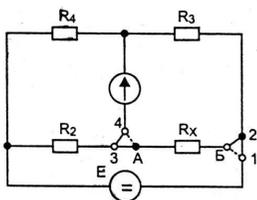


Рис.1.6. Принципиальная схема моста постоянного тока

Сопротивления плеч моста подбираются с помощью переключаемых ступенями или плавно регулируемых резисторов. Нуль-индикатором служит гальванометр или светодиодная схема. Недостатком таких четырёхплечих (иначе – одинарных) мостов является то, что на результат измерения малых (до 10 Ом) сопротивлений оказывает влияние сопротивление переходных контактов и соединительных проводов, которое

суммируется с измеряемым сопротивлением. По схеме одинарного моста постоянного тока (мост Уитстона) выполнен, в частности, простой в употреблении и сравнительно недорогой омметр типа ММВ. Два плеча прибора изготовлены в виде реохорда из калиброванной проволоки, по которой перемещается движок. Диапазон измерения 0,5 Ом...50 кОм, погрешность до 15%, масса около 1 кг.

Для уменьшения влияния присоединений измеряемое сопротивление подключается по четырёхзажимной схеме. При измерении сопротивлений от 10 до  $10^6$  Ом зажимы 1 и 2, 3 и 4 замыкаются переключками, а резистор, сопротивление которого измеряется, подключают к зажимам 2 и 3 (сплошные линии). В этом случае соединения между точками А и 4, Б и 1 отсутствуют и сопротивление измеряется по двухзажимной схеме. Для перехода к четырёхзажимной схеме переключки 1-2, 3-4 снимаются, а точки А и 4, Б и 1 соединяются между собой; резистор  $R_x$  подключается к зажимам 1 и 2, 3 и 4. В этом случае сопротивление провода от  $R_x$  к зажиму 2 входит в плечо с сопротивлением  $R_3$ , а от  $R_x$  к зажиму 3 – в плечо с сопротивлением  $R_2$ . Сопротивления  $R_2$  и  $R_3$  значительно больше сопротивлений проводов, а сопротивление проводов от зажимов  $R_x$  к зажимам 1 и 4 входит в диагональ моста.

Тем не менее при измерении малых сопротивлений (меньше 1 Ом) влияние соединений на погрешность одинарных мостов может быть достаточно велико. Это влияние сводится к минимуму в схеме двойного моста (мост Томсона), содержащего, в отличие от одинарного моста, двойной комплект плеч. В ряде приборов серийного производства двойные мосты совмещаются с одинарными, что позволяет расширить пределы измерения. Так, диапазон измерения моста типа Р329 – от 1 мкОм (двойной мост) до 1,1 МОм (одинарный мост), одинарно-двойного моста МОД – от  $10^{-8}$  до  $10^6$  Ом.

Высокую точность измерения сопротивления постоянному току обеспечивает метод сравнения измеряемого сопротивления  $R_x$  с образцовым сопротивлением  $R_0$  (рис.1.7). Эти сопротивления могут соединяться как последовательно (рис.1.7,а), так и параллельно (рис.1.7,б). Плечо с сопротивлением  $R_x$  или  $R_0$  выбирается с помощью переключателя. В каждом случае значение измеряемого сопротивления вычисляется по данным двух измерений и будет равно соответственно

$$R_x = R_0 U_x / U_0 \text{ или } R_x = R_0 I_0 / I_x.$$

Аналогичным образом можно измерить и полное сопротивление на переменном токе. Метод сравнения часто используется в электронных омметрах.

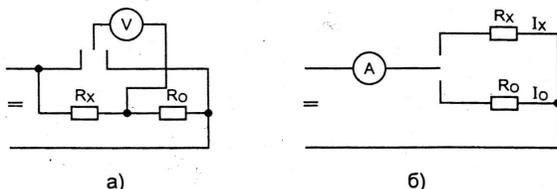


Рис.1.7. Измерение сопротивления методом сравнения: а – последовательная схема; б – параллельная схема

В отдельных случаях измеряют сопротивление косвенным способом с помощью амперметра и вольтметра. К нему прибегают, например, когда значение сопротивления нелинейно зависит от тока или при измерении малых сопротивлений, когда чувствительность измерительного прибора оказывается недостаточной. По методу амперметра – вольтметра непосредственно измеряются сила тока  $I$  через сопротивление и создаваемое этим током падение напряжения  $\Delta U$  на нем, а значение сопротивления рассчитывается как  $\Delta U/I$ . Стабилизация тока позволяет исключить необходимость его измерения и выполнения расчетов; так делается, например, в приборе Ф4104.

При измерениях, требующих высокой точности, приходится считаться с внутренним сопротивлением приборов. Поэтому схема рис.1.7,а предпочтительна для измерения больших сопротивлений, когда сопротивлением амперметра можно пренебречь по сравнению с  $R_x$ , а схема рис. 1.7,б – для малых, когда можно пренебречь пренебрежением вольтметра по сравнению с током через измеряемое сопротивление.

Погрешность измерения методом амперметра – вольтметра рассчитывается по выражению

$$\delta_R = \gamma_v U_n / U_x + \gamma_a I_n / I,$$

где:  $\gamma_v$ ,  $\gamma_a$  – класс точности вольтметра, амперметра;  $U_n$ ,  $I_n$  – пределы измерений вольтметра, амперметра.

Для обеспечения требуемой точности при измерении малых сопротивлений необходимо, чтобы в результат измерения не входило сопротивление контактов токовой цепи. С этой целью падение напряжения  $\Delta U$  снимается на участке цепи, расположенном между контактами, к которым подводится ток  $I$  (рис.1.8).

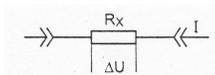


Рис.1.8. Цепи тока и напряжения при измерении малых сопротивлений

### 1.3.4. Измерение электрической мощности.

Мощность можно измерить непосредственно или косвенным образом. *Непосредственное* измерение мощности осуществляется ваттметрами, построенными на основе электродинамической и ферродинамической систем. При этом одна из катушек прибора включается через трансформатор тока, другая – через трансформатор напряжения. Изменение направления тока в одной из катушек вызывает отклонение подвижной части ваттметра в противоположную сторону. Прибор будет работать правильно, если зажимы обеих катушек, помеченные знаком «\*» и называемые генераторными, или сетевыми, будут подключены соответственно к зажиму «И1» трансформатора тока и к зажиму «а» («начало» вторичной обмотки) трансформатора напряжения.

Значение измеряемой мощности в этом случае рассчитывается путём умножения показаний ваттметра на коэффициенты трансформации. Если, например, прибор по-

казал 0,25 кВт, а коэффициенты трансформации составляют  $100/5 \text{ A} = 20$  и  $6000/100 \text{ В} = 60$ , то фактически измеренная мощность нагрузки будет  $0,25 \cdot 20 \cdot 60 = 300 \text{ кВт}$ .

Электродинамические ваттметры выпускают в виде переносных приборов высокого класса точности (0,1 – 0,5) для измерений на переменном токе частотой до 5 кГц. Ферродинамические ваттметры применяют главным образом на промышленной частоте, т.к. на постоянном токе они имеют значительную погрешность из-за гистерезиса сердечников, а на высокой частоте – большие потери.

*Косвенно* измерение мощности производится посредством амперметра и вольтметра. При этом трансформатор напряжения может быть включён либо до трансформатора тока, либо после него. Обоим вариантам свойственны методические погрешности из-за включения в результат измерения падения напряжения на первичной обмотке трансформатора тока в первом случае или тока собственного потребления трансформатора напряжения – во втором. Выбор варианта зависит от мощности нагрузки: при большой мощности можно пренебречь ответвлением тока в первичную обмотку трансформатора напряжения, при малой – падением напряжения в токовой измерительной цепи.

Численно *полная (кажущаяся)* мощность определяется как произведение напряжения  $U$  [В] и тока  $I$  [А]:  $S = UI$  [В·А]. *Активная* мощность получается умножением этой величины на *коэффициент мощности*, который в цепях синусоидального тока равен  $\cos \varphi$ , где  $\varphi$  – угол фазного сдвига между током и напряжением:  $P = S \cos \varphi$  [Вт]. Составляющая полной мощности  $Q = S \sin \varphi$  [вар] носит название *реактивной* мощности. Зная активную мощность, измеренную ваттметром, и измерив фазометром угол  $\varphi$ , можно рассчитать полную мощность  $S = P / \cos \varphi$  или реактивную мощность  $Q = P \operatorname{tg} \varphi$ . Выпускаются и приборы, измеряющие реактивную мощность непосредственно (варметры). Измерив активную и реактивную составляющие, можно рассчитать полную мощность цепи, напряжение и ток в которой синусоидальны:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} .$$

Мощность трёхфазной системы определяется как сумма мощностей всех трёх фаз. Применяются схемы измерения мощности одним, двумя или тремя приборами. При полностью симметричной нагрузке, т.е. когда напряжения, токи и углы сдвига между ними в каждой фазе одинаковы, можно измерить одним прибором мощность любой из фаз А, В или С и полученное значение утроить.

При несимметричной нагрузке пользуются двумя или тремя приборами, показания которых суммируют. Выпускаются двух- и трехэлементные ваттметры, где суммирование производится автоматически.

### 1.3.5. Измерение электроэнергии.

Для измерения энергии переменного тока применяются преимущественно приборы индукционной и электронной систем. Маркировка счетчиков: О – однофазный, А – активной энергии, Р – реактивной энергии, У – универсальный, 3 или 4 – для трех- или четырехпроводной сети.

Число оборотов диска индукционного счетчика, приходящееся на единицу измеряемой энергии, называется *передаточным числом* счетчика и обычно указывается

на щитке прибора, например, 1200 оборотов на 1 кВт·час. Число, обратное передаточному, т.е. значение энергии, отсчитанное за один оборот диска, называется *номинальной постоянной* счетчика  $C_n$ , например:

$$C_n = 1/1200 \text{ [кВт·ч/об]} = 1000 \cdot 3600/1200 = 3000 \text{ Вт·с/об.}$$

Зная постоянную  $C_n$  и отсчитав число оборотов  $N$ , можно определить потребленную активную энергию  $W = C_n N$ . В действительности постоянная счетчика не остается неизменной, т.е.  $C_d \neq C_n$ , а зависит от нагрузки и внешних условий. Поэтому фактически будет израсходована энергия  $W_d = C_d N$ , а при расчете с использованием номинального значения  $C_n$  будет получена погрешность

$$\delta \% = \frac{W - W_o}{W_o} 100 = \frac{C_n - C_o}{C_o} 100\%.$$

Предел допускаемой погрешности определяет класс точности счетчика – от 0,2 до 3.

По назначению счетчики подразделяются на расчетные и контрольные (для технического учета); первые должны быть точнее. То же относится и к измерительным трансформаторам: они должны иметь класс точности не хуже 0,5 для работы с расчетными счетчиками и 1,0 – для технического учета. Нагрузка вторичной цепи трансформаторов тока, т.е. количество включенных в нее приборов и, следовательно, ее сопротивление, не должна превышать допустимой для данного класса точности. Исходя из этого, ориентировочно принимают максимальное сопротивление соединительных проводов в токовой цепи электромеханических счетчиков не более 0,2 Ом.

Погрешность счетчика зависит от значений тока и коэффициента мощности (эта зависимость называется нагрузочной характеристикой счетчика), а также от формы кривой тока нагрузки, несимметрии напряжений, чередования фаз, температуры и др. В нормальных режимах и при  $\cos \varphi \approx 1$  погрешность счетчика имеет отрицательный знак. На практике у индукционных счетчиков могут наблюдаться и положительные, и высокие значения погрешности, далеко выходящие за пределы класса точности, особенно на присоединениях с низким  $\cos \varphi$  (<0,5) и малыми токами нагрузки.

Причиной неправильной работы счетчика часто бывает так называемый самоход – вращение подвижной части или мигание индикаторов счетчика под действием приложенного напряжения при отсутствии тока нагрузки, то есть когда потребитель не расходует энергии. Этот дефект может быть следствием неправильной регулировки при изготовлении прибора или нарушений в цепях питания, как, например, обратный порядок чередования фаз, отсутствие напряжения одной из фаз или разные значения фазных напряжений. При включении на напряжение 80...110% номинального и разомкнутых токовых цепях диск индукционного счетчика не должен совершить более одного полного оборота за 10 мин, а у электронного счетчика не должны мигать индикаторы.

Схемы включения большинства счетчиков предусматривают обязательное соблюдение полярности: «начала» обмоток тока и напряжения должны подключаться со стороны питающей сети, «концы» – со стороны нагрузки. Выполнению этого требования способствуют соответствующие цифровые или буквенные обозначения выводов обмоток на колодке зажимов счетчика (встречаются обозначения «Г») – «генера-

тор», «Н» – «нагрузка»). При включении однофазного индукционного счетчика с обратной полярностью в цепи напряжения или тока, создается отрицательный вращающий момент, вызывающий вращение диска в обратную сторону. При изменении полярности в обеих цепях одновременно счетчик сохраняет работоспособность, но такое включение не рекомендуется. Новые типы электронных счетчиков измеряют энергию независимо от полярности измерительных цепей.

Требование соблюдения полярности распространяется также и на трансформаторы тока и напряжения. В трехфазной сети обязательным требованием является соблюдение прямого порядка чередования фаз напряжения (А-В-С, В-С-А, С-А-В). Изменение осуществляется переключением двух проводов с одного элемента на другой. Подключение счетчиков к сети осуществляется аналогично ваттметрам. На рис.1.9 показана схема включения двухэлементного счетчика активной энергии.

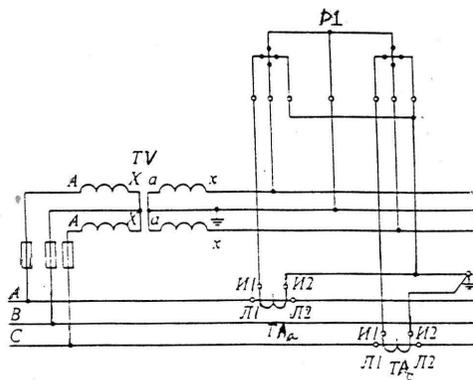


Рис.1.9. Схема измерения активной электроэнергии трехфазным двухэлементным счетчиком (PI) с трансформатором напряжения (TV) и двумя трансформаторами тока (TA<sub>a</sub> и TA<sub>c</sub>)

Для проверки правильности подключения счетчика его показания сравнивают со значениями электроэнергии, рассчитанными по выражениям (на одну фазу):

$$\text{для активной энергии } W_a = U_\phi I t \cos \varphi \text{ [Вт} \cdot \text{с]},$$

$$\text{для реактивной } W_p = U_\phi I t \sin \varphi \text{ [вар} \cdot \text{с]},$$

где  $U_\phi$  – фазное напряжение (В),  $I$  – ток нагрузки (А),  $t$  – время наблюдения (с).

Рекомендуется, чтобы значение тока было не менее 0,1 номинального и за время  $t$  не изменялось, и, кроме того, коэффициент мощности нагрузки был не ниже 0,5. Если эти условия в режиме нормальной эксплуатации не обеспечиваются, ток в последовательной цепи создают искусственно с помощью регулируемого нагрузочного устройства или постоянного резистора, например, ТЭНа сопротивлением порядка 20 Ом, мощность 2 кВт. Метрологическая поверка счетчиков производится в специализированных лабораториях.

### 1.3.6. Измерение частоты, интервалов времени и угла сдвига фаз.

#### 1.3.6.1. Измерение частоты.

*Частота* – это число повторяющихся событий (колебаний) за единицу времени. Интервал времени, через который эти события регулярно повторяются, называют *периодом*. Частота ( $f$ ) и период ( $T$ ) – величины взаимно обратные:  $f = 1/T$ . Единица частоты герц (Гц) соответствует одному колебанию за 1 с. Угловая частота  $\omega$  измеряется числом радиан за 1с и связана с циклической частотой  $f$  соотношением  $\omega = 2\pi f$ ; при значении  $f = 50$  Гц (так наз. промышленная частота) угловая частота  $\omega = 314$  (рад/с или 1/с); угол  $1\text{рад} = 180/\pi = 57,3^\circ$  (град. эл.– градусы электрические).

Основными средствами частотно-временных измерений служат резонансные и цифровые частотомеры, а также осциллографы. Наиболее простым электромеханическим прибором для измерения частоты является электромагнитный резонансный частотомер. Здесь в поле электромагнита располагаются стальные пластинки с различной частотой собственных колебаний, значение которой указано на поверхности каждой из них. Под действием переменного магнитного поля пластинки дважды за период будут притягиваться к магниту. Та пластина, частота собственных колебаний которой совпадает с двойной частотой тока, будет колебаться с наибольшей амплитудой и появится в окошке шкалы.

Электромеханические частотомеры строятся и на основе электро- или ферродинамического логометра. В них используется то обстоятельство, что индуктивное и емкостное сопротивления изменяются с частотой противоположным образом. Поэтому в цепи подвижных катушек вводятся конденсаторы и дроссели, реактивные сопротивления которых подобраны так, чтобы шкалу прибора можно было отградуировать в единицах частоты (Д596М, Д126 и др.).

Работа электронно-счетных частотомеров основана на подсчете числа импульсов измеряемой частоты за определенный интервал времени. Такие приборы обеспечивают высокую точность измерения в широком диапазоне частот. Частотомеры типа Э5034 и аналогичные позволяют измерить не только частоту в диапазоне от 0,1 Гц до 50 МГц, но и длительность ( $10^{-6} \dots 10^5$  с) импульсов и их количество ( $1 \dots 10^8$ ).

При использовании осциллографа период определяют обычно по характерным, легко отличимым точкам на кривой периодического (гармонического) сигнала – достижение амплитудного значения, переход сигнала через ось времени (т.е. через нуль) и др., а частоту – по числу переходов через нуль за одну секунду.

#### 1.3.6.2. Измерение интервалов времени.

При наладке часто приходится измерять небольшие *интервалы времени* в секундном и миллисекундном диапазоне, например, время срабатывания релейно-контакторных аппаратов – от момента подачи (снятия) напряжения на аппарат до замыкания или размыкания его контактов. Эту операцию обычно выполняют с помощью электромеханических секундомеров типа ПВ-53Л, П14-2М. Стрелки такого прибора приводятся в движение электромагнитом или электродвигателем, а останавливаются отключением электропривода от сети замыкающими (нормально открытыми, н.о.) контактами или шунтированием обмотки электромагнита размыкающими (нормально закрытыми, н.з.) контактами проверяемого аппарата. Чтобы не пересоединять провода при переходе от одной схемы измерения к другой, удобно ввести переключающий тумблер.

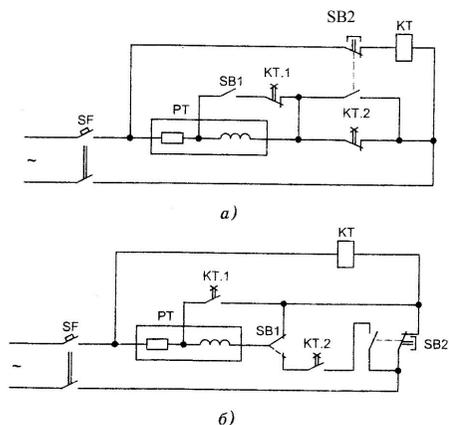


Рис.1.10. Схема измерения времени срабатывания контактов: КТ – электромагнитное реле с замедлением на срабатывание замыкающего или размыкающего контакта; РТ – электромеханический секундомер; SB1 – тумблер подготовки схемы к работе; SB2 – тумблер переключения схемы при измерении времени замыкания или размыкания контактов реле КТ; а – реле с размыкающим (н.з.) контактом; б – реле с замыкающим (н.о.) контактом

В качестве примера на рис.1.10 приведены схемы проверки срабатывания электромеханического аппарата – в данном случае реле переменного тока КТ – с выдержкой времени на замыкание / размыкание контактов. После подачи напряжения питания выключателем SF на схему рис.1.10, а включается реле КТ с размыкающим контактом и начинает работать электросекундомер РТ. Когда спустя выдержку времени реле его н.з. контакт КТ.2 разомкнется, цепь питания секундомера прервется и он остановится, отсчитав установленную выдержку времени на размыкание н.з. контакта. Чтобы измерить выдержку времени на замыкание н.з. контакта, включают тумблер подготовки SB1, затем тумблер переключения режима SB2. Реле КТ отключается от сети, а секундомер РТ начинает отсчитывать выдержку времени, по истечении которой контакт КТ.1 шунтирует обмотку РТ.

Схема рис.1.10,б отражает работу замыкающего контакта реле КТ. В режиме работы с выдержкой времени на замыкание н.о. контакта после подачи питания включается реле КТ и запускается секундомер РТ через н.з. контакты SB2 и SB1. По истечении выдержки времени контакт КТ.1 замыкается и секундомер останавливается. Для измерения выдержки времени на размыкание тумблер SB1 переводится в положение, показанное пунктиром. Переключателем SB2 обесточивается реле КТ и запускается секундомер РТ. Когда выдержка времени окончится, контакты КТ.2 разорвут цепь питания секундомера.

Для измерений интервалов времени в миллисекундном диапазоне применяют электронные секундомеры (типа ЭМС-54 и т.п.), для тонких измерений – электронные (типа ЧЗ и др.), цифровые частотомеры и осциллографы. Если у используемого

осциллографа отсутствует масштабная сетка горизонтальной развертки и калибровочные метки, измеряемый интервал времени сравнивают с длительностью импульсов известной частоты, например, 50 Гц.

Более широкие возможности, чем прибор ЭМС-54, имеет измеритель временных интервалов типа Ф738. Тогда как первый может измерять интервалы времени в диапазоне 5...500 мс, прибор Ф738 имеет пределы от 1 мс до 10 с и позволяет измерять не только время срабатывания контактной системы, но и разность времен срабатывания контактов реле в любой комбинации. Цифровой измеритель параметров реле Ф291 реализует те же функции, но имеет верхний предел измерения 100 с.

### **1.3.6.3. Измерение угла сдвига фаз.**

Определить угол сдвига фаз  $\varphi$  между током  $I$  и напряжением  $U$ , а также коэффициент мощности в однофазной цепи можно косвенным методом по показаниям амперметра, вольтметра и ваттметра:  $\cos \varphi = P/S$ , вычислив предварительно  $S = UI$ , где  $P$  – активная,  $S$  – полная мощность. Недостатком такого метода является необходимость одновременного отсчета показаний трех приборов и производства вычислений. В приборах непосредственного отсчета – фазометрах часто используется электродинамический логометр, неподвижная катушка которого включается последовательно с нагрузкой, а подвижная – параллельно с ней. При надлежащем подборе параметров параллельной цепи прибора угол  $\alpha$  отклонения его подвижной части будет равен фазному углу нагрузки:  $\alpha = \varphi$ ,  $\cos \alpha = \cos \varphi$ . Шкала фазометра может быть отградуирована в значениях угла  $\varphi$  или коэффициента мощности  $\cos \varphi$  (Д578, Д5000).

Другой способ измерения фазового сдвига – преобразование его во временной интервал. При этом в моменты перехода через нуль двух сравниваемых по фазе периодических сигналов вырабатываются короткие импульсы и фиксируется сдвиг во времени их поступления. Этот промежуток времени  $\Delta t$  пропорционален фазовому сдвигу  $\Delta \varphi$  между сигналами и может измеряться аналоговым, цифровым или микропроцессорным методом. Фазометры, построенные на основе микропроцессора, обеспечивают наиболее широкие функциональные возможности, позволяя измерять не только значение фазового сдвига за любой выбранный период, но и его изменение во времени, среднее значение и др.

Для измерения малых фазовых сдвигов применяются фазометры с умножением частоты. В них используются два умножителя частоты в  $n$  раз, выходные сигналы которых сдвинуты на угол  $\varphi_n = n\Delta \varphi$ . Такой угол можно измерить с большей точностью, а затем вычислить  $\Delta \varphi = \varphi_n/n$ .

На экране осциллографа фазовый сдвиг можно наблюдать непосредственно или определить с помощью так наз. фигур Лиссажу. Если на входы  $X$  и  $Y$  подать синусоидальные сигналы одинаковой частоты и подобрать масштаб изображения так, чтобы их амплитуды были равны, то на экране осциллографа появятся сравнительно простые геометрические фигуры (прямая, окружность или эллипс), по виду которых нетрудно определить сдвиг фаз между входными сигналами.

Очень удобны для измерений в цепях вторичного тока вольтамперфазометры типа ВАФ-85М (или аналогичные). Многопредельный детекторный прибор имеет класс точности 4 при измерении силы тока и напряжения переменного тока и 1,5 – при измерении угла сдвига фаз. Пределы измерения напряжения от 1 до 250 В, тока – до10

А, угла – до  $180^\circ$ . Измерение тока на пределах 1, 5 и 10 А производится с помощью токосъемной клещевой приставки, охватывающей проводник с током и работающей как трансформатор тока. При измерении малых значений переменного тока на пределах 10, 50 и 250 мА прибор включается непосредственно в рассечку цепи измеряемого тока. Для измерения меньших значений тока можно ввести в рассечку гибкий проводник, пропущенный несколько раз через окно клещей, не забыв затем разделить полученные показания прибора на число витков в окне.

Для измерения фазы тока или напряжения служит сельсин с трехфазным ротором. На статор сельсина подается трехфазное напряжение с прямым порядком следования фаз А, В, С. Отсчет угла производится относительно вектора напряжения АВ по лимбу, механически связанному с ротором сельсина. Угол между двумя токами (напряжениями) или током и напряжением вычисляется как разность углов, отсчитанных при двух измерениях.

Поскольку прибор может измерять как напряжение и ток, так и угол сдвига между ними, он может быть использован и для определения мощности. Менее известно то, что с помощью приборов типа ВАФ можно определить направление и напряженность магнитного поля.

Вольтамперфазоиндикатор «Парма ВАФ-А» построен на современной микроэлектронной базе и позволяет измерять напряжение и силу тока, частоту, углы сдвига фаз, активную и реактивную мощность, а также определять чередование фаз в трехфазных системах. Измерение угла сдвига фаз производится относительно опорного канала. Канал содержит компараторы, которые преобразуют входной синусоидальный сигнал в прямоугольные импульсы и через оптроны передают их для дальнейшей обработки в микроконтроллер. Измерительный канал содержит два преобразователя напряжения – частота, служащих для непосредственного измерения тока и напряжения. Микроконтроллер производит программную оценку поступающих сигналов и выбор режима работы прибора. Результаты измерений выводятся на дисплей, в левой части которого индицируются значения углов, в правой – тока и напряжения. Для измерения углов сдвига фаз между током и напряжением используются опорные клещи, между напряжением и током – измерительные клещи. Результат определения порядка чередования фаз выводится в текстовом виде: «прямое чередование фаз» или «обратное чередование фаз».

Вольтамперфазоиндикатор М4185, кроме измерения напряжения, тока, частоты, мощности и углов сдвига фаз обеспечивает вычисление потребляемой энергии и коэффициента мощности, а также контроль нагрузки измерительных трансформаторов тока и напряжения. Возможно использование внешней памяти, подключение персонального компьютера, работа в диалоговом режиме.

НПП «Динамика» (г. Чебоксары) предлагает универсальный прибор нового поколения – вольтамперфазоиндикатор «РЕТОМЕТР». Измерения полностью автоматизированы, пределы измерения также выбираются автоматически. Основная погрешность прибора не более  $\pm 0,5\%$  от показаний,  $+ 0,3\%$  от предела. Диапазоны измерения напряжения от 0,01 до 600 В, переменного тока от 0,01 до 20 А, угла сдвига фаз от  $-180^\circ$  до  $180^\circ$ , частоты от 20 до 250 Гц, сопротивления от 10 Ом до 10 кОм (в режиме «прозвонки» до 10 Ом). Кроме того, прибор осуществляет и другие функции: определение порядка чередования фаз трехфазной сети, вычисление активной мощ-

ности, определение полярности обмоток измерительных трансформаторов и электродвигателей. Масса прибора – менее 300 г.

### 1.3.7. Измерение емкости и индуктивности.

Емкость нетрудно измерить методом амперметра-вольтметра, найдя реактивное сопротивление  $x_c = U/I$  по напряжению  $U$  на конденсаторе и току  $I$  через него и вычислив затем из выражения  $x_c = 1/\omega C$  значение  $C = 1/\omega x_c$ . Правда, этот расчет справедлив лишь для конденсатора без потерь, т.е. если считать сопротивление конденсатора чисто емкостным. В действительности сопротивление конденсатора содержит небольшую активную составляющую, из-за которой угол фазного сдвига между напряжением на конденсаторе и током через него отличается от  $90^\circ$  на небольшой угол  $\delta$ . Принято характеризовать потери тангенсом этого угла  $\operatorname{tg} \delta$ ; в большинстве случаев вполне допустимо ими пренебречь. Если все же требуется погрешность метода исключить, можно воспользоваться другим косвенным способом, измерив с помощью гальванометра заряд емкости  $Q = CU$  и вычислив затем значение  $C = Q/U$ .

Непосредственное измерение можно осуществить приборами, принцип действия которых основан на зависимости тока или напряжения от включенной в цепь емкости. Измерение емкости включается в опции цифровых и микропроцессорных приборов, мультиметров. Применяются и мосты переменного тока с питанием на фиксированной частоте 400 ... 1000 Гц. Мост балансируют путем поперемной подстройки двух его плеч, а результат считывают по лимбам переменных резисторов (пример – измеритель емкости Е8-3). Малые значения емкости (сотни, тысячи пикофард) удобно измерять резонансным методом: неизвестная емкость включается в измерительный LC-контур, наступление резонанса фиксируется чувствительным прибором. Однако надо учесть, что на переменном токе нельзя измерять емкость полярных электролитических конденсаторов, так как напряжением обратной полярности конденсатор может быть поврежден.

В отличие от конденсатора, пренебрегать активными потерями в катушке с индуктивностью, как правило, недопустимо. Активное сопротивление катушки бывает порядка с индуктивным, а зачастую и превышает его. Только в отдельных случаях, с более или менее грубым приближением можно принимать полное сопротивление катушки равным индуктивному  $x_L = U/I = \omega L$  и считать, что  $L = U/I\omega$ .

В принципе применение метода амперметра-вольтметра может обеспечить достоверный результат, если рассчитать полное сопротивление  $z = U/I$ , измерить омметром активное сопротивление  $r$  и вычислить затем индуктивное сопротивление  $x_L = \sqrt{z^2 - r^2}$  и индуктивность  $L = x_L/\omega$ . Погрешность будет зависеть от класса точности используемых приборов, формы кривой напряжения и тем больше, чем больше отношение  $r/x_L$ .

Достаточно точные результаты можно получить путем осциллографирования тока переходного процесса в цепи с индуктивностью (рис.1.11). С этой целью обмотку с током  $I_0$  (контакт тумблера S1 замкнут) замыкают тумблером S2 на шлейф (вибратор) осциллографа РО, сопротивление которого намного меньше ограничительного  $R_{ог}$  (рис.1.11,а), и осциллографируется ток в образовавшейся цепи. Полученная осциллограмма позволяет определить омическое сопротивление в этой цепи по формуле  $R = U_0/I_0$ , где  $U_0$  и  $I_0$  – начальные значения напряжения и тока. Это значение можно принять за сопротивление катушки  $R_k$ , если пренебречь сопротивлением шлейфа, в про-

тивном случае последнее надо вычесть из расчетного значения  $R$ . Индуктивность  $L_K$  можно найти из выражения для постоянной времени  $\tau_K = L_K / R_K$ , откуда  $L_K = \tau_K R_K$ . Постоянную времени, в свою очередь, находят как точку  $t = \tau_K$  по кривой на рис. 11, б (экспонента) одним из двух способов: либо по соответствующей ей точке  $i = 0,36 I_0$  на вертикальной оси, либо с помощью касательной к кривой тока в точке  $i = I_0$ .

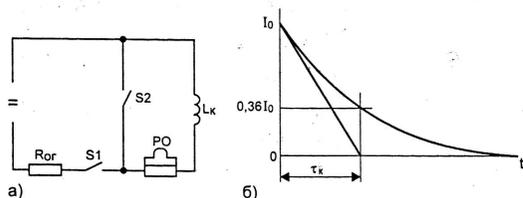


Рис.1.11. Определение индуктивности с помощью осциллографа: *а* – принципиальная схема; *б* – кривая спада тока в цепи катушки с индуктивностью  $L_K$ ;  $R_K$  – ограничительный резистор;  $S1, S2$  – тумблеры;  $PO$  – вибратор магнитоэлектрического осциллографа

Для непосредственного измерения индуктивности служат мосты переменного тока. Одно из плеч такого моста содержит образцовую индуктивность, в другое вводится измеряемая индуктивность, остальные же два плеча образуются реохордом, с помощью которого производится уравнивание моста (приборы 5083, P5084).

Малые индуктивности (порядка миллигенри) могут быть измерены резонансным способом. Измеряемая индуктивность  $L_x$  включается параллельно конденсатору переменной емкости  $C_0$ , снабженному шкалой, градуированной в единицах индуктивности. Изменяя емкость конденсатора, добиваются резонанса в контуре  $L_x C_0$ , о достижении которого судят по максимальным показаниям вольтметра, включенного параллельно контуру.

Используя тот или иной способ измерения, необходимо принимать во внимание особенность катушек со стальным сердечником: из-за нелинейности кривой намагничивания стали индуктивность их в значительной степени зависит от тока в обмотке, а также и от частоты переменного тока. Поэтому индуктивность катушки со стальным сердечником следует измерять при тех же значениях постоянного и переменного тока и частоты, что и в рабочем режиме.

Когда рассматривают отдельный контур или катушку с током  $i_1$ , то связь между этим током и создаваемым им магнитным потоком определяется собственной индуктивностью (коэффициентом самоиндукции)  $L1$ . Если же вблизи данного контура расположен другой с током  $i_2$  и коэффициентом самоиндукции  $L2$ , то создаваемый ток  $i_2$  магнитный поток будет пронизывать не только свой, но частично и первый контур. Точно такое же влияние будет оказывать и первый контур на второй; такие контура называются индуктивно- или магнитносвязанными. Связь между током в одном контуре и создаваемым им потоком в другом характеризуется взаимной индуктивностью  $M$ , которая, как и собственная индуктивность  $L$ , измеряется в генри ( $\Gamma$ ).

Если катушки соединить последовательно согласно, то индуктивность цепи будет  $L_c = L_1 + L_2 + 2M$ , а если встречно, то  $L_b = L_1 + L_2 - 2M$ . По одному из способов экс-

периментального определения взаимной индуктивности  $M$  измеряют ЭДС  $E = \omega MI$ , наведенную (индуктированную) в какой-либо из магнитносвязанных катушек током  $I$  в другой, и находят  $M = E / \omega I$ . По второму способу определяют индуктивности  $L_c$  и  $L_b$  и вычисляют взаимную индуктивность  $M = (L_c - L_b)/4$ . Надо только иметь в виду, что при слабой магнитной связи между катушками этот способ может дать большую погрешность, поскольку результат зависит от разности двух близких значений. Повышение точности можно достичь резонансным методом, согласно которому индуктивность  $M$  включают последовательно с регулируемой емкостью  $C$ , добиваются наступления резонанса и тогда из уравнения  $\omega M = 1/\omega C$  находят  $M = 1/\omega^2 C$ . Недостаток метода заключается в трудности подбора конденсатора переменной емкости в нужном диапазоне.

В настоящее время ряд фирм выпускает многофункциональные цифровые приборы, позволяющие измерить активное сопротивление (в том числе по четырехпроводной схеме), индуктивность, емкость, тангенс угла потерь и др., например, лабораторный LCR-метр АМ-3002 («АКТАКОМ»).

### 1.3.8. Измерение магнитных величин.

В приборах для измерения характеристик постоянных и переменных магнитных полей магнитные величины преобразуются в электрические с помощью измерительной катушки, витки которой сцепляются с магнитным потоком. Плоскость катушки располагается при этом перпендикулярно вектору магнитной индукции или напряженности магнитного поля. Если измерительная катушка предназначена для измерения магнитного поля внутри образца, витки ее должны плотно охватывать образец. Катушка для измерения магнитного поля на поверхности образца должна быть прямоугольного сечения и располагаться так, чтобы ее ось совпадала с вектором напряженности магнитного поля.

#### 1.3.8.1. Измерение постоянного магнитного потока.

Специальный измерительный прибор – веберметр – представляет собой магнитоэлектрический гальванометр с пренебрежимо малым противодействующим моментом. Рамка гальванометра будет перемещаться до тех пор, пока по ней протекает ток. Чтобы создать импульс тока, вводят измерительную катушку в магнитное поле или, наоборот, создают магнитное поле при заранее введенной катушке. Ток во вторичной цепи рамки, замкнутой на измерительную катушку, будет зависеть от скорости изменения магнитного потока, а угол отклонения рамки веберметра будет пропорционален значению потока. Шкала веберметра градуируется в единицах магнитного потока, он прост и удобен в работе. Основным недостатком его является относительно низкая чувствительность.

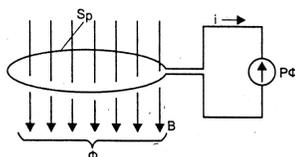


Рис. 1.12. К принципу измерения магнитного потока ( $\Phi$ ) веберметром (PФ)

На рис.1.12 показано подключение плоской измерительной катушки к веберметру, а на рис.1.13 – применение гальванометра для измерения магнитного потока в сердечнике (измерительная катушка в положении *a*) и магнитной индукции в воздушном зазоре сердечника (положение *б*).

Более высокую чувствительность имеет баллистический гальванометр. Присоединенный к контуру, охватывающему магнитный поток, он измерит количества электричества в импульсе тока, возникающего при изменении потока. Изменение потока  $\Phi$  можно осуществить удалением катушки из магнитного поля или изменением напряженности поля. При этом, аналогично измерению количества электричества, будет соблюдаться равенство

$$C_{\Phi} \alpha_m = \Phi,$$

где  $C_{\Phi}$  – баллистическая постоянная (в веберах на деление шкалы).

Но надо иметь в виду, что эта зависимость справедлива лишь при условии, что длительность импульса тока весьма мала по сравнению с периодом собственных колебаний подвижной части гальванометра. Основной недостаток способа состоит в том, что баллистическая постоянная зависит от сопротивления внешней цепи и ее приходится определять опытным путем.

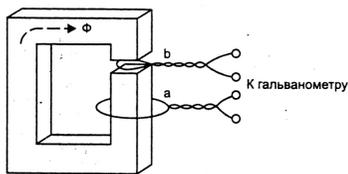


Рис.1.13. Измерение магнитного потока (а) и магнитной индукции (б)

### 1.3.8.2. Измерение переменного магнитного потока.

Измерить переменный магнитный поток, например, в сердечнике трансформатора, значительно легче, чем постоянный, так как его не нужно принудительно изменять. Если ток в первичной обмотке имеет синусоидальную форму, то, как известно из электротехники, ЭДС вторичной обмотки также будет синусоидальна и пропорциональна потоку. Если же форма первичного тока резко отличается от синусоиды, напряжение вторичной обмотки снимают через фильтр. При этом активное сопротивление конденсатора и выходного сопротивления трансформатора. В этом случае можно считать, что ток в конденсаторе пропорционален вторичной ЭДС, а напряжение на конденсаторе пропорционально потоку.

### 1.3.8.3. Применение преобразователя Холла.

Преобразователь (датчик) Холла представляет собой специальную полупроводниковую пластинку в форме параллелепипеда. Если такую пластинку поместить в магнитное поле напряженностью  $H$ , проходящее через пару противоположных боковых

граней, и через верхнюю и нижнюю (на рис.1.14) грани пропустить постоянный ток  $I$ , то на другой паре боковых граней возникнет ЭДС  $E_x$ , которая при неизменном значении возбуждающего тока будет пропорциональна индукции магнитного поля. К примеру, при токе  $I = 0,1$  А и индукции  $B = 1$  Т ЭДС Холла получается около  $E = 60$  мВ. Преимуществами датчика Холла являются его малые размеры (порядка нескольких миллиметров) и безынерционность.

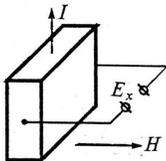


Рис.1.14. К возникновению эффекта Холла

Датчик Холла содержат, например, токовые клещи серий АТА и АТК (фирма “АК-ТАКОМ”). Первые дешевле, но требуют применения наружных измерительных приборов – вольтметра или мультиметра, вторые же имеют встроенный жидкокристаллический индикатор и позволяют измерять, кроме силы тока, также напряжение и активное сопротивление (АТК-2102), мощность (АТК-2200), сопротивление заземления (АТК-4001) и др.

## 1.4. Осциллографирование.

В практике электрических измерений возникает необходимость фиксировать параметры не только стационарных, установившихся величин, но и переменных, изменяющихся во времени. С целью автоматической регистрации переменных параметров применяются самопишущие приборы (или просто самописцы), которые позволяют определять текущее значение измеряемой величины в любой момент времени и характер её изменения, а также связь между несколькими параметрами (с помощью многоканальных приборов). У самописцев, предназначенных для регистрации медленно протекающих процессов, пишущий узел совмещён с показывающим. Применяют самопишущие приборы с записью чернилами, точечной, искровой, оптической (фотографической), термической, ультрафиолетовой, магнитной записью. Обычные самописцы позволяют вести запись процессов с частотным диапазоном до 1 Гц, приборы с повышенным быстродействием – до 150 Гц.

*Осциллограф* (от лат. «осциллум» – колебание и греч. «граф» – пишу) – прибор, предназначенный для наблюдения и регистрации быстро протекающих процессов, чаще всего – электрических величин, изменяющихся во времени периодически или по произвольному закону. Аналогичные приборы, служащие только для наблюдения, иногда называют *осциллоскопами*. Осциллографы различаются по устройству, принципу действия и способу запоминания (регистрации).

### 1.4.1. Светолучевые осциллографы.

Светолучевые (иначе – электромеханические, магнитоэлектрические или шлейфовые) осциллографы относятся к числу приборов с оптической записью. Основными узлами их являются: вибратор (шлейф), оптическая система и устройство для визуального наблюдения или фотографирования контролируемых процессов.

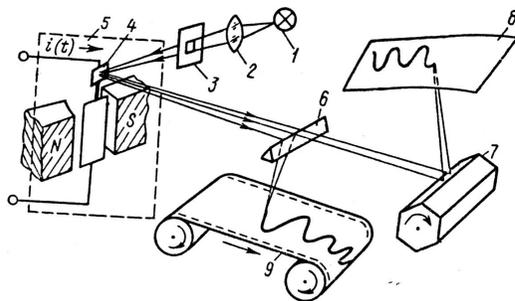


Рис.1.15. Схема устройства светолучевого осциллографа

Обычный вибратор представляет собой магнитоэлектрический гальванометр специальной конструкции. На рис.1.15 изображена упрощённая схема механической и оптической части светолучевого осциллографа.

Луч света от лампы 1 проходит через конденсорную линзу 2, диафрагму 3 и попадает на зеркальце 4 гальванометра 5. Отражённый луч, пройдя через трёхгранную призму 6, направляется частью к многогранному зеркальному барабану 7 и от него на матовый стеклянный экран 8, а частично – на фоточувствительную бумагу (или фотоплёнку) 9. Зеркальце приклеено к одновитковой петле из упругого металла, например, фосфористой бронзы. Петля подвешена на растяжках и расположена в узком межполюсном пространстве постоянного магнита, а её нижний конец закреплён неподвижно. Когда по петле пропускают электрический ток, она поворачивается вокруг вертикальной оси на угол, пропорциональный мгновенному значению тока  $i(t)$ , т. е. совершает колебания в соответствии с законом изменения тока.

При неподвижном барабане 7 (фотоплёнке 9) на экране 8 будет видна световая полоса (на проявленной фотоплёнке – чёрная). Если же барабан привести во вращение, на экране появится кривая наблюдаемого процесса – *осциллограмма*. Перемещение светового пятна вдоль экрана, пропорциональное времени, называется *развёрткой*. После подхода пятна к правому краю экрана 8 луч попадает на следующую грань вращающегося барабана 7, и пятно появляется вновь на левом краю экрана. Изображение на экране будет неподвижным, если произведение числа граней зеркального барабана на его частоту вращения будет равно или кратно частоте входного сигнала. Чтобы можно было наблюдать колебания различной частоты, частота вращения барабана должна изменяться в широких пределах. Это достигается обычно с помощью регулируемого электропривода постоянного тока. Если в составе электропривода ба-

рабана имеется синхронный серводвигатель, то при осциллографировании процессов сетевой частоты синхронизация осуществляется автоматически.

*Вибраторы* светолучевых осциллографов называют ещё гальванометрами – вставками, т.к. они не имеют собственных магнитных систем, а вставляются в отверстия общей магнитной системы. В одном осциллографе может быть от 3 таких вставок до нескольких десятков, что позволяет одновременно наблюдать и регистрировать соответствующее количество процессов. Длина рамки гальванометра составляет примерно 10...15 мм, ширина 0,3...0,4 мм, площадь зеркала – около 0,5 мм<sup>2</sup>, толщина – десятые доли миллиметра, поэтому подвижная часть гальванометра менее инерционна, чем у электромеханических самописцев. Максимальная частота регистрируемых сигналов ограничивается инерционностью гальванометров и скоростью развёртки и не превышает 30 кГц.

Амплитуда колебаний подвижной части гальванометра зависит от степени успокоения  $\beta$  и отношения  $q$  частоты тока к частоте свободных (недемпфированных) колебаний подвижной части гальванометра. Конструктивно успокоение обеспечивается либо магнитоиндукционным способом, либо подвижная часть помещается в специальную вязкую жидкость. Для того чтобы гальванометр с жидкостным успокоением не попал в переуспокоенный режим, минимальное значение внешнего сопротивления ограничивается. Собственная частота гальванометра (при  $\beta = 0$ ) колеблется в пределах от 20 Гц до 30 кГц. В справочных данных приводятся также значения статической чувствительности гальванометра, мм/мА (обычно при определённой длине светового луча: 300 мм, 1м), максимального рабочего тока в мА и некоторые другие параметры.

Недостатками светолучевых осциллографов являются малая чувствительность, низкое входное сопротивление и сравнительно узкий частотный диапазон, а также необходимость обработки фотоплёнки при оптической записи.

## **1.4.2. Электронно – лучевые осциллографы (электронные, или катодные)**

### **1.4.2.1. Назначение и классификация.**

По назначению и принципу действия осциллографы могут быть общего назначения, универсальные, скоростные, стробоскопические, запоминающие, специальные.

Моноблочные осциллографы *общего назначения* получили наиболее широкое распространение и применяются для регистрации низкочастотных и импульсных сигналов. Полоса пропускания – до 100 МГц, диапазон амплитуд входных сигналов – от единиц милливольт до сотен вольт.

*Универсальные* осциллографы – многофункциональные приборы, содержащие сменные блоки и предназначенные для регистрации гармонических и импульсных сигналов. Полоса пропускания – до сотен мегагерц, амплитуда сигналов – от десятков микровольт до сотен вольт.

*Скоростные* осциллографы предназначены для наблюдения и регистрации импульсных и периодических сигналов в полосе частот порядка гигагерц.

*Стробоскопические* осциллографы предназначены для регистрации повторяющихся сигналов частотой до нескольких мегагерц с амплитудой от единиц милливольт до нескольких вольт. Используются при проверке динамических параметров полупроводниковых приборов и импульсных схем в увеличенном масштабе времени, позволяющем соответственно увеличить полосу пропускания частотного спектра.

*Запоминающие* осциллографы предназначены для регистрации однократных и редко повторяющихся сигналов. Полоса пропускания их – до нескольких гигагерц, скорость записи до 4000 км/с, значения сигналов десятки милливольт – сотни вольт, время сохранения записи от нескольких минут (при включённом осциллографе) до нескольких суток и более (при выключённом осциллографе).

*Специальные* осциллографы предназначены для исследования телевизионных сигналов.

Электронные осциллографы имеют ряд преимуществ по сравнению со светолучевыми: высокое быстродействие, дающее возможность наблюдать высокочастотные (до  $10^3$  МГц) периодические сигналы и кратковременные (до  $10^{-10}$  с) однократные импульсы; малое потребление мощности от источника наблюдаемого сигнала (большое входное сопротивление); высокая чувствительность; широкая универсальность. Электронно – лучевые осциллографы получили своё наименование в связи с тем, что пишущим элементом здесь служит электронный луч – фокусированный пучок электронов, излучаемых особой электронно – оптической системой – «*электронной пушкой*» (ЭП). На рис.1.16 представлена функциональная схема электронного осциллографа, выполненного на основе *электронно – лучевой трубки* (ЭЛТ).

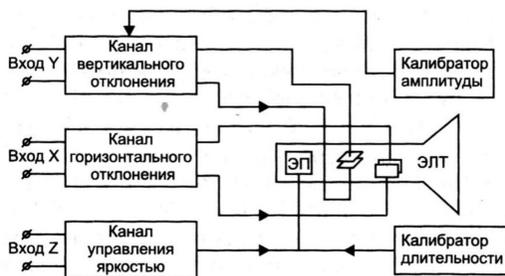


Рис.1.16. Функциональная схема универсального электронного осциллографа

#### 1.4.2.2. Основные узлы осциллографа.

*Электронно-лучевая трубка.* Простейшая однолучевая ЭЛТ представляет собой стеклянный баллон, в котором расположены электронная пушка и отклоняющая система. Внутренняя торцевая поверхность расширенного конца баллона (экран) покрыта люминофором, который светится в тех местах, куда попадают излучаемые ЭП электроны. Яркость свечения зависит от световой отдачи люминофора и энергии пучка электронов. Для регистрации быстропротекающих процессов и коротких однократных импульсов требуется увеличивать интенсивность пучка (яркость). Однако надо иметь в виду, что при попадании электронного пучка на люминофор выделяется не только свет, но и тепло, из-за чего слишком большая интенсивность пучка в течение продолжительного времени может ухудшить световую отдачу люминофора и даже прожечь его. Каждый люминофор даёт свечение определённого цвета. Человеческий глаз обладает максимальной чувствительностью к жёлто – зелёному излучению.

После прекращения электронной бомбардировки кристаллы люминофора возвращаются в исходное энергетическое состояние и свечение постепенно затухает; это явление называется послесвечением. Длительность послесвечения зависит от свойств люминофора. При наблюдении процессов с частотой менее 10 Гц используют экраны с послесвечением продолжительностью до 100 мс. Для фоторегистрации более предпочтителен люминофор с малым (0,01 с) послесвечением, а при осциллографировании медленно меняющихся и однократных процессов применяют трубки с длительным временем послесвечения экрана – от 0,1 с до нескольких секунд. Специальные запоминающие трубки позволяют сохранить изображение на время от нескольких минут до нескольких суток.

Отклоняющая система ЭЛТ состоит из двух пар пластин, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях и называемых пластинами (электродами) вертикального или горизонтального отклонения – «Y» или «X» соответственно. Сфокусированный электронный луч проходит между пластинами и отклоняется под действием электрического поля к пластине с положительным потенциалом. При отсутствии напряжения на отклоняющих пластинах пучок электронов образует на экране светящуюся точку, а если к какой – либо паре пластин приложить напряжение, то луч прочертит светящуюся прямую линию, длина которой будет пропорциональна значению напряжения. Обе пары пластин отклоняют луч во взаимно перпендикулярных направлениях, которые можно рассматривать как координатные оси, причём горизонтальному направлению X соответствует ось времени, а вертикальному Y – ось мгновенных значений входного сигнала. Отклонение  $I_T$  луча на экране трубки, вызванное напряжением  $U_T$  на отклоняющих пластинах, характеризуется чувствительностью  $S_T = I_T / U_T$ ; обычно  $S_T = 0,5 \dots 5$  мм/В. Чувствительность максимальна на низких частотах напряжения  $U_T$  и с ростом частоты падает. Верхняя граница полосы пропускания трубки определяется снижением чувствительности на 30% и составляет 108...109 МГц. В паспортах и справочниках часто приводят значение величины, обратной чувствительности и называемой коэффициентом отклонения

*Развёртка.* Контролируемое напряжение  $u(t)$  подаётся на вход Y канала вертикального отклонения. Если при этом напряжение на другой паре пластин отсутствует, то электронный луч вычертит на экране вертикальную линию. Чтобы можно было наблюдать кривую изменения напряжения  $u(t)$  во времени, необходимо «растянуть» (развернуть) изображение вдоль оси времени  $t$ . С этой целью на вход X канала горизонтального отклонения подают напряжение, линейно изменяющееся во времени. Когда это напряжение имеет минимальное значение, электронный луч находится у левого края экрана ЭЛТ. При увеличении напряжения луч перемещается по экрану слева направо (прямой ход луча) с постоянной скоростью, поскольку синхронно нарастает отклоняющее его напряжение. Как только светящееся пятно достигает правого края экрана, напряжение снижается скачком до начального значения и пятно быстро возвращается в крайнее левое положение (обратный ход); далее процесс повторяется. Для того, чтобы в продолжение обратного хода луча изображение не вычерчивалось, на это время луч гасится. Напряжение, обеспечивающее перемещение электронного луча ЭЛТ по заданной траектории, называется развёртывающим, а сам процесс – *развёрткой*. Развёртывающее напряжение  $u_p(t)$ , обеспечивающее непре-

равное периодическое перемещение луча вдоль горизонтальной оси ЭЛТ с постоянной скоростью, имеет пилообразную форму (рис.1.17).

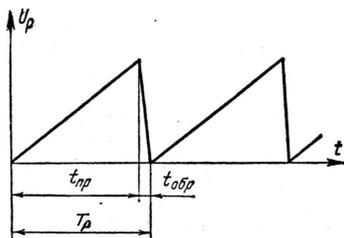


Рис.1.17. Форма напряжения линейной временно'й развёртки:  $t_{пр}$  – время прямого хода луча;  $t_{обр}$  – время обратного хода луча;  $T_p$  – период развёртывающего напряжения  $u_p$

Если продолжительность одного полного горизонтального перемещения луча (период развёртывающего напряжения  $T_p$ ) будет равна периоду  $T$  входного напряжения  $u(t)$ , т.е.  $T_p = T$ , на экране получится неподвижное изображение одного периода входного сигнала. Если же период развёртки увеличить в  $n$  раз ( $T_p = nT$ ), то неподвижная кривая на экране будет содержать  $n$  периодов, где  $n$  – целое число:  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Чтобы рационально использовать рабочую площадь экрана при наблюдении периодических процессов, можно ограничиться двумя – тремя периодами. Для получения полного периода входного напряжения время обратного хода луча  $t_{обр}$  должно быть намного меньше времени прямого хода  $t_{пр}$ , в идеализированном варианте принимается  $t_{обр} = 0$ . Получение осциллограмм посредством линейной развёртки поясняется рис.1.18.

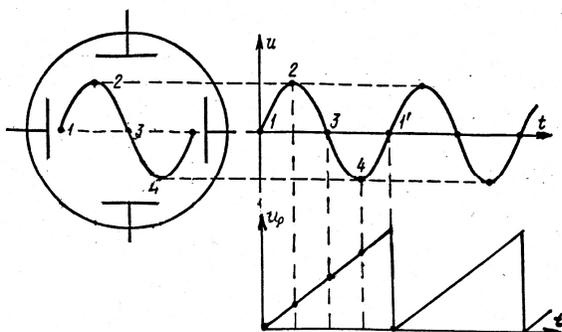


Рис.1.18. Получение осциллограммы при линейной развёртке

Линейную *автоколебательную (непрерывную)* развёртку применяют при осциллографировании непрерывных периодических процессов, а также импульсных с небольшой скажностью. Но с помощью такой развёртки трудно наблюдать непериодические сигналы и особенно – короткие импульсы, так как при этом изображение занимает лишь малую часть экрана. В этом случае применяют так наз. *ждуциую* развёртку, позволяющую получить изображение почти во всю ширину экрана. Здесь пилообразный импульс подаётся только с поступлением входного импульса. Луч ЭЛТ, совершив один цикл прямого и обратного хода, ожидает разрешения на новый цикл развёртки.

При точных измерениях временны'х интервалов, частоты сигналов, фазовых сдвигов и некоторых других, когда требуется возможно большая длина развёртки, применяются *круговая* и *спиральная* развёртки, названные так по форме траектории луча ЭЛТ. Длина круговой развёртки  $I_p \approx 3d$ , спиральной  $I_p \approx 3md$ , где  $d$  – диаметр экрана,  $m$  – число витков спирали. Такие развёртки получаются при подаче на обе пары пластин ЭЛТ синусоидальных напряжений одинаковой частоты. При произвольном сдвиге фаз между этими напряжениями получается эллиптическая развёртка, при угле  $90^\circ$  – круговая; при разных частотах формируются фигуры Лиссажу. Развёртывающее напряжение получают от встроенного генератора, внешнего источника или от контролируемого сигнала. Наиболее часто применяется линейная развёртка, создаваемая пилообразным напряжением генератора.

*Каналы осциллографа.* Канал *вертикального отклонения луча* (канал Y) содержит аттенуатор (входной делитель напряжения) и широкополосный усилитель вертикального отклонения. Основное назначение канала заключается в следующем:

- обеспечение необходимого уровня усиления (ослабления) входного сигнала, при котором изображение на экране удобно для наблюдения и измерения;
- согласование входного сопротивления осциллографа (50 или 75 Ом) с волновым сопротивлением коаксиального кабеля на входе канала;
- задержка поступления контролируемого импульса на пластины вертикального отклонения по отношению к развёртывающему напряжению.

Во всех осциллографах происходит запаздывание начала развёртки вследствие инерционности блока синхронизации, усилителя и генератора развёртки. Но если развёртывающее напряжение поступит на пластины позже, чем контролируемый импульс, начальная часть импульса не будет развёрнута на экране. Чтобы можно было наблюдать весь импульс, в канал вертикального отклонения вводят *линию задержки*, обеспечивающую поступление наблюдаемого сигнала позже начала развёртки, например, на 0,2...0,3 мкс при запаздывании развёртки на 0,1 мкс. В низкочастотных осциллографах, предназначенных для наблюдения непрерывных периодических процессов, линия задержки может отсутствовать.

Вход канала может быть *открытым* или *закрытым* (с разделительным конденсатором на входе): при открытом входе возможно прохождение как переменного, так и постоянного тока, при закрытом – только переменного. Обозначаются эти входы либо в виде узла схемы (с конденсатором или без него), либо посредством символов « $\cong$ » или «—» (открытый вход) и « $\sim$ » (закрытый вход), либо начальными буквами DC, AC/DC (открытый) и AC (закрытый) английских слов direct current (постоянный ток) и alternating current (переменный ток).

*Аттенюатором* (делителем напряжения) устанавливается допустимое значение входного напряжения и обеспечивается высокое входное сопротивление канала (порядка 1 МОм); входная ёмкость составляет десятки пикофард, для высокочастотных осциллографов – единицы пикофард. Деление входного напряжения осуществляется резистивно – ёмкостным делителем в отношениях 1 : 1; 1 : 2; ... 1 : 2000. Иногда осциллограф снабжается дополнительным выносным делителем с коэффициентом деления 1 : 10 или 1 : 100. Применение такого делителя позволяет увеличить коэффициент деления и входное сопротивление прибора и уменьшить входную ёмкость. Переключатель для выбора коэффициента деления размещается на передней панели прибора, а цифры на шкале делителя указывают значения коэффициента отклонения в см/В или см/дел.

Усилитель позволяет повысить чувствительность канала и наблюдать слабые сигналы. Коэффициент усиления усилителя падает с ростом частоты — на порядок (по напряжению) с возрастанием частоты на одну декаду. Это надо иметь в виду при выборе *полосы пропускания* частот. Осциллограф с широкой полосой пропускания принимает больше шумов, что вынуждает снижать чувствительность, и наоборот, у высокочувствительных приборов полосу пропускания приходится сужать.

На высоких частотах и особенно в импульсной технике приходится считаться также с быстродействием усилителя. Оно характеризуется откликом усилителя на ступенчатое входное воздействие, показывающим искажение идеального прямоугольного импульса при прохождении его через усилитель. Основным параметром оценки является *время нарастания* фронта импульса от 0,1 до 0,9 установившегося максимального значения. Время нарастания усилителя вертикального отклонения показывает, насколько точно будет воспроизводиться форма импульса. Искажениями можно пренебречь, если время нарастания для усилителя меньше 1/5 времени нарастания регистрируемого импульса. Установившееся значение может достигаться после нескольких затухающих колебаний около этого значения. В этом случае быстродействие характеризуется ещё *временем установления* – интервалом изменения выходного сигнала от 0,1 установившегося значения до вхождения в область, где отклонение от установившегося значения не превышает заданного, например,  $\pm 5\%$ . У скоростных осциллографов усилитель в канале вертикального отклонения отсутствует.

*Канал горизонтального отклонения луча* служит для создания развёртывающего напряжения или для передачи на вертикальные пластины сигнала, подводимого к входу X. Основным блоком канала является генератор развёртки. Для получения неподвижного изображения начало развёртки должно быть жёстко связано с определённой точкой сигнала. Такую привязку называют *синхронизацией* в непрерывном режиме развёртки и *запуском* – в ждущем режиме. Синхронизация достигается путём настройки генератора развёртки таким образом, чтобы частота её была равна или в целое число раз меньше частоты сигнала.

Синхронизация и запуск развёртки производятся специальным синхроимпульсом. При *внутренней* синхронизации синхроимпульсы вырабатываются из усиленного входного сигнала, при *внешней* – подаются от внешнего источника на специальный вход X осциллографа. Выбор того или иного режима синхронизации производится посредством переключателей.

*Канал управления яркостью* пятна на экране ЭЛТ предназначен для подсветки прямого хода луча. В ряде осциллографов имеется вход  $Z$ , соединённый с управляющим электродом ЭЛТ – модулятором  $M$ . На вход  $Z$  подаётся прямоугольный импульс, длительность которого совпадает с длительностью прямого хода луча развёртки. Задавая уровень напряжения модулятора, можно изменять (модулировать) яркость изображения на экране. Это позволяет, в частности, отмечать характерные точки на изображении, подавая импульсы на вход  $Z$  в необходимые моменты времени (например, при переходе кривой через нулевое значение, достижении амплитуды и др.), что, в свою очередь, определяет удобство и целесообразность применения осциллографа для измерений частоты и фазы электрических величин.

*Калибратор амплитуды и длительности* – генератор периодического напряжения с известными амплитудой и частотой, позволяющий контролировать и устанавливать масштаб вертикальной (коэффициент отклонения) и горизонтальной (коэффициент развёртки) осей экрана осциллографа. Калибратор выдаёт напряжение прямоугольной формы с фиксированными значениями размаха и частоты.

*Коэффициент отклонения* представляет собой отношение напряжения калиброванного сигнала к отклонению луча по вертикали, т.е. параметр, обратный чувствительности осциллографа к напряжению. У наиболее распространённых осциллографов его значение находится обычно в диапазоне от 50 мкВ/дел до 10 В/дел. Сравнивая амплитуды калиброванного и исследуемого сигналов, можно измерять напряжение последнего.

*Коэффициент развёртки (длительность развёртки)* – время, за которое электронный луч пробегает одно деление шкалы на экране ЭЛТ в горизонтальном направлении, т.е. параметр, обратный скорости перемещения луча по оси  $X$ . Среднее значение коэффициента развёртки находится в пределах 0,01 мкс/дел – 0,05 с/дел.

По периоду калибровочного импульса можно проверить или установить нормированное значение коэффициента развёртки. Модуляция яркости изображения вызывает проявление на экране ярких пятен через определённые промежутки времени. По чередованию светлых и тёмных участков (меток времени) можно определить длительность наблюдаемого сигнала.

*Многоканальные осциллографы.* В ряде случаев возникает необходимость одновременно наблюдать и регистрировать характеристики двух или нескольких электрических процессов, например, определять сдвиг фаз, сравнивать кривые входного и выходного напряжений усилителей, импульсных схем и т.п. С этой целью применяются многолучевые (преимущественно двухлучевые) и обычные однолучевые осциллографы, снабжённые специальным электронным коммутатором.

*Двухлучевой осциллограф* отличается наличием особой ЭЛТ, которая имеет два отдельных вертикальных канала, две или одну общую системы развёрток и представляет собой как бы две однолучевых трубки с общим экраном. Независимая система позволяет использовать разную скорость развёртки для двух каналов, но при этом возрастают габариты осциллографа. Калибратор амплитуды и длительности обычно выполняется общим для обоих лучей. Двух- и тем более многолучевой осциллограф является достаточно сложным и дорогим прибором.

*Двухканальный осциллограф* имеет обычную однолучевую трубку и одноканальный усилитель вертикального отклонения. Два отдельных входных устройства по-

очередно подключаются к усилителю с помощью электронного коммутатора. Как правило, сами коммутаторы входные сигналы не усиливают.

В общем случае предусматриваются четыре режима работы каналов: одноканальный, чередования (попеременного доступа), прерывания и сложения каналов. В режиме попеременного доступа коммутатор меняет каналы через один цикл горизонтальной развёртки. Если при этом длительность развёртки значительно меньше времени послесвечения люминофора, а частота переключений больше 16...20 Гц, то благодаря инерции человеческого зрения на экране будет одновременно наблюдаться изображение двух процессов. Для трубок со средним послесвечением частота переключений не должна быть меньше 50...100 Гц, иначе становится заметным поочередное мелькание осциллограмм. Этот режим непригоден для наблюдения сигналов очень низкой частоты.

При алгебраическом сложении оба канала одновременно работают на общую нагрузку.

На аналогичных принципах строятся и осциллографы с большим числом каналов (до 8). Получают распространение трёхканальные приборы, дополнительный канал которых предназначен для наблюдения сигнала внешней синхронизации.

Двухканальные осциллографы имеют ряд преимуществ перед двухлучевыми. Сравнение амплитуд двух входных напряжений двухканальным осциллографом возможно со значительно большей точностью, чем двухлучевым, так как исключаются ошибки из-за неидентичности усилителей вертикального отклонения и лучевых каналов. При временно́м сравнении двух сигналов также достигается более высокая точность, так как обе осциллограммы имеют одинаковую базу времени.

Вместе с тем двухканальным осциллографам присущи и известные недостатки:

- яркость изображения сигнала вдвое ниже по сравнению с аналогичными двухлучевыми приборами;
- ограничена возможность регистрации однократных и нестационарных процессов;
- отсутствует возможность наблюдения сигналов в двух масштабах времени.

#### ***1.4.2.3. Измерение электрических величин и характеристик.***

Измерение напряжений. При измерении амплитуды и временных параметров сигнала удобно производить отсчёт непосредственно по шкале на экране осциллографа. Шкалу предварительно калибруют по чувствительности и длительности развёртки с помощью встроенного калибратора. Измерения производят по масштабной сетке, наложенной на экран. Расстояние между крайними сторонами обычно размечается линиями на сантиметры или делениями и рисками – на миллиметры, например, на 6 делений по вертикали и 10 по горизонтали.

С выхода делителя калибратора напряжение поступает на вход канала вертикального отклонения для калибровки его чувствительности. Коэффициенты деления напряжений этого канала и калибратора изменяются одновременно общим переключателем так, что в любом его положении общий коэффициент деления остаётся неизменным. Если, например, значение последнего равно 100, а размах прямоугольного напряжения калибратора 100 В, то на вход усилителя вертикального отклонения всегда будет подводиться меандр (бесконечная последовательность импульсов прямо-

угольной формы) напряжения с размахом 1 В, что значительно упрощает и калибровку чувствительности, и собственно измерение.

Выбрав период развёртки равным половине периода меандра, можно наблюдать на экране ЭЛТ две горизонтальные линии, соответствующие нулевому и максимальному значениям импульса. Изменяя коэффициент усиления и перемещая изображение по вертикали, совмещают эти линии с границами масштабной сетки, установив тем самым номинальное значение коэффициента отклонения канала. Так, например, при размахе калибровочного напряжения 1 В и расстоянии между горизонтальными границами 6 см номинальный коэффициент отклонения канала будет  $1/6 = 0,167$  В/см. Для измерения амплитуды добиваются с помощью входного делителя (аттенуатора), чтобы размер изображения был возможно ближе к границам масштабной сетки, сохраняя при этом положение регулятора усиления вертикального канала неизменным. Фактический, расчётный коэффициент отклонения определяется с учётом установленного коэффициента деления аттенуатора: если, например, последний оказался равным  $1/2$ , то при номинальном значении  $1/6$  расчётный коэффициент отклонения будет  $1/6 : 1/2 = 1/3 = 0,333$ . Когда деление масштабной сетки оказывается меньше 1 см, размерность коэффициента отклонения указывается в В/дел, например,  $1/6 = 0,167$  В/дел при 6-ти делениях по 0,6 см каждое (расстояние 3,6 см).

Перед измерением необходимо сбалансировать усилитель вертикального отклонения, а именно, установить такой режим работы усилителя, при котором достигается устойчивость изображения на экране ЭЛТ. Балансировка производится в следующем порядке:

- включают осциллограф в сеть и прогревают его;
- ручкой смещения луча по вертикали устанавливают линию развёртки по горизонтали, проходящей через центр экрана;
- с помощью ручек регуляторов баланса и усиления добиваются, чтобы положение линии развёртки не изменялось (не смещалось по вертикали) при изменении положения ручек переключателя чувствительности или плавной регулировки усиления. Балансировка усилителя должна периодически проверяться и в процессе эксплуатации.

Выполнив калибровку и балансировку усилителя вертикального отклонения, подают на вход контролируемый сигнал и измеряют его размах по вертикали. Амплитуда сигнала определяется как произведение измеренного значения на чувствительность, установленную по шкале «В/см», «В/см» (или «В/дел», «В/дел») переключателя входного делителя. Пусть, например, измеренный размах изображения составляет 3,4 см, а переключатель чувствительности установлен на отметку 5 В/см, тогда амплитуда сигнала будет  $3,4 \times 5 = 17$  В.

Большое входное сопротивление электронного осциллографа позволяет измерять напряжение источников с высоким внутренним сопротивлением. Возможность осциллографирования быстропеременных процессов ограничивается, в основном, собственной ёмкостью отклоняющих пластин и подводящих проводов или входной ёмкостью усилителя. Погрешность измерения составляет обычно 5...10% из-за нестабильности коэффициента усиления входного усилителя и нелинейности его амплитудной характеристики, неточности калибровки чувствительности, влияния размеров пятна на экране ЭЛТ.

Измерение времени. Временные параметры электрических сигналов также измеряются методом непосредственного отсчёта, который производится по оси времени с помощью калиброванной развёртки. Градуировочная характеристика оси времени определяется коэффициентом развёртки в единицах ВРЕМЯ/см или ВРЕМЯ/дел (мкс/см, мс/дел). Различные значения этого параметра задаются фиксированным положением переключателя длительности развёртки. Длительность развёртки регулируют так, чтобы как можно больше растянуть изображение в горизонтальном направлении. Для определения *длительности* сигнала измеряют по масштабной сетке длину наблюдаемого участка изображения и умножают её на коэффициент развёртки. Так, например, если на экране участок кривой занимает 2,4 деления по горизонтали, а переключатель установлен в положении 5 мс/дел, то длительность будет  $2,4 \times 5 = 12$  мс.

С помощью калиброванной развёртки нетрудно измерить и *частоту* периодических колебаний. С этой целью измеряют период колебаний  $T$  и вычисляют затем частоту по формуле  $f = 1/T$ .

При любой длительности развёртки число периодов сигнала на экране зависит от его частоты. Так, если длина шкалы на экране составляет 10 см, коэффициент развёртки 0,1 мс, то длительность её будет  $0,1 \times 10 = 1$  мс, частота 1 кГц и, следовательно, вдоль всей шкалы разместится 5 периодов сигнала частотой 5 кГц, 4 периода – 4 кГц и т.д. Чтобы в таких случаях рассмотреть отдельные участки осциллограммы более подробно, достаточно увеличить частоту развёртки.

Пример. Получена осциллограмма с 5 – ю периодами колебаний на длине 8,25 см при коэффициенте развёртки 0,2 мс/см. Это расстояние луч проходит за время  $8,25 \times 0,2 = 1,65$  мс, а расстояние, соответствующее одному периоду, за время  $1,65 : 5 = 0,33$  мс и, следовательно, частота равна  $1/0,33 = 3$  кГц. Тот же результат получился бы для одинаковых цифровых данных приведённого примера при градуировке шкалы в делениях.

Измерение фазы. *Фазный сдвиг* между двумя сигналами измеряют как интервал времени  $t$  при скорости развёртки, обеспечивающей удобство отсчёта (рис.1.19). Соответствующее значение фазного сдвига в градусах эл. рассчитывают как  $\varphi = 360 t/T$ .

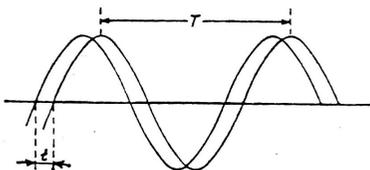


Рис.1.19. Измерение фазного сдвига между периодическими сигналами

В более совершенных приборах вместо калибраторов применяются встроенные цифровые вольтметры, измерители интервалов времени и частоты. Результаты измерений высвечиваются либо на цифровом дисплее, либо на экране ЭЛТ в буквенно – цифровой форме. Для измерения длительности импульса, форма которого близка к прямоугольной, его подают на вход Y осциллографа, а линейно изменяющееся на-

напряжение развёртки  $u_p(t)$  с помощью компараторов сравнивается с заранее заданными напряжениями постоянного тока  $U_1$  и  $U_2$  (рис.1.20,а). Выходные импульсы компараторов, возникающие в момент сравнения, поступают в формирователь импульсов меток  $U_{\text{фм}}$  (рис.1.20,б) и далее – на управляющий электрод ЭЛТ. В моменты поступления импульсов яркость свечения увеличивается и на изображении входного импульса возникают яркие метки, между которыми и измеряется интервал времени  $\Delta t$  (рис.1.20,б,в). В данном примере значения напряжений  $U_1$  и  $U_2$  выбраны так, чтобы метки оказались на уровне 0,5 амплитуды импульса. При измерении длительности фронта импульса эти значения выбирают обычно соответствующими уровням 0,1 и 0,9 амплитуды. Аналогичным способом можно измерить и амплитуду напряжения, если это напряжение запомнить и подать на один из компараторов, а на другом установить 0: тогда интервал времени  $\Delta t$  будет пропорционален значению амплитуды.

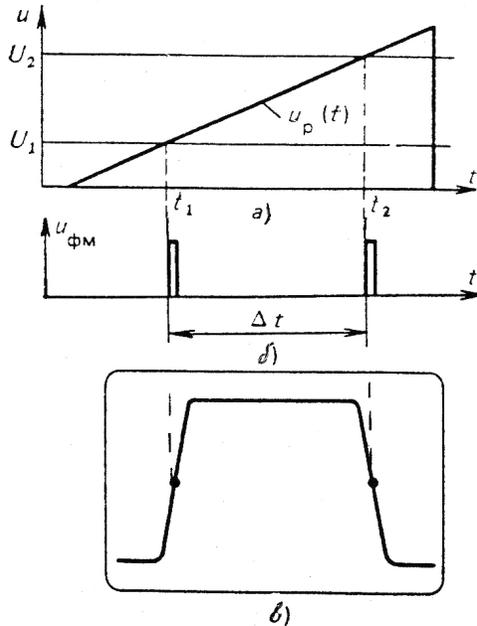


Рис.1.20. Измерение длительности импульса с помощью яркостных меток

Частоту и фазу можно измерить также с помощью фигур Лиссажу, но это сложнее, менее наглядно и в практике наладочных работ применяется достаточно редко.

**Снятие нелинейных характеристик.** С помощью осциллографа удобно наблюдать и регистрировать вольт–амперные характеристики нелинейных элементов. В качестве примера на рис.1.21 приведена схема измерения выходных коллекторных характеристик транзистора  $i_k(U_k)$ .

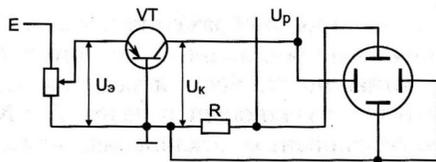


Рис.1.21. Схема измерения вольт-амперных характеристик транзистора

На эмиттер транзистора VT подаётся отрицательное напряжение  $U_3$ , на коллектор – периодическое пилообразное напряжение развёртки осциллографа  $U_p$ . Подав напряжение  $U_p$  на вход X, а падение напряжения от коллекторного тока  $R I_k$  – с резистора R на вход Y, можно наблюдать на экране кривую вольт-амперной характеристики транзистора при данном значении напряжения  $U_3 = \text{const}$ , а при изменении его значений – семейство коллекторных характеристик прибора. По аналогичной схеме снимается вольт-амперная характеристика диода.

На рис.1.22 показана принципиальная схема осциллографирования гистерезисных кривых ферромагнитного материала. На образец в форме тороида наложены две обмотки  $w_1$  и  $w_2$ . Через обмотку  $w_1$  пропускается ток  $I_1$ , обмотка  $w_2$  нагружена на интегрирующую цепь RC. Падение напряжения  $I_1 R_0$ , пропорциональное напряжённости H магнитного поля образца, подаётся на вход X осциллографа, а на вход Y – напряжение с выхода интегрирующей цепи. Как известно, ЭДС трансформатора пропорциональна производной магнитной индукции и, следовательно, с некоторыми допущениями можно принять, что напряжение на выходе интегрирующей цепи будет пропорционально значению магнитной индукции B. Таким образом, электронный луч будет периодически вычерчивать на экране ЭЛТ изображение зависимости B(H) в виде петли гистерезиса.

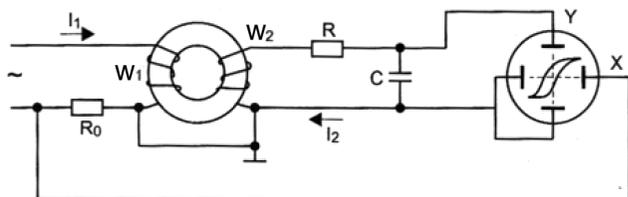


Рис.1.22. Схема осциллографирования петли гистерезиса

Электронно – лучевой осциллограф можно также использовать для определения составляющих комплексного сопротивления, как анализатор спектра частот и др., но при наладке прибегают к этим способам крайне редко.

**Погрешности измерений.** *Статическая погрешность.* В конечном счете измерение как амплитудных, так и временных параметров сводится к измерению длин отрезков прямых. А поскольку искажения линейных параметров изображения на экране ЭЛТ линейно зависят от значения входной величины, от этого последнего зависит также и абсолютная погрешность измерения. Пределы допустимых относительных

погрешностей каналов  $Y$  и  $X$ , называемые погрешностями коэффициентов отклонения, характеризуют статическую (или низкочастотную) точность воспроизведения сигналов, например,  $\delta_y = \pm 3\%$  и  $\delta_x = \pm 2\%$ .

*Динамическая погрешность.* Динамическая погрешность возникает при осциллографировании быстро изменяющихся или высокочастотных сигналов. К основным характеристикам осциллографа, определяющим динамическую погрешность, относятся: амплитудно-частотная характеристика и значение верхней границы полосы пропускания частот по каналам  $X$  и  $Y$ ; время нарастания и время установления.

*Погрешность взаимодействия.* Погрешность взаимодействия осциллографа с источником сигнала определяется соотношением выходного сопротивления источника и входного сопротивления измерительной цепи, в которую входят собственно прибор и соединительный кабель. Погрешность тем меньше, чем больше входное сопротивление этой цепи.

Соединительные кабели делятся на активные и пассивные. Активные кабели содержат усилитель, который позволяет резко повысить их сопротивление. Пассивные кабели могут быть без деления (уменьшения) сигнала и с делением (1: 10, 1: 100).

Пассивный кабель без деления сигнала представляет собой отрезок экранированного коаксиального кабеля с разъемом для подключения к осциллографу на одном конце и шупами – на другом. Сопротивление такого кабеля обусловлено распределенной электрической емкостью, составляющей примерно 50...100 пФ/м. Следовательно, общая входная емкость измерительной цепи  $C_{вх}$  складывается из емкостей кабеля  $C_k$  и усилителя  $C_y$  прибора, а общее входное сопротивление  $Z_{вх1}$  обусловлено параллельным соединением емкости  $C_{вх}$  (точнее, соответствующего емкостного сопротивления) и активного сопротивления входного усилителя  $R_y$ . Чем меньше будет емкость  $C_{вх}$  и больше сопротивление  $R_y$ , тем больше будет значение  $Z_{вх1}$ , меньше погрешность взаимодействия и шире полоса пропускания частот.

Пассивные кабели с делением сигнала содержат дополнительную внутреннюю активно – емкостную цепь (резистор и конденсатор) с комплексным сопротивлением  $Z_{вн}$ , которое включается последовательно с сопротивлением  $Z_{вх1}$ . Оба эти сопротивления образуют плечи делителя с общим сопротивлением  $Z_{вх2} > Z_{вх1}$ . Такое соединение обеспечивает увеличение входного сопротивления, уменьшение входной емкости и расширение полосы частот. В итоге улучшаются динамические характеристики, но снижается чувствительность измерения. Погрешность взаимодействия на постоянном токе (при низкой частоте) пропорциональна отношению сопротивления  $R_{и}$  источника сигнала к входному сопротивлению  $R_{вх}$  измерительной цепи, на переменном – добавляется составляющая, пропорциональная произведению  $R_{и}^2 C_{вх}^2$ .

*Погрешность отсчёта (субъективная)* обусловлена интерполяцией и параллаксом. Каждую из составляющих можно оценить в зависимости от цены деления  $\alpha$  шкалы или сетки осциллографа как  $0,1\alpha$ . Если сетка нанесена и на внешней, и на внутренней поверхностях защитного стекла, погрешностью от параллакса можно пренебречь. В режиме цифрового отсчёта погрешность считывания отсутствует. При расчёте предельной общей статической погрешности инструментальную и субъективную составляющие суммируют.

### 1.4.3. Цифровые осциллографы.

#### 1.4.3.1. Общие сведения.

В современной практике осциллографирования предпочтение отдаётся цифровым регистраторам. По конструкции они имеют много общего с цифровыми измерительными приборами, но, предназначенные для регистрации переменных параметров, отличаются более высокими показателями быстродействия и памяти, а также большей точностью измерения параметров сигнала по сравнению с электронными осциллографами. Последнее объясняется тем, что измерение производится непосредственно на входе цифрового осциллографа, тогда как при прохождении сигнала через канал вертикального отклонения электронного осциллографа вносится существенная ошибка. Информация, хранящаяся в памяти осциллографа, может быть выведена на печать. Сочетание цифрового осциллографа с микропроцессором позволяет определять действующее или среднее значение сигнала и даже отображать на экране преобразование Фурье (представление несинусоидального периодического сигнала в виде суммы гармонических составляющих, или гармоник, – синусоидальных сигналов основной частоты и кратных ей; выполняется при помощи специального алгоритма цифровой обработки сигнала, называемого «быстрым преобразованием Фурье»).

Поступающий на вход аналоговый сигнал обрабатывается (усиливается или ослабляется, фильтруется и т.п.), затем производится его квантование и дискретизация. Под термином *дискретизация* обыкновенно понимают замену текущего времени отдельными его значениями, а под *квантованием* – замену бесконечного числа значений непрерывного сигнала конечным числом его мгновенных значений (цифровых кодов), соответствующих выбранным при дискретизации моментам времени. Такая замена называется *аналого – цифровым преобразованием* (АЦП). Результаты АЦП хранятся в запоминающем устройстве.

Наиболее часто применяется равномерная дискретизация, при которой интервал времени между соседними отсчётами (шаг дискретизации) остаётся постоянным в продолжение интервала регистрации. Значение шага  $T_d$ , или частоты дискретизации  $F_d = 1/T_d$ , может задаваться пользователем. Если, например, задан шаг дискретизации  $T_d = 50$  мкс, то частота должна быть  $F_d = 20$  кГц. Чем меньше шаг, т.е. чем больше частота дискретизации, тем точнее будет воспроизводиться непрерывный сигнал посредством АЦП, но при этом быстрее будет заполняться память.

Чтобы не повышать чрезмерно частоту, прибегают к способу так наз. эквивалентной дискретизации, сущность которого заключается в следующем. Если, не изменяя частоты, сместить точки дискретизации (или выборки) на некоторый промежуток времени, например, на полшага, то число таких точек удвоится, а если выполнить три прохода развёртки, то это число увеличится в три раза и т.д. Обычно выполняется от 10 до 40 проходов. Для восстановления непрерывного сигнала в графическом виде часто применяется точечный способ, дающий удовлетворительное изображение при разрешающей способности экрана 2 точки/мм и выше.

Интервал регистрации начинается с запуска. Внутренний запуск может производиться по заданному моменту времени, по определённым параметрам входного сигнала или скорости их изменения, а также по сочетанию этих признаков, например: время 08:00, амплитуда не ниже 150 В, скорость изменения более 0,1 В/с. Окончание интервала также может быть задано по времени (или/и другим условиям), но в этом

случае необходимо убедиться, что память не будет переполнена. Максимальная длительность интервала регистрации определяется соотношением  $T_p = T_d V_m$ , где  $V_m$  – максимальный объём памяти. Если, к примеру, выбран шаг дискретизации  $T_d = 1$  мс при объёме памяти  $V_m = 1000$  слов, то интервал регистрации не должен быть больше 1 с, иначе дальнейшая информация (свыше 1000 слов) не будет зарегистрирована.

Специфической особенностью цифровых осциллографов, в отличие от аналоговых, является возможность предзапуска и послезапуска. Режим предзапуска позволяет записать входной сигнал в период, непосредственно предшествующий моменту запуска, и выявить, например, причины возникновения аварийной ситуации. Полученные цифровые данные о сигнале хранятся в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ). Глубина (длительность) предзапуска задаётся либо в единицах времени, либо в процентах объёма ОЗУ. В режиме послезапуска интересующая наблюдателя часть сигнала записывается спустя некоторое время после момента запуска, что позволяет избежать загрузки памяти излишними данными.

Помимо графического изображения, можно вызвать на экран числовые характеристики сигнала, измерить период гармонического сигнала, амплитуду и длительность фронта импульса и др. Точность таких измерений, определяемая работой канала АЦП, довольно высока: предельные относительные погрешности составляют обычно (0,1...1,0)%. Обеспечивается также возможность растяжки изображения сигнала по одной или обоим осям, что позволяет рассмотреть интересующий оператора участок осциллограммы в увеличенном масштабе.

В ряде случаев требуется получать данные обработки осциллограмм одновременно с их получением – в так называемом режиме реального времени (on-line, онлайн), например в случае управления реальными процессами. В практике осциллографирования чаще всего отсутствует необходимость срочной обработки входных данных, и тогда она проводится в режиме нереального, относительного времени.

Среди разного рода цифровых регистраторов следует отметить ещё так называемые мини-логгеры – миниатюрные, сравнительно простые и дешёвые, но тем не менее в большинстве случаев пригодные для целей электрических измерений. Накопленные в них цифровые данные по окончании измерений передаются в компьютер для наблюдения и обработки.

#### ***1.4.3.2. Быстродействующий самописец НЮКИ (Япония).***

Краткое описание. Самописец выполняет четыре функции измерения и в зависимости от модели предусматривает два вида входа – аналоговый и логический. Функции осциллографа с памятью и высокоскоростного самописца позволяют точно измерять параметры различных быстропеременных процессов, в частности, переходных процессов. Функции записи в режиме реального времени и непрерывной записи в координатных осях ХУ (с запоминанием) позволяют вести регистрацию в режиме реального времени.

Для каждого канала можно выбрать один из трёх способов запуска: внутренний, внешний или ручной. Предусмотрена также задержка по времени – всего четыре варианта запуска. С помощью фильтра логического входного сигнала можно устанавливать условия запуска для каждого канала. Аналоговые входы изолированы и защищены, так что каждый входной сигнал может быть привязан к независимому

нулевому потенциалу. Функция FFT («быстрое преобразование Фурье») позволяет получить частотный спектр сигнала.

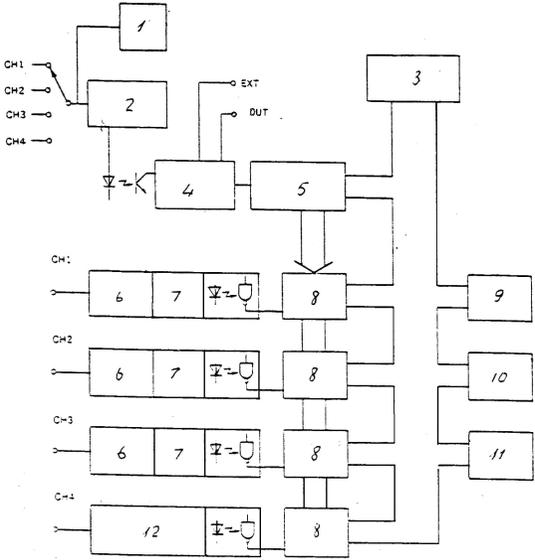


Рис.1.23. Блок-схема самописца НИОК

Блок-схема самописца показана на рис.1.23. Входной сигнал поступает с одного из каналов CH1...CH3 на измерительное устройство 1 и аналоговый запуск 2. Всей работой системы управляет микропроцессор 3. Пусковой сигнал через оптронную пару поступает на схему запуска цифровых цепей 4 и далее в блок управления памятью 5. Каждый канал содержит входной усилитель 6 и высокоскоростной аналого-цифровой преобразователь 7. Дискретная информация через оптронную пару передаётся в оперативную память 8; для каждого канала используется отдельный источник питания, и потому вход самописца электрически изолирован от запоминающего устройства. Данные, хранящиеся в памяти, могут быть выданы на устройства печати 9 или индикации 10 по командам с операционной панели 11. Когда используется внутренний запуск, входной сигнал сравнивается с опорным напряжением с помощью компаратора 12.

При осуществлении аналого-цифрового преобразования важно правильно выбрать шаг дискретизации, иначе при восстановлении непрерывного сигнала может быть допущена существенная ошибка. Так, если сигнал имеет синусоидальную форму, шаг дискретизации должен быть значительно меньше, чем период сигнала. На рис.1.24 показан случай, когда шаг дискретизации  $T_d$  превышает период изменения реального сигнала 1, в результате чего после цифро-аналогового преобразования («восстановления») получается синусоидальный сигнал 2 с периодом в пять (!) раз больше реального.

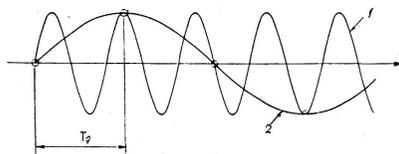


Рис.1.24. Пример ошибочного представления непрерывного сигнала

Чтобы при воспроизведении синусоидального сигнала не допустить его искажения и не пропустить амплитудное значение, выполняется 25 шагов за период. Возможные варианты запуска и записи с задержкой показаны на рис.1.25.

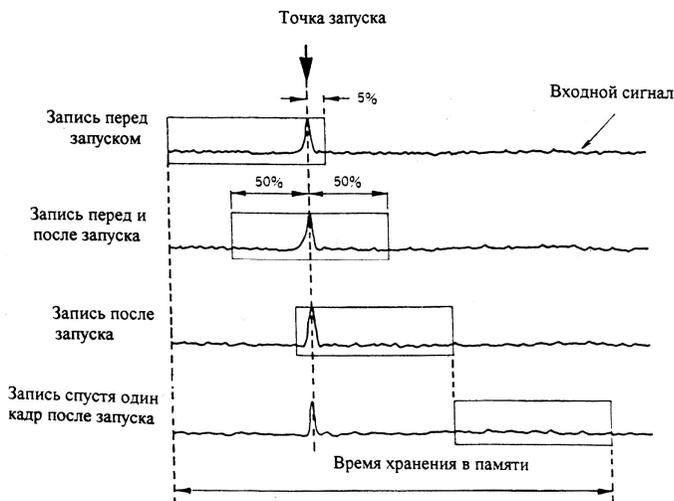


Рис.1.25. Задержка по времени при запуске и записи сигнала.

Предусматривается и самодиагностика прибора. Память ПЗУ и ОЗУ проверяется включением питания при нажатой кнопке Стоп. Результат проверки индицируется светодиодами. Имеется отдельная кнопка проверки светодиодов и памяти: если она нажата, то при включении питания все индикаторы загораются один за другим, после чего проверяются ПЗУ и ОЗУ.

Когда ни одна кнопка не нажата, то при подаче питания проверяется сохранение установленных параметров. В случае неисправности диоды несколько раз мигнут, а затем самописец перейдет в режим ожидания.

Основные технические данные.

– Функции: запись в реальном времени; высокоскоростная запись с памятью; запись в осях ХУ (фигуры Лиссажу) для быстропеременных процессов и высокоскоростная запись длительно протекающих процессов; анализатор FFT.

Число каналов ..... до 4 аналоговых и до 16 логических;  
Потребляемая мощность от сети ..... 30 Вт (в нормальном режиме).  
Пределы измерений ..... от 10 мВ/дел до 5 В/дел;  
Частота ..... от 0 до 100 кГц;  
Входное сопротивление ..... 1 МОм;  
Разрешающая способность по оси времени ..... 1/50 дел.;  
Частота дискретизации ..... от 2,5 до 10 кГц.  
Запись с памятью  
Разрешающая способность по оси времени ..... от 10 мкс до 500 мкс;  
Частота дискретизации ..... от 250 кГц до 1 Гц (устанавливается автоматически в зависимости от предела шкалы времени).

Данные сохраняются в памяти даже после исчезновения питания, но ввести их вновь можно только после восстановления питания.

Пример работы самописца с памятью. Измерение напряжения срабатывания реле и времени замыкания контактов.

Время/дел – 0,5 мс/дел;

Кадр – 40 дел;

Источник запуска – внутренний;

Задержка записи – до и после запуска;

Фронт запуска – по спадающему фронту;

Уровень запуска – порядка 50%;

Масштаб измерений – 2 В/дел;

Пуск – нажать «старт» и ожидать сигнала запуска; когда реле обесточится и контакты сработают, запускается запись;

Останов – нажать «стоп» для остановки записи.

При выполнении этих операций могут быть измерены напряжение, приложенное к реле, и время срабатывания контактов. При измерении времени отключения подсчитывается число делений между точками изменения двух сигналов (отключение напряжения и размыкание контактов) и определяется интервал времени из соотношения:

Число делений  $\times$  время/дел = время срабатывания.

#### **1.4.3.3. Промышленный осциллограф Fluke 123/124.**

Этот портативный цифровой осциллограф (рис.1.26) лишь ненамного превышает по габаритам и массе обычный цифровой мультиметр и особенно удобен для оперативных целей при производстве наладочных работ, не уступая при этом по своим возможностям стационарным регистрирующим приборам. Его габариты 232 x 115 x 50 мм, масса 1,2 кг (с блоком аккумуляторов); сравнительно небольшие размеры экрана (72 x 72 мм) компенсируются тем, что изображение можно «растягивать», выбирая наиболее интересные для пользователя фрагменты осциллограммы. Питание – от сети переменного тока (через адаптер) или от внутреннего источника – блока аккумуляторов; потребляемая мощность – около 5 Вт.

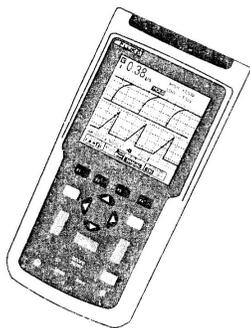


Рис.1.26. Общий вид цифрового осциллографа Fluke 123/124

Основные технические данные. Осциллограф с двумя входами.

Вертикальная ось

Частота .....от 0 (постоянный ток) до 40 МГц

Входное сопротивление, без датчиков.... 1 МОм

Чувствительность ..... от 5 мВ/дел до 500 В/дел

Горизонтальная ось

Режимы работы: обычный, однократная регистрация,  
медленная развертка

Масштаб: Однократная регистрация ... от 1мкс до 5 с на дел.

Медленная развертка ..... от 1 с до 60 с на дел.

Частота дискретизации:

эквивалентная..... до 1,25 ГГц/с

в реальном масштабе времени... до 25 МГц/с

Чувствительность,

при частоте: до 5 МГц ..... 0,5 дел. или 0,5/5 мВ

(Fluke 123/124) 25 МГц ..... 1,5 дел.

40 МГц ..... 4/1,5 дел.

Измеритель с двумя входами

На экране должно отображаться больше одного периода осциллограммы.

Вход А, В

Напряжение постоянного тока

Пределы измерений .....от 0,5 до 1250 В

Частота ..... от 1 Гц до 50(70) МГц

Вход А

Сопротивление постоянному току

Пределы измерений ..... от 0,5 Ом до 30 МОм

Проверка диодов

Измерение ёмкости

Пределы измерений ..... от 50 нФ до 500 мкФ

### Основные особенности прибора

Экран состоит из трёх областей: верхняя – показания, средняя – осциллограммы, нижняя – меню. Перемещение по пунктам меню осуществляется с помощью клавиш.

В верхней части прибора расположены измерительные разъёмы с тремя входных гнездами А, В и СОМ. Гнездо А можно использовать для измерений одиночного входного сигнала. Гнездо В используется совместно с гнездом А для измерений двух разных сигналов. Общее гнездо СОМ используется для заземления, при измерении сопротивления или ёмкости и др.

Настройка изображения (положение осциллограммы, масштаб по осям напряжения и времени, параметры запуска развёртки) может производиться вручную или автоматически. При нажатии клавиши AUTO включается автоматический режим, при повторном нажатии осуществляется возврат к ручному режиму работы. В нижней строке экрана отображается масштаб по осям напряжения и времени для обоих входов, а также информация о параметрах запуска развёртки. При работе в автоматическом режиме можно изменить масштаб вручную.

Форма кривой входного сигнала часто подвергается искажениям под действием помех, шумов. Для подавления шумов без уменьшения полосы пропускания служит режим сглаживания осциллограммы. С этой целью во входном меню открывается подменю опций экрана и выделяется пункт SMOOTH (сглаживание). Если выделить пункт ENVELOPE, на экране можно будет увидеть огибающие осциллограммы. Эти кривые дают представление об истинной форме сигнала и позволяют отслеживать изменение его параметров в течение длительных промежутков времени.

В режиме построения графика численных значений может отображаться минимальное, максимальное и усредненное показание. При отображении усреднённого показания отметка даты и времени непрерывно обновляется.

Регистрация осциллограммы. Однократная регистрация осциллограммы позволяет получить информацию об отдельных событиях. При этом содержимое экрана обновляется один раз. Запуск развёртки и завершение однократной регистрации сопровождается появлением соответствующих надписей в нижней части экрана.

Режим медленной регистрации обеспечивает запись низкочастотных сигналов в течение длительного периода времени. После запуска развёртки осциллограмма будет перемещаться по экрану справа налево, как на обычном диаграммном самописце. Во время записи измерения не производятся.

В режиме сопряжения по переменному току отслеживают слабый сигнал переменного тока, наложенный на сигнал постоянного тока.

Сохранение и вызов настройки и экрана. Содержимое экрана, а также параметры настройки прибора можно сохранить или вызвать из памяти. В каждой ячейке памяти можно сохранить текущее содержимое одного экрана и соответствующую настройку. После выполнения необходимых команд прибор возвращается в обычный режим регистрации сигналов. При вызове из памяти на экране появится сохранённая в ячейке осциллограмма с настройкой. С этого момента можно анализировать осциллограмму или распечатывать содержимое экрана. Можно удалить из памяти содержимое всех сохранённых экранов или только одного экрана с соответствующей настройкой.

Проведение измерений с помощью курсоров. В модификации 124 имеются курсоры, позволяющие снимать точные численные показания как с текущей, так и с сохранённой осциллограмм. С целью измерения амплитуды, максимального и мини-

мального значений, а также выбросов сигнала на экран вызываются два курсора в виде горизонтальных линий. Выделяют верхний курсор и перемещают его в требуемое положение, затем так же устанавливают нижний курсор в другое положение. Тогда на экране появятся цифры, отображающие напряжение на уровне каждого курсора по отношению к нулевой отметке, например, +3 В и – 1 В, и разность этих напряжений, т.е. 4 В.

Для измерения временных интервалов на экран вызывают два вертикальных курсора, выделяют их и перемещают в требуемые положения. На экране точки пересечения курсоров с осциллограммой отмечаются маркерами и высвечиваются цифры, отражающие разницу во времени между курсорами и разность напряжений между маркерами. Если между курсорами заключен ровно один период сигнала, то отображается также частота сигнала.

При измерении времени нарастания сигнала используются два горизонтальных курсора, жёстко связанных с маркерами. Когда верхний курсор находится на уровне 100% высоты осциллограммы, маркер будет находиться на высоте 90%. Нижний курсор перемещают на нулевой уровень сигнала, и тогда маркер будет находиться на высоте 10%. Теперь на экране будет отображено время нарастания сигнала от уровня 10% до 90% высоты осциллограммы, а также напряжение на уровне каждого курсора по отношению к нулевой отметке. В примере на рис.1.27 показаны результаты измерения этих параметров: верхний уровень напряжения (HIGH) +1,53 В, нижний (LOW) –1,5 В, время нарастания 0,38 мкс при масштабах напряжения 500 мВ/дел и времени 500 нс/дел.

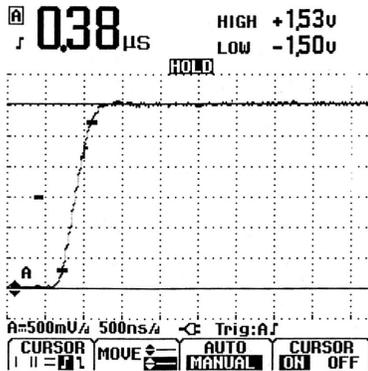


Рис.1.27. Вид экрана осциллографа Fluke при измерении напряжения сигнала и времени его нарастания

Для измерений в цепях с высоким внутренним сопротивлением в комплект Fluke 124 введён датчик с ослаблением сигналов 10:1, создающий значительно меньшую нагрузку на цепь, чем экранированный измерительный провод.

Чтобы получить печатную копию текущего изображения на экране, следует использовать кабели с адаптером для подключения последовательного или параллельного принтера к оптическому порту прибора.

## **1.5. Организация измерений.**

### **1.5.1. Подготовка работ.**

Каждый вид измерений требует надлежащей подготовки как инструментальной базы, так и наладочного персонала. Проведение измерений персоналом, не имеющим достаточной подготовки и опыта работы с измерительными приборами, может привести к выходу их из строя или неправильным результатам.

Приступая к работе, необходимо знать рабочие значения измеряемой величины и возможный диапазон их изменения, а также выбрать наиболее рациональный способ и схему измерения. При этом нередко возникает противоречие между техническими требованиями и трудоемкостью их выполнения, требующее компромиссного решения. Так, например, сложность измерения высокого напряжения испытательной установки вынуждает в большинстве случаев производить измерение на стороне низшего напряжения повышающего трансформатора, что вносит дополнительную погрешность из-за отклонения коэффициента трансформации от номинального значения. После выбора определенного способа измерения следует составить схему включения приборов, вспомогательных устройств и произвести приблизительный расчет их параметров, например, сопротивления и мощности резисторов делителей напряжения.

Перед измерением следует четко установить, какие требования предъявляются к точности результатов. Так, измерение сопротивления таких элементов, как шунты, секции обмоток электрических машин и трансформаторов должно производиться с высокой точностью, тогда как к точности измерения сопротивления изоляции особых требований не предъявляется. Общее правило: измерять возможно точнее, но не более, чем это необходимо. Например, из имеющихся вольтметров классов 0,2; 2,5 и 4 для измерения напряжения сети в большинстве случаев можно выбрать прибор класса 2,5. Если допускается погрешность 5 или 10%, нет необходимости выбирать прибор класса 0,5.

При выборе измерительных приборов по классу точности полезно иметь в виду следующее:

а) класс точности прибора должен быть по крайней мере на ступень выше, чем допускаемая погрешность: если, например, допускается погрешность 2,5%, то выбирают прибор не хуже класса 1,5;

б) класс точности обозначает только основную погрешность и потому не является непосредственным или единственным показателем точности измерений: она зависит и от ряда других условий, которые вносят дополнительную погрешность и которые надо учитывать;

в) поскольку класс точности определяется отношением абсолютной погрешности к верхнему пределу измерений, меньшая относительная погрешность обеспечивается при измерении тех значений, которые ближе к этому пределу. Так, для аналогового вольтметра со шкалой 0 – 100 В, класса точности 1,5 предельная абсолютная погрешность равна 1,5 В и, следовательно, основная относительная по-

грешность может достигать при измерении, например, напряжения 25 или 75 В соответственно 6 или 2%.

Разрешается использовать только поверенные средства измерений с действующим сроком поверки. Поверка производится специализированными лабораториями, подконтрольными Федеральному агентству по техническому регулированию и метрологии.

### **1.5.2. Выполнение измерений.**

Непосредственно перед началом работ следует проверить схему включения измерительных приборов. Если предельные значения измеряемых величин заранее не известны, приборы устанавливают на наименьшую чувствительность (на высший предел).

В случае разброса показаний, в частности, при наличии трения в опорах подвижной части стрелочного прибора, фиксируют среднее из двух показаний: при увеличении и при уменьшении измеряемой величины. Аналогично, при уравнивании измерительных мостов, особенно когда минимум показаний индикатора слабо выражен, рекомендуется подходить к состоянию равновесия с обеих сторон.

Когда снимается функциональная зависимость (например, вольт-амперная характеристика трансформатора тока), целесообразно сначала нанести полученные значения на график. Это дает возможность сразу обнаружить грубые ошибки и погрешности, не пропустить характерные участки кривой (где расположены, например, экстремумы, точки перегиба) и при необходимости увеличить число контрольных точек в них. Затем могут быть выбраны нужные точки для занесения в таблицу протокола или для последующих расчетов. Если кривая имеет монотонный характер, бывает достаточно зафиксировать 5 – 7 точек, для прямой – еще меньше. Масштаб графика принимают с пересчетными коэффициентами 2 или 5 или кратными 10. При очень широком диапазоне изменения величины применяют также логарифмический или полулогарифмический масштаб, т.е. по обеим осям координат или по одной из них откладывают логарифмы значений данной величины в принятом диапазоне.

### **1.5.3. Эксплуатация средств измерения.**

Измерительные приборы, особенно стрелочные, чрезвычайно подвержены опасности повреждения при ударах и сотрясениях, и тем больше, чем выше их чувствительность и точность. Если вредные механические воздействия возможны на рабочем месте, то приборы должны быть установлены на амортизирующей прокладке. Рабочая поверхность должна быть чистой, без следов влаги, масла, эмульсии и т.п.; должна быть устранена возможность скольжения или падения приборов.

При транспортировании подвижная часть измерительного прибора должна быть зафиксирована с помощью специального механического устройства (арретира), если оно предусмотрено конструкцией прибора, и освобождена только при вводе его в эксплуатацию. Для демпфирования подвижной системы чувствительных магнитоэлектрических приборов зажимы их замыкаются накоротко. Прибор с несколькими пределами измерения сначала включают на самый высокий предел. Меньший предел можно ввести сразу лишь в том случае, если значение измеряемой величины заведомо не может его превысить (например, предел 500 В при измерении напряжения в сети 380/220 В).

Универсальные приборы при хранении следует переключить на самый высокий предел измерения постоянного напряжения, а при транспортировке – на наибольший предел измерения постоянного тока. При длительном хранении приборов с автономным источником питания следует удалить батарейки, чтобы избежать повреждения схемы вытекающим из них электролитом.

Перед использованием новых приборов необходимо внимательно ознакомиться с инструкцией по их применению и указаниями мер безопасности, которые следует безусловно соблюдать.

Рекомендуется критически оценивать результаты измерения, сравнивая их с расчетными или проектными, паспортными или каталожными данными, с результатами аналогичных измерений. Значительное расхождение полученного результата с ожидаемым может свидетельствовать о наличии неисправностей, дефектов проверяемого объекта или погрешностей в методике и технике измерений.

Меры безопасности при проведении измерений указываются в инструкциях предприятия по выполнению соответствующих видов работ и в документах фирм – изготовителей средств измерения.

Как правило, операции, выполняемые в процессе наладки, не оказывают влияния на окружающую среду. Необходимо помнить, однако, что некоторые из них могут создавать опасность для посторонних лиц, как то: испытание изоляции повышенным напряжением переменного тока, измерение сопротивления изоляции или коэффициента абсорбции мегаомметром, проверка полярности или измерение сопротивления обмоток на стороне низшего напряжения силового трансформатора (пусть даже с применением сверхнизкого напряжения), измерения на вращающихся машинах и др.

## Глава 2.

# Общие испытания и проверка электрооборудования подстанций

### 2.1. Регулирование электрических величин.

#### 2.1.1. Регулирование тока.

Устройства для регулирования тока должны обеспечивать:

а) непрерывное изменение тока в заданных пределах;  
б) поддержание неизменным установленного значения тока независимо от изменения температурных условий или параметров нагрузки в ходе испытаний, например, от изменения индуктивности обмотки электромагнита при перемещении сердечника;

в) выполнение особых требований, например, плавность регулирования, синусоидальная форма кривой тока и др.

Наиболее универсальными свойствами обладают резисторные схемы регулирования, их применение ограничивается только трудностью подбора резисторов на большие токи. Простейшая схема рис.2.1,*а* пригодна лишь для токов до 5...10 А, посредством комбинированной схемы рис.2.1,*б* можно регулировать токи порядка 50 А. В обеих схемах плавное регулирование производится реостатом R, а резистор R<sub>0</sub> исключает возможность короткого замыкания при переводе движка потенциометра R в одно из крайних положений (левое по схеме рис.2.1).

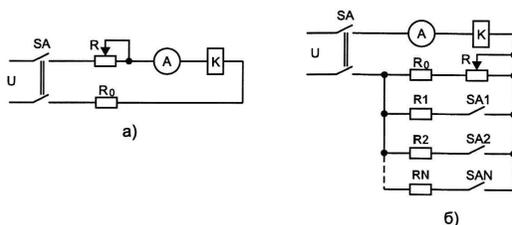


Рис.2.1. Схемы регулирования тока посредством переменных резисторов: *а* – простая; *б* – комбинированная

Сопротивление резисторов R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> ...R<sub>N</sub> подбирается так, чтобы максимальное значение тока на каждой ступени регулирования по крайней мере в 1,2...1,3 раза превышало то минимальное его значение, которое может быть получено на следующей ступени регулирования. Отношение минимального значения тока к максимальному на первых ступенях регулирования должно быть не более 0,7 с тем, чтобы можно было проверить коэффициент возврата реле, пользуясь только реостатом R. Для определения тока возврата при больших значениях тока сначала отключают резисторы R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> ...R<sub>N</sub>.

Во время проверки электромагнитных элементов значение тока в обмотке может изменяться в зависимости от положения сердечника (якоря). Это связано с тем, что при отпущенном якоре индуктивное сопротивление обмотки невелико по сравнению с активным, но возрастает в несколько раз при подтянутом якоре. Соответствующее увеличение полного сопротивления обмотки приводит к уменьшению тока в ней и, как следствие, к ослаблению притягивания якоря к магнитопроводу, нечеткой работе контактной системы и пр. Обычно задаются уменьшением тока на 3...5% и до 10% при больших токах. Соблюдение этих условий требует, чтобы сопротивление регулировочного резистора существенно превышало полное сопротивление обмотки, а это, в свою очередь, предполагает, что напряжение источника питания должно быть достаточным для создания необходимого тока. Если напряжение имеющихся понижающих трансформаторов меньше, чем требуется для обеспечения стабильности тока, можно рекомендовать включение двух трансформаторов с последовательным соединением их вторичных обмоток. Реостаты следует выбирать так, чтобы плотность тока в обмотке была небольшой, а сопротивление их незначительно изменялось с нагревом.

Характеристики ряда элементов электрических цепей зависят от формы кривой тока. Так, питание несинусоидальным током вызывает изменение токов срабатывания и выдержек времени реле, вибрацию якоря и пр. Отклонение формы тока или напряжения от синусоидальной объясняется наличием высших гармонических, т.е. составляющих, частота которых выше основной, первой гармонической составляющей. Причинами появления высших гармоник могут быть:

- а) искажение фазных напряжений, в связи с чем рекомендуется в необходимых случаях использовать линейное напряжение;
- б) насыщение стальных магнитопроводов;
- в) нелинейность внутреннего сопротивления источника питания;
- г) наводки и помехи в цепях управления.

Чтобы приблизить форму тока к синусоиду, в цепь вводят активное сопротивление в виде добавочных резисторов.

Для регулировки тока часто применяются автотрансформаторы, нагрузочные трансформаторы (рис.2.2). Схема рис.2.2,*а* проста и удобна, но ее нагрузочные возможности ограничиваются сравнительно небольшой мощностью широко применяемых ползунковых реостатов с сопротивлением 50...100 Ом на ток 3...5 А. Схемы с автотрансформатором на ток 9 – 10 А позволяют получить на вторичной стороне, достаточно распространенных трансформаторов типа ОСО-0,25 (250 Вт) напряжением 220/12 В, ток порядка 100 А (рис.2.2,*б,в*). С точки зрения качества регулирования и гармонического состава тока безразлично, в какую цепь трансформатора – первичную или вторичную – включать добавочный резистор  $R$ . Нужно только учитывать, что сопротивление его при включении в первичную цепь трансформатора с коэффициентом трансформации  $n$  должно быть в  $n^2$  раз больше, чем при включении во вторичную цепь. Так, например, сопротивление резистора на стороне 220 В должно быть в  $(220/12)^2 = 336$  раз больше, чем на стороне 12 В.

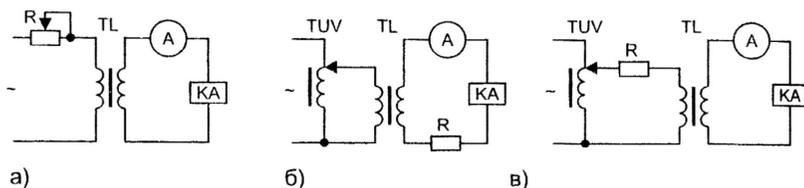


Рис. 2.2. Схемы регулирования тока нагрузки понижающих трансформаторов

Для получения больших токов требуются понижающие трансформаторы специального изготовления. Они являются составной частью нагрузочных комплексов, выпускаемых отдельными фирмами, или их изготавливают собственными силами пусконаладочные и энергоэксплуатационные предприятия.

Обычно в качестве магнитопровода используются ленточные или тороидальные сердечники сечением  $30 \dots 50 \text{ см}^2$ . Первичная (сетевая, на 220 или 380 В) обмотка состоит из  $100 \dots 300$  витков, вторичная выполняется в виде одного или нескольких витков кабеля или шины. Вторичная ЭДС трансформатора составляет  $2 \dots 4 \text{ В}$ , масса – до  $30 \text{ кг}$ .

Нагрузочный трансформатор работает практически в режиме короткого замыкания, как трансформатор тока. Но есть существенное отличие в использовании нагрузочных трансформаторов малой или большой мощности: если в первом случае максимальное значение тока ограничивается внутренним сопротивлением трансформатора, то во втором преобладающее значение может иметь сопротивление внешних соединений. Здесь важно иметь в виду еще и то, что внешнее индуктивное сопротивление медных проводников большого сечения ( $100 \text{ мм}^2$  и выше) оказывается больше, чем активное. Так, например, активное сопротивление  $1 \text{ м}$  прямого и обратного проводников из меди сечением  $200 \text{ мм}^2$  будет  $0,17 \text{ мОм}$ , индуктивное же сопротивление этих проводников, расположенных на расстоянии  $0,3 \text{ м}$  друг от друга, составит  $0,45 \text{ мОм}$  (рис.2.3), а полное  $0,49 \text{ мОм}$  (внутренним индуктивным сопротивлением можно пренебречь). В этих условиях нельзя ожидать ток больше  $4 \text{ кА}$  от трансформатора с вторичным напряжением  $2 \text{ В}$ , даже если не считаться с его внутренним сопротивлением, и основной возможностью повышения тока остается сокращение длины соединительных проводов и расстояния между ними.

Действительно, увеличение сечения проводов не даст ощутимого эффекта, так как уменьшится только активная составляющая сопротивления, а повышение напряжения путем увеличения количества витков вторичной обмотки трансформатора приведет к возрастанию его внутреннего сопротивления (активное сопротивление обмотки прямо пропорционально числу витков, индуктивное – квадрату числа витков). Но если сократить расстояние между соединительными проводами до  $0,1 \text{ м}$ , а длину их до  $0,5 \text{ м}$ , то внешнее индуктивное сопротивление проводов уменьшится до  $0,16$ , активное до  $0,09$ , а полное до  $0,18 \text{ мОм}$ , и тогда расчетное значение тока на той же отпайке трансформатора будет  $11 \text{ кА}$  (практически, конечно, значительно меньше из-за влияния сопротивления контактов и нагрузки). Таким образом, для получения

возможно больших значений тока от данной нагрузочной установки необходимо выполнить следующие рекомендации:

- 1) приблизить, насколько возможно, нагрузочный трансформатор к нагрузке, а соединительные провода друг к другу;
- 2) сечение проводников вторичной обмотки трансформатора и соединительного кабеля должно быть возможно большим;
- 3) обеспечить надежные контактные соединения в цепи нагрузки (с помощью зажимов, струбцин и т.п.)

Ток в первичной обмотке нагрузочных трансформаторов может достигать достаточно больших значений, намного превышающих допустимый ток ЛАТРа.

Так, например, при вторичном токе 10000 А и коэффициенте трансформации 100 нагрузочного трансформатора первичный ток последнего превысит 100 А. Силу тока такого порядка можно регулировать с помощью:

- а) автотрансформаторов;
- б) жидкостных реостатов;
- в) полупроводниковых регуляторов.

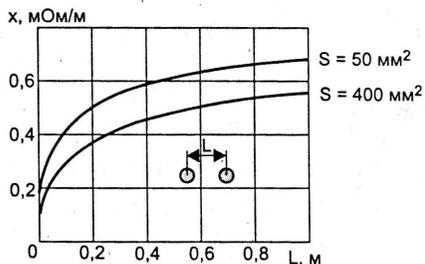


Рис. 2.3. Внешнее индуктивное сопротивление двух проводов:  $L$  – длина соединительных проводов;  $S$  – площадь поперечного сечения провода;  $x$  – индуктивное сопротивление проводов

С технической точки зрения применение автотрансформаторов является наилучшим способом, но ограничивается тем, что они тяжелы и громоздки. Так, масса автотрансформатора типа АОНН-40-220 на ток 40 А составляет 70 кг. Полезно иметь в виду (особенно при настройке токовой отсечки), что в кратковременном режиме автотрансформаторы могут быть значительно перегружены: например, регулятор РНО-250-10 с номинальным током 40 А допускает ток 180 А в течение 1 мин; при этом подвижный контакт должен быть надежно зафиксирован и перемещать его под нагрузкой нельзя.

Жидкостные реостаты в одно- или трехфазном исполнении состоят из сосуда с подсоленной или подкисленной водой, в котором расположены электроды из меди, латуни, оцинкованной стали и пр. Нагрузка регулируется изменением площади электродов, погружаемых в электролит, или расстояния между ними. При всей простоте их конструкции жидкостные реостаты не находят широкого применения в связи с тем, что они требуют отдельного изготовления, а также имеют нестабильное сопротивление.

В ряде случаев оптимальным решением является применение полупроводниковых регуляторов, сравнительно легких и малогабаритных, которые к тому же могут быть изготовлены практически на любую силу тока. В однофазном исполнении регулятор тока до 1...2 кА содержит два управляемых полупроводниковых вентиля, включенных встречно-параллельно (обычно – тиристоры или симистор); при большем токе применяется параллельное включение нескольких вентилях. В последние годы нашли применение силовые IGBT- транзисторы, работающие в ключевом режиме. Единственным препятствием к использованию таких регуляторов является искажение формы кривой тока. Действительно, в процессе регулирования вентили открываются (отпираются) не в начале полупериода напряжения, а с запаздыванием, отсекая таким образом начальную часть полупериода (рис.2.4).

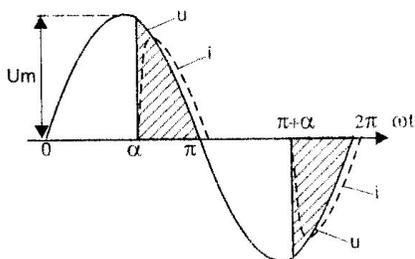


Рис.2.4. Форма напряжения и тока при регулировании посредством управляемых вентилях

Чем больше угол отсечки  $\alpha$  (угол запаздывания отпираения, угол регулирования), тем меньше будет ток нагрузки и тем больше форма его будет отличаться от синусоиды. Это отличие численно оценивается коэффициентом формы, который представляет собой отношение действующего значения периодической величины к ее среднему значению, и для синусоидального напряжения, в частности, равен  $k_{\phi} = U/U_{cp} = 1,11$ . Зависимость действующего и среднего значений напряжения и коэффициента формы от угла регулирования  $\alpha$  приведена на рис.2.5.

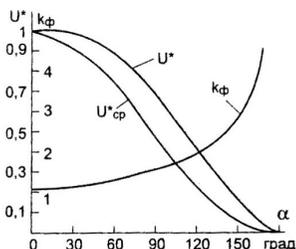


Рис.2.5. Зависимость действующего ( $U$ ), среднего ( $U_{cp}$ ) значений напряжения и коэффициента формы  $k_{\phi}$  от угла регулирования  $\alpha$

Опытным и расчетным путем установлено (Ленинградское пусконаладочное управление треста Севзапэлектромонтаж), что тиристорные регуляторы можно использовать для испытания электромагнитных реле при условии, если угол регулирования не превышает  $90^\circ$ , а измерения производятся либо аналоговыми приборами, непосредственно реагирующими на среднеквадратичное (действующее) значение тока (приборы электромагнитной или электродинамической системы), либо цифровыми приборами, вычисляющими среднеквадратичное значение тока при любой форме сигнала. Токи срабатывания расцепителей автоматов типа АП-50, А3100 и др. практически (с погрешностью 2...3%) не зависят от угла регулирования в широком диапазоне его изменения (до  $120^\circ$ ). Вместе с тем тиристорные регуляторы принципиально неприменимы для проверки тех цепей и аппаратов, для которых форма тока имеет существенное значение.

Простейшую схему фазового управления вентилями можно осуществить с помощью RC-цепи. Более совершенные схемы строятся на цифровых или аналоговых микросхемных элементах. В ряде конструкций предусматривается запоминание и автоматическое отключение тока при срабатывании защиты, а также стабилизация тока уставки.

Различные варианты нагрузочных комплектов для испытания максимальных токовых защит выпускаются как российскими, так и зарубежными фирмами (см.3.1). Нагрузочные установки, предлагаемые зарубежной электротехнической промышленностью, имеют достаточно высокие технические характеристики, однако возможность их приобретения и использования ограничивается ценой, иногда на порядок выше, чем отечественных устройств аналогичного назначения. Так, система испытания первичным током ODEN AT (компания «Пергам») обеспечивает получение нагрузочного тока до 22 кА, но стоимость комплекта составляет \$26000.

Регулируемое напряжение постоянного тока можно получить с помощью устройств переменного тока с выпрямителями на выходе. Во многих случаях (при индуктивной нагрузке, зарядке аккумуляторов и пр.) пульсация выходного напряжения существенного значения не имеет. Надо только иметь в виду, что из-за падения напряжения на вентиллях вторичное напряжение нагрузочного трансформатора должно быть на 1...3 В выше, чем для получения того же значения переменного тока.

### **2.1.2. Регулирование напряжения.**

Требования к регуляторам тока и напряжения аналогичны. Для регулирования переменного напряжения широко применяются лабораторные автотрансформаторы (рис.2.6). Простейшая схема включения (рис.2.6,а) позволяет с помощью автотрансформатора TUV изменять напряжение на нагрузке (реле напряжения KV) в диапазоне от 0 до 250 В. Минимальное изменение напряжения получается при перемещении ползунка на один виток обмотки. Автотрансформатор ЛАТР-1 имеет 250 витков и, следовательно, дискретность напряжения составляет 1 В/виток, у ЛАТР-2 дискретность 0,45 В/виток, так как число витков его обмотки – 550. Если такая точность регулируемого напряжения представляется недостаточной, то его подают через другой ЛАТР или потенциометр. Для обычных промежуточных реле и электромагнитов достаточна точность регулирования 0,5...1% номинального напряжения.

С помощью двух автотрансформаторов можно получить регулируемое напряжение от 0 до 430 В по схеме рис.2.6,б или по аналогичной схеме, подав напряжение 380 В на выводы 220 В.

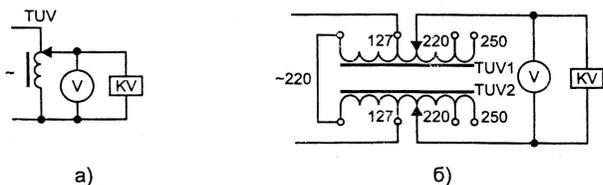


Рис.2.6. Схемы регулирования напряжения с помощью автотрансформаторов: а – с одним автотрансформатором; б – с двумя автотрансформаторами

Последний вариант обеспечивает синусоидальность выходного напряжения, так как линейное напряжение не содержит высших гармонических. Посредством трех автотрансформаторов можно регулировать трехфазное напряжение 430/250 В.

Для регулирования напряжения переменного и постоянного тока применяют переменные резисторы, реостаты, включаемые по схеме потенциометра (рис.2.7). Схема включения потенциометра на рис.2.7,а – самая простая. По схеме рис.2.7,б одним потенциометром осуществляют «грубое», другим – «тонкое» регулирование напряжения. Схема на рис.2.7,в обеспечивает изменение полярности (реверсирование) выходного напряжения без разрыва цепи.

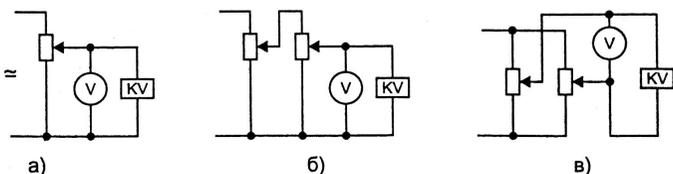


Рис.2.7. Схемы регулирования напряжения с помощью потенциометров: а – с одним потенциометром; б – с двумя потенциометрами; в – с реверсированием напряжения

Выбирая резисторы для схемы с потенциометром, надо учитывать ее характерные особенности. Во – первых, потенциометр, как и автотрансформатор, дает дискретную, мелкоступенчатую регулировку. Точность ее определяется числом витков обмотки потенциометра, по которой движется щетка или ролик. Так как обычно ширина щетки значительно больше диаметра проволоки обмотки, часть витков щеткой шунтируется и напряжение на виток несколько увеличивается. Кроме того, токо-съемник часто не доходит до конца обмотки и часть витков ее не используется. По этим причинам расчетное число витков потенциометра должно быть на 10...20% больше полученного из условий обеспечения требуемой точности регулирования. Точность регулирования можно повысить посредством второго потенциометра по

схеме рис.2.7,б или включив последовательно с потенциометром постоянные добавочные резисторы с обеих его сторон. Включая или отключая эти резисторы, можно сдвигать область регулирования в сторону больших или меньших значений напряжения.

Во-вторых, та часть R2 делителя (рис.2.8), к которой не подключена нагрузка  $Z_H$ , обтекается общим током  $I_2$ , равным сумме токов собственного потребления резистора R и тока нагрузки  $I_H$ . Если нагрузка такова, что при одном и том же положении движка потенциометра сопротивление ее может изменяться (например, при срабатывании реле или электромагнита), то с током  $I_H$  изменится и падение напряжения  $I_2R_2$  и, следовательно, напряжение на нагрузке  $U_H$ . Чтобы снизить влияние нагрузки на испытательное напряжение, сопротивление делителя R выбирают на порядок (в 5...10 раз) меньше сопротивления нагрузки  $Z_H$ .

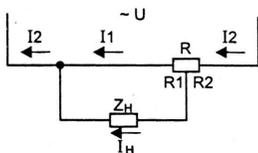


Рис.2.8. К схеме регулирования напряжения потенциометром

В-третьих, при указанных условиях ток  $I_2$  получается больше, чем ток  $I_H$ , и выбирать реостат по току следует именно по значению тока  $I_2$ . Полезно иметь в виду, что силовые резисторы, и ползунковые реостаты в частности, имеют большую тепловую инерцию, в связи с чем в кратковременном режиме выдерживают определенную перегрузку и могут быть выбраны на номинальный ток, меньший  $I_2$ . В любом случае изменение сопротивления резисторов от нагрева не должно искажать результатов проверки.

### 2.1.3. Регулирование угла сдвига фаз.

При наладке требуется изменять угол между векторами тока и напряжения в трех основных случаях:

- 1) установка и поддержание неизменным заданного значения угла;
- 2) изменение угла степенями;
- 3) точная установка и плавное регулирование угла в небольших пределах.

Универсальным аппаратным средством для выполнения этих функций является так называемый индукционный регулятор (потенциал-регулятор) – заторможенный асинхронный двигатель с фазным ротором. Особенность его состоит в том, что при изменении угла поворота ротора относительно статора от 0 до  $360^\circ$  в тех же пределах изменяется угол между напряжениями статора и ротора. Однако некоторые модификации обеспечивают изменение угла лишь в пределах  $\pm 90^\circ$ . Кроме того, эти электрические машины даже небольшой мощности сравнительно тяжелы и громоздки. Могут использоваться также поворотные трансформаторы и автотрансформаторы, сельсины (рис.2.9).

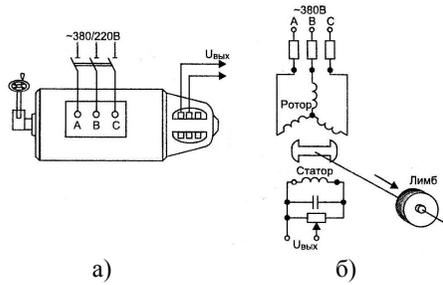


Рис.2.9. Электромашинные фазорегуляторы: а – индукционный фазорегулятор; б – сельсинный фазорегулятор

Когда допустимо изменение угла ступенями, удобно использовать трехфазное напряжение. Подавая различные линейные напряжения на цепи тока и напряжения, можно получить 6 разных значений угла между соответствующими векторами от 0 до 360° через 60°, а используя дополнительно и фазные напряжения – через 30°. Ниже указан вариант подключения фаз сети к одной из цепей тока или напряжения при условии, что другая цепь подключена на напряжение АО.

Угол, град. эл	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Фаза	А0	АВ	ОВ	СВ	С0	СА	0А	ВА	В0	ВС	0С	АС

Необходимую коммутацию напряжений нетрудно осуществить с помощью двух однополюсных переключателей на четыре направления (рис.2.10) или одного двоядного переключателя. При необходимости такой фазорегулятор дополняется потенциометром (или автотрансформатором), с помощью которого можно плавно изменять значение угла от 0 до 60° в пределах одной ступени (рис.2.11,а). Но из векторной диаграммы рис.2.11,б видно, что при регулировании выходное напряжение изменяется не только по фазе, но и по значению: в крайних положениях движка потенциометра оно равно линейному, в среднем положении – в 1,15 раз меньше.

Для исключения этого недостатка можно применить схему с двумя потенциометрами (рис.2.11,б); здесь одним потенциометром устанавливают угол, другим корректируют значение напряжения. Во всех схемах вместо потенциометра можно использовать автотрансформатор.

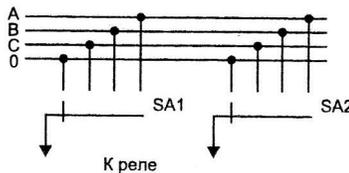


Рис.2.10. Ступенчатое изменение угла с помощью двух переключателей

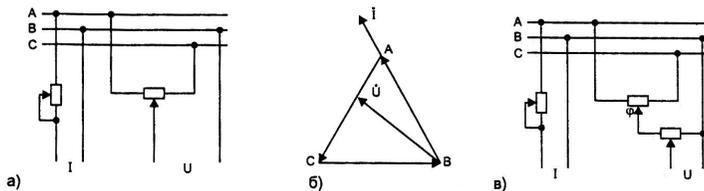


Рис.2.11. Плавное изменение угла между током ( $I$ ) и напряжением ( $U$ ) в пределах  $0 \dots 60^\circ$  с помощью потенциометров: а- схема с одним потенциометром; б- векторная диаграмма к схеме с одним потенциометром; в- схема с двумя потенциометрами

#### 2.1.4. Контроль электрических величин.

В процессе массовых проверок электрических цепей и оборудования часто требуется не измерить точное значение того или иного параметра, а лишь установить, отличается ли его значение от нуля. Такие приборы получили общее название индикаторов. Самым употребительным из них является устройство с обиходным названием “пробник”, служащее для проверки наличия электрической цепи, целостности проводников, и состоящее, в простейшем варианте, из батарейки и светового индикатора – лампочки карманного фонарика или светодиода. Первоначально в качестве индикатора применяли электрический звонок, а потому и сама операция получила бытующее до сих пор название “прозвонка”.

Несмотря на крайнюю простоту, пробник с электрической лампочкой удобен тем, что позволяет надежно установить наличие короткозамкнутой электрической цепи, так как уже при сопротивлении  $20 \dots 30$  Ом лампочка не горит. Кроме того, во искрению при размыкании цепи можно судить о наличии в ней индуктивности. В одной из конструкций такого пробника (Тайвань) один конец пластмассового корпуса цилиндрической формы снабжен металлическим щупом, а с другого конца, выполненного из прозрачного материала, выведен гибкий проводник с зажимом “крокодил”. При переноске острый щуп закрывается наконечником, что предотвращает разряд батареи при случайном соприкосновении щупа и “крокодила”. В ярко освещенных помещениях предпочитают вместо световых индикаторов использовать звуковые, например, миниатюрные динамики.

“Слабым местом” простейшего пробника является то, что при попадании на его выводы напряжения внешней цепи он выходит из строя. В ряде конструкций этот недостаток так или иначе преодолевается. Например, схема пробника ПУ-82М (разработка ЛенПЭО ГПИ «Тяжпромэлектропроект») построена так, что благодаря высокоомному входу выдерживает приложенное напряжение  $220$  В в течение  $30$  с. С помощью этого прибора можно определить и диапазон сопротивления контролируемой цепи: при значениях от  $0$  до  $10$  Ом индикация непрерывная, от  $10$  до  $8000$  – прерывистая, более  $8000$  Ом и при обрыве цепи – сигнал отсутствует. Жесткий щуп прибора – выдвигной с пружинным фиксатором. Принципиальная схема такого прибора (в несколько упрощенном виде) показана на рис.2.12 .

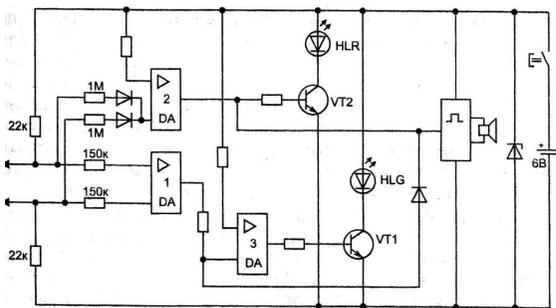


Рис.2.12 . Принципиальная схема пробника с защитой от напряжения 220 В

Если выводы пробника замыкаются на обесточенную замкнутую цепь, сопротивление которой не превышает нескольких десятков ом, выходным сигналом интегральной микросхемы DA1 открывается транзистор VT1 и загорается зеленый сигнал (светодиод HLG). При случайном прикосновении к токоведущим частям, находящимся под напряжением постоянного или переменного тока, независимо от полярности напряжения на вход микросхемы DA2 будет поступать «+», ее выходной сигнал откроет транзистор VT2 и загорится красный сигнал (светодиод HLR); одновременно будет подан звуковой сигнал тревоги. Напряжение 220 В на входе схема выдерживает без повреждения до 30 с.

При прозвонке длинных кабелей, концы которых расположены в разных помещениях, часто используют телефонные трубки, с которыми работают два наладчика. Широко применяются портативные коротковолновые радиостанции и мобильные телефоны. При большом объеме работ, особенно при прозвонке многожильных кабелей, целесообразно воспользоваться автоматизированным пультом – пробником, с помощью которого проверку может выполнить один оператор. Вариант такого пульта (разработка ЛенПНУ треста “Севзапэлектромонтаж”) конструктивно состоит из двух частей: передающей и приемной. Передающая часть снабжена генератором, приемная – счетчиком импульсов и цифровым табло. Один конец кабеля подключается всеми жилами на маркированные зажимы передатчика, у другого конца помещается приемник. Для каждой жилы генератор вырабатывает серию импульсов, количество которых равно номеру жилы. Этот номер высвечивается на цифровом табло, когда наладчик касается жилы щупом приемника. При обнаружении замыкания между жилами или “земли” табло гаснет.

Наличие или отсутствие напряжения устанавливают посредством указателей напряжения со световой индикацией. Индикаторные приборы последних лет выпуска, предназначенные для работы в цепях до 1000 В, способны выполнять целый ряд различных функций. Простой и дешевый (около 3 долл.) многофункциональный прибор ИМ-1 Арзамасского завода радиодеталей (рис.2.13) позволяет определить наличие напряжения от 4 до 380 В с указанием фазного и нулевого провода переменного напряжения и полярности постоянного напряжения, исправность электрической цепи, конденсаторов, диодов и транзисторов. Надо, однако, иметь в виду, что из-за малого

потребления светодиода в схеме гаснут только при сопротивлении больше 0,5 МОм, что существенно ограничивает возможности применения прибора для прозвонки.



Рис.2.13. Многофункциональный индикатор ИМ-1

Несколько более сложный пробник ИМ-2 позволяет приблизительно определить порядок значения напряжения, обеспечивает световую и звуковую индикацию.

Традиционно выпускаются и однофункциональные индикаторы напряжения. Индикатор-отвертка ИН-91 предназначен для проверки наличия переменного напряжения от 110 до 380 В. У индикатора ПИН-90 верхний порог напряжения постоянного и переменного тока повышен до 750 В. Индикатор состоит из двух диэлектрических рукояток с металлическими наконечниками, в одну из которых вмонтирована неоновая лампа, в другую – ограничительный резистор. Индикатор переменного напряжения УН-1 дает возможность судить не только о наличии напряжения, но и о его соответствии значениям 127, 220 и 380 В – по длине светящегося столба линейного аналогового индикатора.

Выпускаются также высоковольтные указатели напряжения с газоразрядной (неоновой) лампой в качестве светоиндикатора. Так, указатели УВН-80М и УН-450 предназначены для напряжения до 10 кВ, УВН-90 – до 110 кВ.

Следует помнить, что отсутствие свечения индикаторной лампы еще не является безусловным признаком отсутствия напряжения, так как цепь индикатора может быть повреждена. Поэтому непосредственно перед использованием указателя на проверяемом оборудовании необходимо убедиться в его исправности на токоведущей части, заведомо находящейся под напряжением.

## 2.2. Фазировка.

*Фазировка* – это проверка соответствия фаз включаемой электроустановки и рабочей сети. С этой целью проверяют порядок чередования (следования) фаз и совпадение по фазе одноименных напряжений, а также обозначение и окраску фазных

проводников. Обозначаются они латинскими буквами А, В и С, а шины окрашиваются соответственно в желтый, зеленый и красный цвета.

В пяти- и четырехпроводных цепях расположение шин должно быть следующим:

- при горизонтальном расположении:
  - одна под другой: сверху вниз А-В-С-N-PE (PEN);
  - одна за другой: наиболее удаленная шина А, затем фазы В-С-N, ближайшая к коридору обслуживания – PE (PEN);
- при вертикальном расположении: слева направо А-В-С-PE (PEN) или наиболее удаленная шина А, затем фазы В-С-N, ближайшая к коридору обслуживания – PE (PEN);
- отключения от сборных шин, если смотреть на шины из коридора обслуживания:
  - при горизонтальном расположении: слева направо А-В-С-N-PE (PEN);
  - при вертикальном расположении А-В-С-N-PE (PEN) сверху вниз (1.1.31).

У трансформаторов выводы низшего напряжения располагаются слева направо (если смотреть со стороны высшего напряжения) в следующем порядке: 0 – а – b – с у трехфазных или а – х у однофазных трансформаторов.

Изменение синусоидальной величины во времени графически изображается либо в виде синусоиды, либо с помощью вращающегося вектора (рис.2.14). Полный оборот вектора на  $360^\circ$  соответствует периоду синусоиды  $T = 1/\omega$ , где  $\omega$  – частота вращения вектора;  $\omega t$  – угол поворота вектора за время  $t$ , например,  $\omega t = \varphi$ , как это показано на рис.2.14.

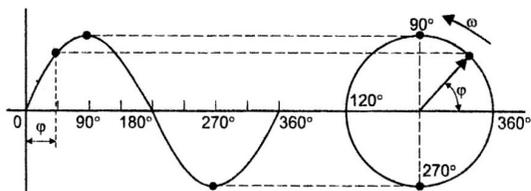


Рис.2.14. Графическое представление синусоидальной величины

Векторные величины обозначаются соответствующими прописными буквами с точкой или черточкой сверху, либо эти буквы выделяются жирным шрифтом. Совокупность векторов, отображающих синусоидальные функции времени, называется векторной диаграммой.

Напряжения в трехфазных сетях также могут быть представлены посредством синусоид и векторной диаграммы. При этом предполагается, что векторы фазных напряжений вращаются с одинаковой частотой и следуют друг за другом с отставанием на угол, равный  $2\pi/3 = 120^\circ$ , если система симметрична, т.е. нагрузка всех трех фаз одинакова и значения фазных напряжений равны.

Такой порядок следования (чередования) фаз, когда за фазой А следует фаза В, а затем фаза С или при *циклической* их перестановке, называется *прямым* и обозначается символами АВС (или ВСА, САВ), а при перестановке любых двух фаз – *обратным* (ВАС, АСВ, СВА). На рис.2.15 представлены векторная диаграмма симметричной

системы фазных напряжений и синусоидальные кривые зависимости их от времени; порядок чередования фаз – прямой. В момент, отраженный на рис.2.15, мгновенные значения напряжения фаз А, В и С составляют:  $U_A = U_\phi$ ,  $U_B = U_C = U_\phi \sin 30^\circ = U_\phi/2$  (отрезок MN), где  $U_\phi$  – действующее значение фазного напряжения, например, 220 В.

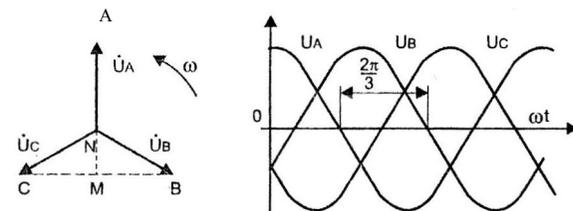


Рис.2.15. Векторная диаграмма и зависимость напряжения от времени в трехфазной системе

Порядок чередования фаз легко определить с помощью простых малогабаритных приборов – фазоуказателей. Фазы сети подключают к зажимам А, В и С прибора (рис.2.16). Индукционный фазоуказатель представляет собой миниатюрный асинхронный двигатель с ротором в виде легкого алюминиевого диска. При нажатии кнопки и прямом порядке чередования фаз диск индукционного фазоуказателя (рис. 2.16,а) будет вращаться по часовой стрелке, при обратном – в противоположную сторону. Индукционный фазоуказатель типа И 517М, например, рассчитан на напряжение от 50 до 500 В, частоту от 40 до 500 Гц, его масса 0,2 кг.

Простой статический фазоуказатель со световым индикатором может быть собран по схеме рис.2.16,б. Сопротивления резисторов и емкость конденсаторов подбираются так, чтобы ток в плече АВ опережал напряжение на выходе схемы на  $30^\circ$ , а в плече ВС – на  $60^\circ$ . При прямом порядке чередования фаз напряжение на выходе схемы равно нулю, при обратном – в 1,5 раза больше линейного; индикатором HL может служить неоновая лампочка.

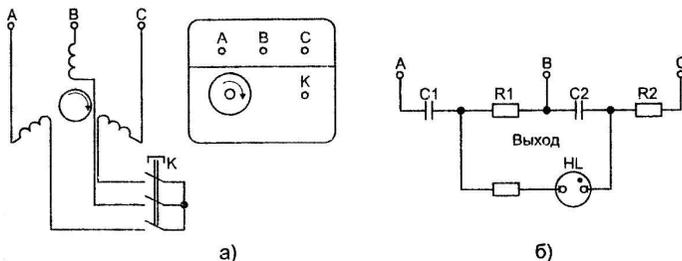


Рис.2.16. Фазоуказатели: а) индукционный; б) статический.

Но важно помнить, что установление правильного чередования фаз еще не гарантирует от ошибок при фазировке. Действительно, из рис.2.17 видно, что включение

на параллельную работу (рубильник  $Q_S$ ) двух систем шин (или кабелей) с одинаковым чередованием фаз при их круговой (циклической) перестановке привело бы к трехфазному короткому замыканию (если, конечно, обе системы имеют общую точку, например, заземление нейтрали трансформаторов, к которым подключены эти шины или кабели). Совпадение фаз проверяется вольтметром, либо непосредственно, либо с использованием трансформаторов напряжения.

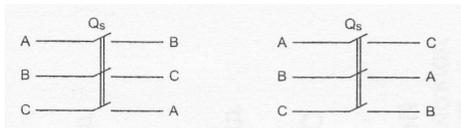


Рис.2.17. Неправильная фазировка шин при круговой перестановке фаз с одинаковым чередованием

Перед включением на параллельную работу силовых трансформаторов проверяют их фазировку, чтобы убедиться, что напряжение между одноименными выводами трансформаторов близко к нулю (рис.2.18).

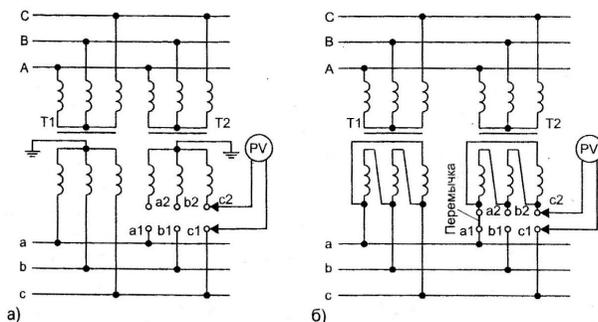


Рис. 2.18 . Фазировка силовых трансформаторов на стороне 0,4 кВ:  
а) нейтрали обмоток заземлены; б) обмотки соединены перемычкой

Фазировку оборудования напряжением выше 1000 В производят либо с помощью высоковольтных указателей напряжения непосредственно, либо во вторичных цепях трансформаторов напряжения. В последнем случае следует убедиться, что маркировка выводов вторичной обмотки трансформатора напряжения соответствует фазам первичной цепи. С этой целью отключенный трансформатор напряжения проверяют подачей импульсов постоянного тока (п.2.3.4), а трехфазный трансформатор, подключенный к сети, пофазно отключают со стороны высшего напряжения (при наличии предохранителей или однофазных разъединителей в первичной цепи). При этом на отключенной фазе вторичное напряжение исчезает или понижается.

На рис.2.19,а показана схема трехстержневого трансформатора напряжения с нагрузкой во вторичной цепи. При отключении фазы В на первичной стороне транс-

форматора последовательно соединенные сопротивления нагрузки  $Z_{ab}$  и  $Z_{bc}$  включаются на вторичное линейное напряжение  $U_{ac}$  и, если они одинаковы, то  $U_{ab} = U_{bc} = U_{ac}/2$ , а если эти сопротивления не равны, одно из напряжений  $U_{ab}$  или  $U_{bc}$  будет меньше  $U_{ac}/2$ . У пятистержневого трансформатора при отключении фазы В напряжения фазы b будет  $U_b = 0,5U_{\phi}$ , а линейные напряжения  $U_{ab} = U_{bc} \approx 0,75U_{ном}$  (рис.2.19,б).

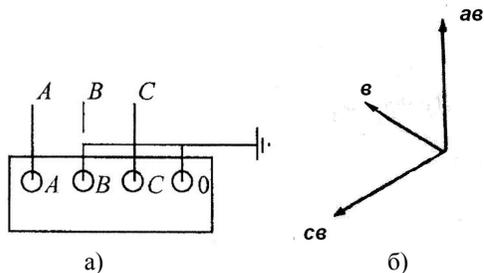


Рис.2.19. Фазировка трехфазного трансформатора напряжения с отключением фазы В: а- схема соединения обмоток трехстержневого трансформатора напряжения; б – векторная диаграмма напряжений пятистержневого трансформатора напряжения при отключении фазы В

Можно также определить фазы с помощью фазоуказателя, но при условии, что одна из фаз во вторичной цепи заземлена. Обычно заземляют фазу b, а если заземлен нуль, то на время проверки заземление следует перенести. Определив чередование фаз с помощью фазоуказателя, легко установить маркировку фаз а и с, так как фаза b известна.

Другие трансформаторы напряжения фазируют с проверенными так же, как и силовые трансформаторов на стороне ниже 1000 В.

При фазировке силового кабеля требуется отыскать в конце его жилы, соответствующие определенным фазам в начале кабеля. Проверка производится обычно с помощью пробника или мегаомметра. В качестве одного из проводов можно использовать металлическую оболочку кабеля. При таком способе «прозвонки» оператору приходится трижды устанавливать перемычку жила – земля в конце кабеля и возвращаться к его началу. Избежать этих непроизводительных затрат времени можно, если в конце кабеля одну из жил заземлить наглухо, другую – через сопротивление порядка 1 МОм, третью же оставить свободной. Тогда жилы легко идентифицировать по показаниям мегаомметра, измерив в начале кабеля сопротивление каждой жилы относительно земли: нуль, включенное сопротивление и сопротивление изоляции. После окончания измерений мегаомметром жилы кабеля следует разрядить, поочередно замыкая их на землю на 1...2 мин.

## 2.3. Построение векторных диаграмм.

### 2.3.1. Суммирование векторов.

При построении векторных диаграмм часто приходится складывать или вычитать вектора. *Векторное*, или *геометрическое*, суммирование производится с учетом не

только абсолютного значения величины, но и ее фазы, то есть углового положения вектора на диаграмме. Пусть, например, требуется сложить два вектора  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  (рис.2.20). С этой целью следует вектор  $\mathbf{B}$  перенести параллельно самому себе так, чтобы совместить его начало с концом вектора  $\mathbf{A}$  (рис.2.20,а). Вектором  $\mathbf{A} + \mathbf{B}$  будет диагональ параллелограмма, построенного на сторонах  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$ . Чтобы вычесть вектор  $\mathbf{B}$  из вектора  $\mathbf{A}$ , следует такое же построение произвести с вектором  $-\mathbf{B}$ . Полученная разность может быть представлена второй диагональю параллелограмма. Обычно полный параллелограмм не строят, ограничиваясь треугольником векторов (не показывая стороны, изображенные на рис.2.20,а пунктиром).

На рис.2.20,б представлена симметричная система трех одинаковых векторов  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$ , расположенных под углом  $120^\circ$  друг к другу, как это имеет место в трехфазной системе. Здесь в качестве примеров показано вычитание ( $\mathbf{A} - \mathbf{B}$  и  $\mathbf{B} - \mathbf{A}$ ) и сложение векторов ( $\mathbf{A} + \mathbf{C}$ ). Нетрудно заметить следующее:

- не прибегая к построению параллелограмма, можно получить разность  $\mathbf{A} - \mathbf{B}$  как вектор, начало которого совмещено с концом вектора  $\mathbf{B}$ , а конец – с концом вектора  $\mathbf{A}$ , и наоборот – для разности  $\mathbf{B} - \mathbf{A}$ ;
- чтобы сложить два вектора, например  $\mathbf{A} + \mathbf{C}$ , достаточно перенести вектор  $\mathbf{C}$  параллельно самому себе так, чтобы совместить начало его с концом вектора  $\mathbf{A}$ ; третья сторона треугольника образует результирующий вектор  $\mathbf{A} + \mathbf{C}$ , начало которого совпадает с началом первого из векторов – слагаемых; тот же результат получится при переносе вектора  $\mathbf{A}$  к вектору  $\mathbf{C}$ ;
- сумма векторов симметричной трехфазной системы равна нулю ( $\mathbf{A} + \mathbf{C} = -\mathbf{B}$ ).

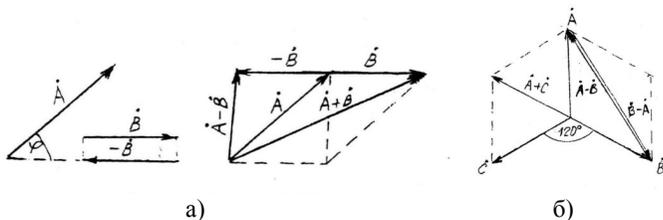
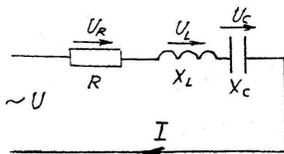
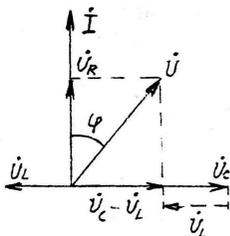


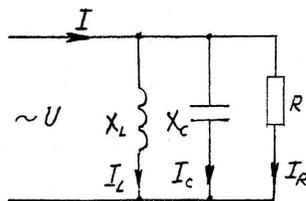
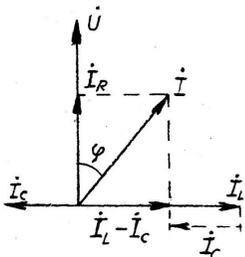
Рис.2.20. Сложение и вычитание векторов;  $a$  – векторов  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$ ;  $b$  – векторов  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$ .

### 2.3.2. Векторные диаграммы цепей со смешанной нагрузкой.

Выше были рассмотрены векторные диаграммы фазных напряжений трехфазной сети, сдвинутых относительно друг друга (при симметричной нагрузке или на холостом ходу) на  $120^\circ$ . Но фазный сдвиг может образовываться и в однофазной цепи переменного тока за счет наличия в ней реактивных элементов – индуктивности и емкости (рис.2.21). Индуктивные  $X_L$ , емкостные  $X_C$  и активные  $R$  сопротивления могут быть соединены в ней последовательно (рис.2.21,а) или параллельно (рис.2.21,б). В первом случае общим для всех элементов цепи является ток, во втором – напряжение, и при построении векторных диаграмм удобно поэтому принимать за ось отсчета соответственно вектор тока  $\mathbf{I}$  (рис.2.21,а) или вектор напряжения  $\mathbf{U}$  (рис.2.21,б). Напряжение на индуктивности  $U_L$  опережает ток на  $90^\circ$ , а напряжение на емкости отстает от тока  $I_C$  на  $90^\circ$ .



а)



б)

Рис.2.21. Схемы и векторные диаграммы цепей с индуктивным  $X_L$ , емкостным  $X_C$  и активным  $R$  сопротивлениями: а – последовательное соединение; б – параллельное соединение

Из рис.2.21,а видно, что векторы напряжений на индуктивности и емкости направлены в противоположные стороны, результирующее реактивное напряжение равно их разности и в зависимости от преобладания индуктивности или емкости может отставать от тока или опережать его: если  $X_L > X_C$ , ток отстает от напряжения (индуктивная реакция цепи), а если  $X_C > X_L$ , то ток опережает напряжение (емкостная реакция). Угол  $\varphi$  можно определить из соотношения

$$\cos \varphi = U_R / U = R/Z \text{ или } \operatorname{tg} \varphi = (U_L - U_C) / U_R = (X_L - X_C)/R .$$

Режим, при котором  $X_L = X_C$ , называется *резонансом*. При этом реактивное сопротивление цепи на рис.2.21,а будет равно нулю, и поскольку реактивная составляющая напряжения также равна нулю, такой режим называется *резонансом напряжений*, или *последовательным резонансом*. Входное сопротивление цепи будет чисто активным, равным  $R$ , а напряжение на нем равно напряжению на зажимах цепи, хотя напряжения на индуктивности и емкости могут значительно превышать по значению входное напряжение. Ток  $I = U/R$  совпадает по фазе с напряжением:  $\varphi = 0$ ,  $\cos \varphi = 1$ .

В схеме рис.2.21,б с параллельным соединением сопротивлений результирующий реактивный ток равен разности токов в ветвях с емкостью и индуктивностью. Когда  $X_L > X_C$ , ток опережает напряжение, когда  $X_C > X_L$  – ток отстает от напряжения. Угол  $\varphi$  определится из соотношения

$$\cos \varphi = I_R / I = Z / R \text{ или } \operatorname{tg} \varphi = (I_L - I_C) / I_R = R(X_C - X_L) / X_L X_C.$$

При резонансе общий ток в цепи будет определяться только активным сопротивлением, хотя токи в цепях с индуктивностью и емкостью могут намного превосходить общий ток. Такой режим называется резонансом токов, или параллельным резонансом.

### 2.3.3. Векторная диаграмма напряжений трехфазного трансформатора.

Обмотки трехфазных трансформаторов соединяются, как правило, по схеме “звезда” (У) или “треугольник” (Д). Наиболее часто встречаются соединения первичной и вторичной обмоток по схеме звезда – звезда (У/У) и звезда-треугольник (У/Д). Начальные выводы обмотки высшего напряжения (ВН) обозначаются заглавными буквами латинского алфавита А, В и С, конечные – X, Y и Z. Выводы обмоток низшего напряжения (НН) обозначаются соответственно строчными буквами a, b, c и x, y, z.

Полное условное обозначение соединений обмоток содержит еще номер группы соединений в виде одной из двенадцати цифр на циферблате часов. Эти цифры на круговом циферблате наносятся через  $30^\circ$ , поскольку угол полного оборота часовой стрелки составляет  $360^\circ$ . Вместе с тем, соединяя в том или ином порядке фазные обмотки трехфазного трансформатора, можно получить всего 12 вариантов, в которых векторы одноименных линейных напряжений будут смещены по фазе на угол, кратный  $30^\circ$ . Такое сопоставление и дало основание принять за единицу угла, характеризующего группу соединений, не электрический градус, а в 30 раз более крупную – час. Мнемоническое правило таково: следует вообразить, что вектор линейного напряжения на стороне ВН представлен на циферблате часов минутной стрелкой, установленной на цифру 12, а вектор одноименного линейного напряжения на стороне НН – часовой стрелкой; тогда час, на который она указывает, определит группу соединения обмоток. Отсчет угла при этом ведется по направлению движения часовой стрелки, начиная с цифры 12; это ее положение означает, что угол фазного сдвига равен нулю. Наиболее распространены группы У/У – 12 и У/Д – 11.

Векторы вторичных и первичных фазных ЭДС всегда параллельны друг другу, так как ЭДС данной фазы индуктируются одним и тем же магнитным потоком. Они могут либо совпадать по фазе, если обмотки намотаны в одну и ту же сторону (согласно), либо находиться в противофазе (со сдвигом на  $180^\circ$ ), если обмотки намотаны в разные стороны (встречно). Поэтому при соединении У/У векторы одноименных линейных напряжений также либо совпадают, либо направлены встречно, что соответствует в первом случае группе соединений У/У-12, во втором – группе У/У-6.

Несколько сложнее обстоит дело для группы У/Д (рис.2.22). На схеме рис.2.22,а показана схема соединения обмоток трансформатора, на рис.2.22,б и 2.22,в – векторные диаграммы первичных и вторичных напряжений при данной схеме соединений и в предположении, что обмотки намотаны согласно. Для большей наглядности начала векторов **АС** и **ас** совмещены на рис.2.22,б, где видно, что угол между ними равен  $330^\circ$ . То же, разумеется, относится и к двум другим парам линейных напряжений, и потому соединение рис.2.22 следует отнести к группе У/Д-11. При встречной намотке обмоток и той же схеме соединений была бы получена группа У/Д-5.

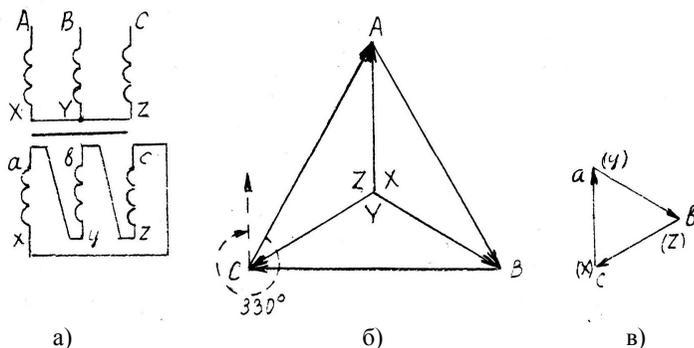


Рис.2.22. Соединение обмоток трансформатора по схеме У/Д и векторные диаграммы напряжений

### 2.3.4. Векторные диаграммы токов и напряжений во вторичных цепях измерительных трансформаторов.

По векторным диаграммам токов и напряжений определяют исправность обмоток и правильность включения вторичных цепей измерительных трансформаторов.

Векторные диаграммы первичных и вторичных напряжений трансформаторов напряжения. Первичные обмотки трансформаторов напряжений соединяют в звезду с заземленной нулевой точкой, вторичные обмотки соединяют в звезду с заземленной нулевой точкой и в разомкнутый треугольник, рис 2.23 а).

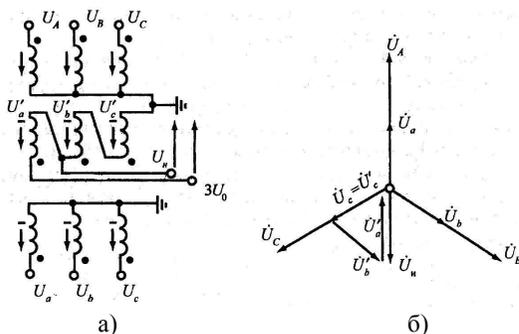


Рис.2.23. Векторная диаграмма трансформатора напряжения: а) схема трансформатора напряжения; б) векторная диаграмма напряжений.

Векторы первичных напряжений –  $U_A, U_B, U_C$ ; векторы вторичных напряжений –  $U_a, U_b, U_c$  совпадают по фазе с векторами первичных напряжений.

От центра звезды (точка нулевого потенциала) откладываем вектор  $U'_c$  - напряжение фазы С обмотки разомкнутого треугольника, который совпадает по фазе с вектором  $U_c$ . Начало вектора  $U'_b$  откладываем от конца вектора  $U'_c$ , а вектор  $U'_a$  от

конца вектора  $U_b^1$ . Конец вектора  $U_a^1$  совпадает с началом вектора  $U_c^1$ , т.е. напряжение на выходе обмотки разомкнутого треугольника при равенстве первичных напряжений равно нулю. К этой обмотке в сетях с изолированной нейтралью (6-35 кВ) подключают цепи защиты от замыкания на землю.

Первичные обмотки трансформаторов тока включают в силовые цепи, к вторичным подключают аппаратуру защиты или измерений. Схемы соединений вторичных обмоток трансформаторов тока определяются общей схемой защиты.

На рис 2.24 приведена схема соединения вторичных обмоток трансформаторов тока в звезду (рис. 2.24а), на (рис. 2.24в) векторная диаграмма первичных и вторичных токов для нормального режима или трехфазного симметричного короткого замыкания. Первичные токи отображаются векторами  $I_A, I_B, I_C$  сдвинутыми на угол 120 град. Вторичные токи  $I_a, I_b, I_c$  совпадают по фазе с вторичными токами.

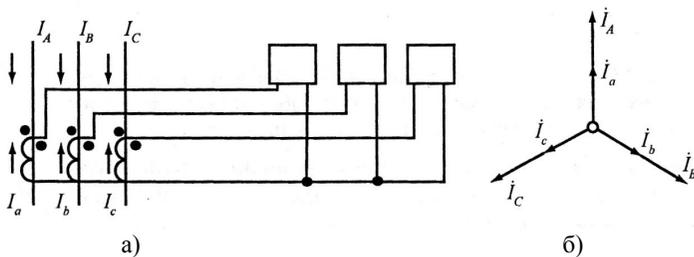


Рис.2.24. Соединение трансформаторов тока в звезду: а- схема соединения, б- векторная диаграмма.

### 2.3.5. Снятие векторных диаграмм.

Снятие векторных диаграмм позволяет определить значения и угловые характеристики векторных величин. Это бывает необходимо, например, для проверки правильности включения щитовых ваттметров, счетчиков электроэнергии, автоматических регуляторов напряжения и пр. Положение векторов напряжений и токов определяется относительно известных “опорных векторов”, в качестве которых обычно используется симметричная трехфазная система линейных или фазных напряжений. Соответствующие измерения производятся с помощью фазометров, ваттметров, вольтметров, вольтамперфазометров.

#### 2.3.5.1. Векторная диаграмма токов.

Измеряют значение тока, которое должно быть не менее 20...30% номинального. При измерении однофазным *фазометром* «начало» обмотки напряжения (вывод, обозначенный звездочкой), подключают к фазе А, «конец» – к нулевому проводу. Токтовую обмотку включают последовательно с нагрузкой, звездочкой – со стороны источника питания. Считывают измеренное значение угла и под этим углом к вектору напряжения  $U_A$  откладывают в принятом масштабе вектор тока  $I_A$ : в сторону отставания по фазе (вправо), если угол положительный, в сторону опережения (влево) – если он отрицательный. Аналогично строят векторы токов  $I_B$  и  $I_C$ .

При измерении *вольтамперфазометром* в качестве опорного принимают вектор линейного напряжения  $U_{AB}$ , от которого и отсчитывают угол: по часовой стрелке при

индуктивной нагрузке (отставание), против – при емкостной. Значение угла считают по лимбу, ток измеряют с помощью клещевой приставки.

При измерении однофазным *ваттметром* токовую обмотку включают последовательно с нагрузкой в цепь фазы А. Начало обмотки напряжения подключается поочередно на фазные напряжения, конец ее – к нулевому проводу. Далее на векторах фазных напряжений откладывают в выбранном масштабе отрезки, пропорциональные измеренным значениям мощностей с учетом их знаков, например  $P_A$  и  $-P_C$  на рис.2.25,а. Если теперь из концов этих отрезков восставить перпендикуляры, то точка пересечения последних обозначит конец вектора тока  $I_A$  (отрезок  $P_A$  на вектор  $U_B$  не нанесен, чтобы не осложнять чертеж). Аналогичным построением находят векторы токов  $I_B$  и  $I_C$  в цепях фаз В и С.

Фазовый сдвиг между током и напряжением можно, разумеется, определить и с помощью *осциллографа*.

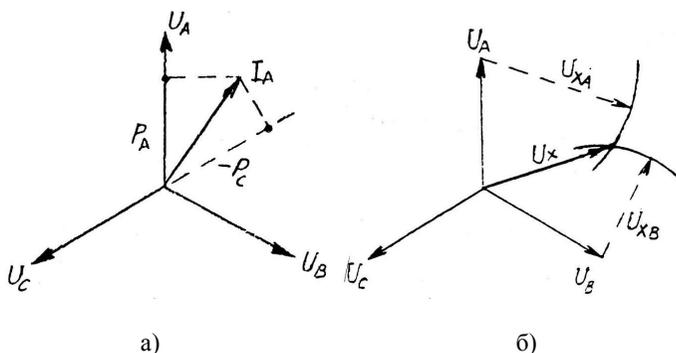


Рис.2.25. Снятие векторных диаграмм тока и напряжения: а – построение вектора тока фазы А; б – определение неизвестного вектора напряжения

### 2.3.5.2. Векторная диаграмма напряжений.

Векторную диаграмму неизвестной системы напряжений проще всего снять с помощью вольтметра, если только неизвестная система имеет общую точку с системой опорных напряжений. На рис.2.25,б показан пример построения вектора неизвестного напряжения  $U_X$ . С этой целью поочередно измеряются напряжения  $U_{XA}$ ,  $U_{XB}$  и  $U_{XC}$  между выводом X источника неизвестного напряжения и выводами опорной системы напряжений фаз А, В и С. Далее из концов векторов напряжений  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_C$  опорной системы проводятся дуги окружностей радиусами, численно равными в принятом масштабе измеренным напряжениям (на рис.2.25,б показаны два из них). Точка пересечения этих дуг будет концом вектора напряжения  $U_X$ , началом которого является общая точка обеих систем. При необходимости аналогичным образом могут быть построены другие вектора неизвестной системы.

## 2.4. Испытание электрической изоляции.

### 2.4.1. Характеристики изоляции как диэлектрика

Электрическая изоляция характеризуется, в основном, сопротивлением постоянному току, диэлектрическими потерями и электрической прочностью. Эквивалентная электрическая схема замещения изоляции как диэлектрика может быть представлена параллельным соединением конденсаторов и резисторов (рис. 2.26).

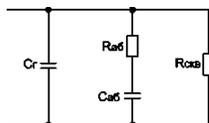


Рис. 2.26. Схема замещения электрической изоляции:

$C_{\Gamma}$  — геометрическая емкость;  $C_{аб}$  и  $R_{аб}$  — емкость и активное сопротивление абсорбционной ветви;  $R_{скв}$  — сопротивление изоляции установившемуся постоянному току

Входной ток в этой схеме является суммой трех составляющих:

а) емкостной ток  $I_{\Gamma}$  обусловлен так называемой геометрической емкостью  $C_{\Gamma}$ , имеет импульсный характер и зависит от геометрических размеров изоляции;

б) ток абсорбции  $I_{аб}$  отражает процесс заряда слоев диэлектрика; с увлажнением изоляции сопротивление  $R_{аб}$  снижается, а емкость  $C_{аб}$  возрастает, поскольку уменьшается толщина сухого слоя изоляции;

в) ток сквозной проводимости  $I_{скв}$ , или ток утечки через сопротивление  $R_{скв}$ , которое обусловлено как наружным загрязнением изоляции, так и наличием в ней путей сквозной утечки.

При приложении к изоляции постоянного напряжения вначале появляется бросок тока заряда геометрической емкости, затем — абсорбционной емкости. По мере заряда емкостей ток  $I_{\Gamma}$  быстро прекращается, а ток  $I_{аб}$  спадает сравнительно медленно. Третья составляющая тока остается неизменной и значение ее определяется только активным сопротивлением изоляции  $R_{из} = R_{скв}$ .

Диэлектрические потери создаются в основном абсорбционным током (ток заряда геометрической емкости быстро затухает, а сквозной ток сравнительно невелик). По значению этих потерь можно судить о надежности изоляции при нагреве, ее старении и увлажненности.

На рис.2.27 представлена векторная диаграмма токов в схеме рис.2.26, включенной на переменное синусоидальное напряжение. Потери активной мощности в изоляции  $P = UI \cos \varphi$ . Но так как угол  $\varphi$  близок к  $90^{\circ}$ , можно считать, что  $\cos \varphi = \operatorname{tg} \delta$  и мощность  $P = UI \operatorname{tg} \delta$  пропорциональна тангенсу угла диэлектрических потерь  $\delta$ , дополняющему угол фазного сдвига  $\varphi$  до  $90^{\circ}$ . При отсутствии потерь, в идеальном диэлектрике угол  $\varphi = 90^{\circ}$  и, стало быть,  $\delta = 0$  и  $\operatorname{tg} \delta = 0$ .

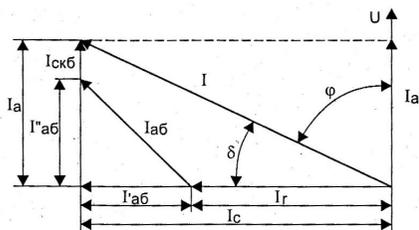


Рис.2.27. Векторная диаграмма токов в изоляции

Из диаграммы рис.2.27 видно, что показатель  $\operatorname{tg} \delta$  можно выразить как отношение активной составляющей  $I_a$  полного тока  $I$  к его емкостной составляющей  $I_c$  (в процентах):

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_c \cdot 100\%.$$

Увлажнение и другие дефекты изоляции вызывают увеличение активной составляющей тока  $I_a$ , диэлектрических потерь и  $\operatorname{tg} \delta$ . Поскольку при этом активная составляющая растет быстрее, чем емкостная, этот показатель отражает изменение состояния изоляции и потери в ней. Вместе с тем он определяет лишь общую, усредненную характеристику изоляции, тогда как местные и сосредоточенные дефекты в изоляции большого объема измерением  $\operatorname{tg} \delta$  обнаруживаются плохо.

В упрощенном виде эквивалентная схема замещения электрической изоляции может быть представлена в виде параллельного или последовательного соединения активного  $R_{из}$  и емкостного  $X_{из} = 1/\omega C_{из}$  сопротивлений. Тангенс угла диэлектрических потерь можно рассчитать как

$$\operatorname{tg} \delta = R_{из}/X_{из} = \omega R_{из}C_{из}.$$

*Электрическая прочность* изоляции испытывается приложением повышенного напряжения. Кратность испытательного напряжения по отношению к номинальному устанавливается в зависимости от рода электроустановки. Изоляция считается выдержавшей испытание, если в этот период не происходило пробоев, выделений газа или дыма, нагрева изоляции, резкого снижения напряжения или возрастания тока через изоляцию. Согласно ПУЭ, испытания проводятся как переменным напряжением, так и постоянным (выпрямленным) напряжением. При этом под переменным напряжением понимается действующее значение напряжения переменного тока частотой 50 Гц, практически синусоидальной формы, под постоянным — напряжение постоянного тока или напряжение выпрямленного тока с содержанием пульсаций не более 10% действующего значения (1.1.16, 1.8.12). Испытание изоляции напряжением промышленной частоты, равным 1 кВ, может быть заменено измерением одноминутного значения сопротивления изоляции мегаомметром на 2500 В (1.8.11). Эта замена не допускается при испытании цепей релейной защиты и автоматики.

Требования к изоляции высоковольтного силового оборудования подстанций рассмотрены в соответствующих разделах (гл.3,4,5).

Сопrotивление изоляции электрических *аппаратов* и *вторичных цепей* защит, управления, сигнализации и измерения должно быть не менее значений, приведенных в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Допустимые значения сопротивления изоляции вторичных цепей

Испытуемый элемент	Напряжение мегаомметра, В	Наименьшее допустимое сопротивление изоляции, МОм
1. Шины постоянного тока на щитах управления и в распределительных устройствах (при отсоединенных цепях)	500-1000	10
2. Вторичные цепи каждого присоединения и цепи питания приводов и разъединителей <sup>1</sup>	500-1000	1
3. Цепи управления, автоматики, защиты и измерений, а также цепи возбуждения машин постоянного тока, присоединенные к силовым цепям	500-1000	1
4. Вторичные цепи и элементы при питании от отдельного источника или через разделительный трансформатор на напряжение 60 В и ниже <sup>2</sup>	500	0,5
5. Электропроводки, в том числе осветительные сети <sup>3</sup>	1000	0,5
6. Распределительные устройства <sup>4</sup> , щиты и токопроводы (шинопроводы)	500-1000	0,5

<sup>1</sup> Измеряется со всеми присоединенными аппаратами.

<sup>2</sup> Должны быть приняты меры для предотвращения повреждения низковольтных элементов.

<sup>3</sup> Измеряется между каждым проводом и землей и каждой парой проводов.

<sup>4</sup> Каждая секция.

## 2.4.2. Измерение сопротивления изоляции.

### 2.4.2.1. Применение мегаомметров.

Сопротивление изоляции обесточенных цепей и аппаратов производится *мегаомметрами* — специализированными переносными омметрами, предназначенными для измерения больших сопротивлений. Другой отличительной особенностью мегаомметров является сравнительно высокое значение напряжения, подаваемого на измерительную цепь.

Выпускаются мегаомметры на номинальное напряжение 100, 250, 500, 1000 и 2500 В. Эти значения относятся к напряжению холостого хода, т. е. напряжению на разомкнутых зажимах прибора (ЭДС). Напряжение, приложенное к нагрузке, всегда меньше номинального из-за падения напряжения на внутреннем сопротивлении прибора, которое может быть достаточно большим. Действительно, все мегаомметры снабжаются выходным добавочным резистором, ограничивающим ток нагрузки до безопасного значения, — безопасного как для прибора, даже при КЗ на его зажимах, так и для человека при случайном прикосновении к ним. Так, например, при ограничивающем сопротивлении  $R_{ог} = 1$  МОм максимальный ток мегаомметра на 1000 В не превысит 1 мА: повреждения прибора он не вызовет, а человеком только ощущается. Если таким мегаомметром измеряется, например, сопротивление изоляции, равное 1 МОм, то напряжение на нем составит только половину номинального — 500 В, а на теле человека, прикоснувшегося к зажимам прибора, не более нескольких вольт. Зависимость выходного напряжения ( $U$ , в процентах номинального) мегаомметра от сопротивления нагрузки ( $R$ , в процентах от конечного значения рабочей части шкалы) для мегаомметров типа М4100 показана на рис. 2.28.

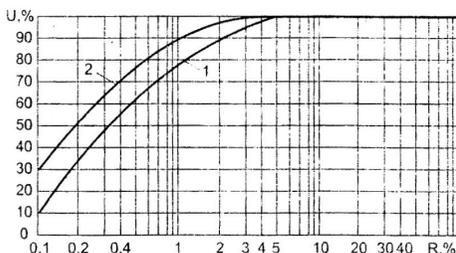


Рис. 2.28. Нагрузочные характеристики мегаомметров серии М4100: 1 — М4100/1...М4100/4; 2 — М4100/5

Однако мегаомметр вовсе не является безопасным прибором, как можно было бы заключить из сказанного выше о *непосредственном* прикосновении к его зажимам. Напротив, если от мегаомметра заряжена емкость (электрический кабель, конденсатор), то она будет представлять собой источник ЭДС, значение которой равно номинальному напряжению мегаомметра, а поскольку внутреннее сопротивление такого источника сравнительно невелико, разряд емкости на человека может привести к тяжелым последствиям. Поэтому Правила безопасности требуют перед началом измерения мегаомметром и после измерения снять с токоведущих частей объекта остаточный заряд путем их кратковременного заземления (на 2...3 мин). Заземлять объект перед измерением надо еще и потому, что остаточный заряд может исказить результаты измерения; снимать заземление следует только после подключения мегаомметра. При измерениях необходимо пользоваться штатными проводами, входящими в комплект поставки, или гибкими многожильными проводами с усиленной изоляцией (например, типа ПВЛ), концы которых присоединены к щупам с изолирующими ручками.

Электрическая прочность и сопротивление изоляции измеряются между электрически не связанными или разъединяющимися цепями, а также между токоведущими и открытыми проводящими частями (корпусом) электрооборудования. Цепи, содержащие микроэлектронные и полупроводниковые элементы, испытательное напряжение которых ниже приложенного, следует исключить: отсоединить, выпаять или шунтировать. Если номинальное напряжение мегаомметра ниже, чем испытательное для полупроводниковых элементов цепи, сопротивление изоляции цепи измеряют дважды — при различной полярности измерительного напряжения.

На кабеле измеряют сопротивление каждой жилы относительно остальных заземленных. Если при этом получается неудовлетворительный результат, проверяют сопротивление изоляции между каждыми двумя фазами и каждой фазой относительно земли.

#### **2.4.2.2. Устройство и принцип действия мегаомметров.**

Мегаомметр состоит из источника напряжения, измерительного элемента и дополнительных резисторов. В качестве источника напряжения *индукторных* приборов применяется встроенный электромашинный генератор постоянного тока или генератор переменного тока с выпрямителем. Индуктор приводится во вращение рукояткой, причем номинальное напряжение (ЭДС) генератора достигается при частоте вращения 120 об/мин; небольшое отклонение от этого значения компенсируется центробежным регулятором. В *электронных* приборах источником напряжения служит преобразователь, питающийся от сети или от химического источника. Если выход измерительного элемента зависит от напряжения питания, источник напряжения дополняется стабилизатором.

В измерительных элементах мегаомметров сопротивление изоляции определяется с использованием закона Ома. По типу преобразования измерительные элементы могут быть линейными, логометрическими, логарифмическими. В качестве измерительного элемента в *последовательной* схеме рис. 2.29.а служит вольтметр  $V$ , измеряющий падение напряжения  $U_0$  на образцовом резисторе  $R_0$  от измерительного тока. Разумеется, значение последнего зависит не только от измеряемого сопротивления, но и от напряжения питания  $U$ , и потому приборы такого типа снабжаются стабилизаторами (регуляторами) напряжения.

По последовательной схеме измерения построены мегаомметры серии Ф4102. Питание — от сети или от химических источников тока. Для получения оперативного напряжения нужного значения служит преобразователь, выходное напряжение которого выпрямляется, повышается с помощью умножителя и стабилизируется с помощью компенсационного стабилизатора. В качестве индикаторного прибора применен микроамперметр с электрической установкой нуля.

У измерителей *логометрической* системы на одну из рамок логометра подается напряжение измерительной цепи, на другую — напряжение, пропорциональное измеряемому току. Частное от деления пропорционально измеряемому сопротивлению и от колебаний напряжения не зависит. На этом принципе построена схема мегаомметра типа М1101.

*Логарифмические* схемы измерения (рис. 2.29,б) содержат два операционных измерителя ( $DA_1$  и  $DA_2$ ) с логарифмической характеристикой, разность выходных сиг-

налов которых пропорциональна логарифму измеряемой величины в соответствии с равенством:

$$\ln R = \ln U/I = \ln U - \ln I.$$

Логарифмическая характеристика обеспечивается посредством диодов  $VD_1$  и  $VD_2$  в цепях обратной связи усилителей  $DA_1$  и  $DA_2$ . Показания прибора А от напряжения не зависят; шкала прибора — логарифмическая.

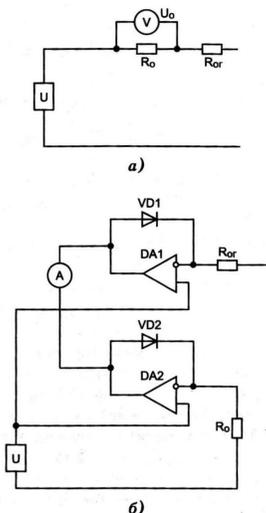


Рис. 2.29. Принципиальные схемы измерительных элементов мегаомметров: а — последовательная; б — логарифмическая

На этом принципе основана работа мегаомметров типа ЭСО. Питание приборов — от сети или от встроенного электромеханического генератора; частота вращения рукоятки 120...144 об/мин, класс точности 15.

Более подробные технические данные мегаомметров типов Ф410Х и ЭС0202 приведены в табл. 2.2.

Современные приборы содержат микропроцессор, цифровой дисплей и выполняются многофункциональными; название «мегаомметр» за ними часто не сохраняется, поскольку измерение сопротивления изоляции является лишь одной из их функций. Российская фирма НПФ «Радио-Сервис» поставляет измеритель сопротивления и степени увлажненности изоляции типа Е6-24, которым можно измерить также напряжение переменного тока до 400 В. При измерении сопротивления изоляции в течение 1 мин и более прибор автоматически рассчитывает коэффициент абсорбции и сохраняет полученное значение. В памяти прибора хранятся также результат последнего измерения и значения сопротивления изоляции через 15 и 60 с после начала измерения. Все эти параметры можно последовательно вывести на дисплей.

Основные данные мегаомметров типов Ф41ХХМ и ЭС0202

Характеристика	Тип мегаомметра					
	Ф4102М/1	Ф4102М/2	Ф4108М/1	Ф4108М/2	ЭС0202/1	ЭС0202/2
Источник питания	Химич., сеть	Химич., сеть	Химич., сеть	Сеть	Генератор, сеть	Генератор, сеть
Ток КЗ, мА	0,5	0,5	1,0	1,0	0,3	0,3
Измерительн. элемент	Логариф- мический	Логариф- мический	Линейный	Линейный	Логариф- мический	Логариф- мический
Номинальное напряжение, В	100, 500, 1000	1000, 2500	1000,2500	1000,2500	100,250, 500	500,1000, 2500
Масса, кг	2,1	2,1	2,5	3,2	2,0	2,0

Прибор снабжен системой защиты от подключения к цепи, находящейся под напряжением, или от внезапной подачи напряжения в цепь во время измерения. Питание прибора осуществляется как от аккумуляторной батареи, так и от сети переменного тока. Прибор автоматически переходит в энергосберегающий режим через 2,5 мин после окончания измерений. В комплект поставки входят измерительные провода на напряжение до 2,5 кВ, аккумулятор и стандартное зарядное устройство к нему. Номинальное напряжение 500, 1000 и 2500 В, верхний предел измерения сопротивления 10 ГОм, масса не более 1,2 кг.

Аналогичные характеристики имеют мегаомметры М4122.

Практичный и недорогой прибор предлагает фирма «MEGGER» (Англия). Он предназначен для измерения сопротивления до 1000 МОм под напряжением 250, 500 и 1000 В, а также для измерения сопротивления металlosвязи током не менее 200 мА.

#### **2.4.2.3. Приборы фирмы «SONEL» (Польша).**

Эти приборы осуществляют измерение сопротивления изоляции путем подачи на проверяемый объект повышенного напряжения постоянного тока, определения протекающего в измерительной цепи тока и последующего вычисления микропроцессором значения сопротивления. Они рассчитывают также коэффициент абсорбции, измеряют напряжение постоянного и переменного тока, обеспечивают автоматический разряд емкости объекта после окончания измерений.

Измеритель МС-3 позволяет измерять сопротивление изоляции до 3 ГОм при номинальном напряжении 250, 500 и 1000 В, сопротивление металlosвязи при токе до 200 мА и активное сопротивление до 400 Ом на низком напряжении.

Прибор МІС-5000 предназначен для проверки электроустановок большой мощности. Он измеряет сопротивление изоляции до 5000 ГОм при номинальном напряжении от 250 до 5000 В.

Ниже рассматривается проведение измерений мегаомметрами типа МІС –1000 и МІС-2500 (рис.2.30). Эти приборы предназначены для измерения сопротивления изоляции до 110 ГОм (МІС-1000) и 1100 ГОм (МІС-2500), напряжения постоянного и переменного тока до 600 В и измерения сопротивления на постоянном токе до 200 мА. Обеспечивается запоминание 999 результатов измерений и передача данных в компьютер.

До начала измерений необходимо выбрать нужную измерительную функцию и проверить, правильно ли присоединены провода к зажимам прибора, а также убедиться в том, что проверяемый объект отключен от напряжения.

На рис. 2.31 показано подключение прибора для измерения сопротивлений по двухзажимной схеме.

Однако надо иметь в виду, что ток утечки изоляции складывается из тока



Рис. 2.30. Внешний вид прибора МІС-2500

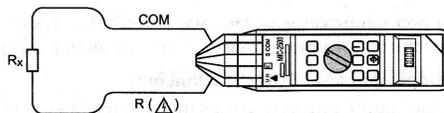


Рис. 2.31. Измерение активных сопротивлений

через изоляционный материал, и тока, протекающего по его поверхности. И если первая составляющая зависит от состояния собственно изоляции как диэлектрика (которое и должно характеризоваться измеряемыми параметрами), то вторая — от чистоты и влажности ее поверхности. Чтобы исключить влияние токов утечки по поверхности изоляции, особенно при работе в сырую погоду, мегаомметр подключают к объекту с использованием зажима «экран» (гнездо E), то есть по трехзажимной схеме.

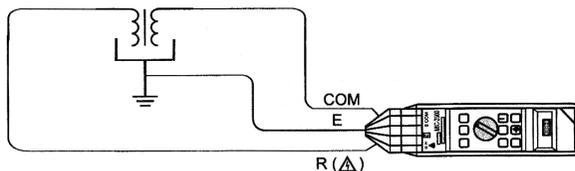


Рис.2.32. Измерение сопротивления изоляции обмотки трансформатора по трехзажимной схеме.

В такой схеме токи утечки по поверхности отводятся в землю, минуя измерительный элемент прибора. Трехзажимную схему часто используют при измерении сопротивления изоляции трансформаторов (рис. 2.32) и кабелей (рис.2.33).

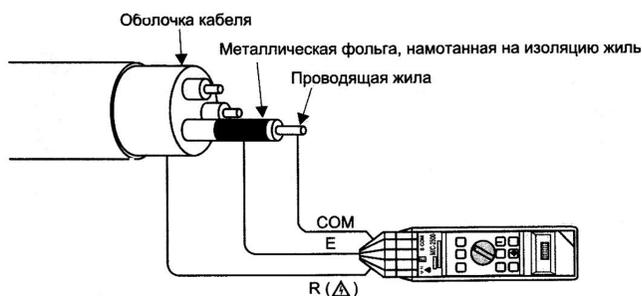


Рис. 2.33. Измерение сопротивления изоляции кабеля по трехзажимной схеме

### 2.4.3. Определение увлажненности изоляции.

Влажность изоляции можно характеризовать изменением сопротивления изоляции постоянному току после приложения к ней постоянного напряжения. Численно эту характеристику принято оценивать *коэффициентом абсорбции*

$$K_{аб} = R_{60}/R_{15},$$

где  $R_{60}$  и  $R_{15}$  – значения сопротивления изоляции, измеренные мегаомметром соответственно через 60 и 15 с после приложения напряжения. Для влажной изоляции этот коэффициент близок к 1, у сухой может достигать 2 и сильно зависит от температуры. При температуре ниже  $10^{\circ}C$  коэффициент абсорбции не измеряется.

*Емкостные методы.* Метод *емкость – температура* был предложен Московским трансформаторным заводом. Он основан на том, что емкость увлажненной изоляции с повышением температуры растет, сухой – почти не изменяется. О состоянии изоляции судят по отношению  $C_{70}/C_{20}$ , где  $C_{70}$  и  $C_{20}$  – значения емкости, измеренные при температуре изоляции 70 и  $20^{\circ}C$  соответственно.

Оценка влажности по *емкости и частоте*. Емкость изоляции не только зависит от влажности, но и проявляется по-разному при различных частотах приложенного на-

пряжения в связи с процессами медленной поляризации. Чем выше частота, тем в меньшей степени успевают развиваться эти процессы и тем меньше проявляется емкость. Принято сравнивать ее значения  $C_{50}$  и  $C_2$ , измеренные при частоте 50 и 2 Гц. На частоте 50 Гц успевает проявиться только геометрическая емкость, одинаковая при сухой и влажной изоляции. На частоте 2 Гц проявляется также и абсорбционная емкость, которая при влажной изоляции больше, чем при сухой. Для увлажненной изоляции отношение  $C_2/C_{50}$  приближается к 2, для сухой – близко к 1, отражает общее состояние изоляции и растет с повышением температуры.

В приборе ПКВ-13 это отношение измеряется с погрешностью до 6% при значении емкости в пределах 1000...100 000 пФ, меньше 1000 пФ – с значительно большей погрешностью.

Метод «емкость – время». Сущность метода заключается в определении прироста абсорбционной емкости в определенный промежуток времени, за который эта емкость успевает проявиться у влажной изоляции и не успевает – у сухой. В приборах типа ЕВ-3 предварительно заряженная от постороннего источника емкость изоляции присоединяется к эталонному конденсатору. Параметры схемы подобраны таким образом, что установившееся напряжение на нем пропорционально измеряемой емкости  $C$ . При кратковременном перезаряде и приросту емкости  $\Delta C$  за время  $t$  с определяется отношение  $\Delta C/C$ , которое не должно превосходить наибольшего допустимого значения для изоляции проверяемого объекта.

Метод обладает высокой чувствительностью к влажности изоляции, но может использоваться при температуре не ниже 10°C. Отношение  $\Delta C/C$  возрастает с увеличением влажности и температуры. Пересчет от температуры  $T_2$  к температуре  $T_1$  производится умножением отношения  $\Delta C/C$  на поправочный коэффициент.

Функции приборов ПКВ-13 и ЕВ-3 выполняет прибор ПКВ-7, а также более современные приборы типов МЕР-5СА, СА7 100 (Украина) и др.

Оценка влажности по коэффициенту нелинейности. Для увлажненной изоляции зависимость тока утечки от приложенного постоянного напряжения имеет нелинейный характер, обусловленный явлениями ионизации в ней. При увеличении напряжения ионизация и ток абсорбции резко возрастают. Одноминутные значения тока абсорбции измеряют при двух контрольных значениях напряжения  $0,5U_H$  и  $2 U_H$  и рассчитывают сопротивление изоляции для этих случаев как

$$R_{0,5} = 0,5 U_H / I_{0,5} \text{ и } R_2 = 2 U_H / I_2,$$

а увлажненность изоляции оценивают по коэффициенту нелинейности

$$K_{нл} = R_{0,5}/R_2.$$

Для практически неувлажненной изоляции  $K_{нл} \leq 2 \dots 3$ .

#### 2.4.4. Измерение диэлектрических потерь.

Для измерения  $\text{tg } \delta$  предназначены приборы МД-16, P5026, P595, построенные по схеме моста переменного тока (мост Шеринга) и являющиеся по существу измерителями емкости, а также более современные приборы на микропроцессорной основе. Принципиальная схема моста показана на рис.2.34.

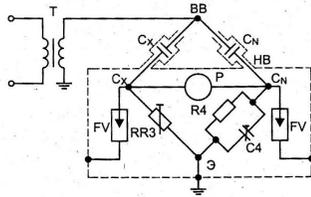


Рис.2.34. Принципиальная схема моста Шеринга

При равновесии моста обеспечивается равенство

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_x C_x = \omega R_4 C_4.$$

В мостах типа МД-16 принято  $R_4 = 10^4 / \pi = 3184$  Ом, а уравнивание моста достигается изменением емкости  $C_4$ ; при этом численно  $\operatorname{tg} \delta = C_4$  (мкФ).

Применяют две схемы измерения: нормальную, или прямую (рис.2.35,а), в которой измерительный элемент  $P$  включен между одним из электродов испытуемого диэлектрика  $C_x$  и землей, и перевернутую, или инверсную (рис.2.35,б), в которой измерительный элемент включен между электродом испытуемого объекта и выводом высокого напряжения моста. Нормальная схема применяется в случаях, когда оба электрода изолированы от земли, когда же один из электродов соединен с землей, применяют перевернутую схему. Необходимо иметь в виду, что в последнем случае отдельные элементы моста находятся под испытательным напряжением.

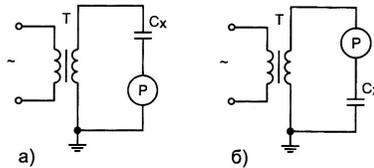


Рис.2.35. Измерение  $\operatorname{tg} \delta$  по нормальной (а) и перевернутой (б) схемам:  
 $C_x$  – объект ;  $P$  – мост;  $T$  – испытательный трансформатор

На высоком напряжении мосты используются с внешним образцовым воздушным конденсатором типа Р5023. В качестве источника напряжения до 10 кВ могут служить измерительные трансформаторы напряжения, например типа НОМ-10 или НОМ-6. Мост и необходимую аппаратуру размещают в непосредственной близости от испытуемого объекта и устанавливают ограждения, как, например, на рис.2.36. Провод, идущий от испытательного трансформатора  $T$  к образцовому конденсатору  $C_N$ , а также соединительные кабели моста  $P$ , находящиеся под высоким напряжением, должны быть удалены от заземленных предметов не менее чем на 100...150 мм. Повышающий трансформатор  $T$  и его регулирующее устройство ТАВ должны отстоять от моста не менее чем на 0,5 м. Корпуса моста, трансформатора и регулировочного устройства, а также один из выводов ВН трансформатора заземляют.

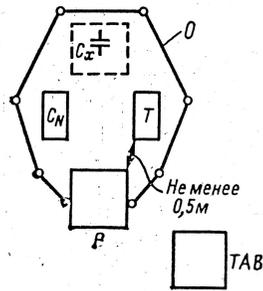


Рис.2.36. Расположение аппаратов при измерении  $\operatorname{tg} \delta$  мостами:  $C_x$  – объект измерения;  $C_N$  – образцовый конденсатор; Т – испытательный трансформатор; Р – мост; ТАВ – регулировочное устройство; О – ограждение

Электрические и магнитные поля могут оказывать существенное влияние на результат измерения. Это влияние частично можно учесть, повторив измерения четыре раза – при разных полярностях подаваемого испытательного напряжения и включения гальванометра. Наиболее эффективной мерой является рациональный подбор фаз питающего напряжения. Практически это удобно осуществить питанием схемы от той из фаз АВ, ВА; АС, СА или ВС, СВ, при которой результат минимален.

Для устранения поверхностных утечек тока на изоляцию накладывают охранное кольцо, соединяемое с экраном измерительного моста. В этом случае поверхностный ток утечки отводится непосредственно в землю и не влияет на результат измерения. Охранное кольцо выполняют из двух витков неизолированного провода и плотно накладывают на поверхность изолятора.

В новых современных измерителях показателя  $\operatorname{tg} \delta$ , построенных на базе микропроцессоров, большинство операций производится автоматически, благодаря чему измерения упрощаются, снижаются трудозатраты и обеспечивается точность результатов. Измеритель «Тангенс – 2000» (ФГУП «НИИЭМП») работает в диапазоне значений  $\operatorname{tg} \delta = 1 \cdot 10^{-5} \dots 1,0$ . Прибор обеспечивает автоматическую генерацию испытательного синусоидального напряжения от 1 до 10 кВ. Измерения могут производиться по «прямой» или «перевернутой» схеме. Результаты измерения отображаются на цифровом дисплее и могут передаваться в компьютер.

В состав измерительного комплекта входят: блок управления (масса 17 кг), блок преобразователя (7 кг), высоковольтный повышающий трансформатор (20 кг). За счет того, что частота испытательного напряжения отлична от промышленной, достигается автоматическая отстройка от помех. Не требуется дополнительное оснащение образцовым конденсатором, устройством регулирования напряжения, переключателем фаз. Процесс измерения осуществляется автоматически, с плавным подъемом и снятием напряжения.

Измеритель параметров изоляции (мост переменного тока) *ВЕКТОР – 2.0М* имеет измерительный блок, пульт дистанционного управления, зарядное устройство. Измеряются тангенс угла диэлектрических потерь (от  $10^{-5}$  до 100%), емкость (10 пФ

...1 мкФ), ток (2 мкА...5 А), угол сдвига фаз ( $-180^\circ$  ... $+180^\circ$ ), напряжение, а также параметры трансформатора, включая векторные.

Измеритель защищен от всех видов помех, управление осуществляется по инфракрасному каналу через пульт дистанционного управления; связь с компьютером – по инфракрасному каналу, электропитание – от встроенного аккумулятора или от сети 220 В; масса не более 6 кг.

*Мост СА7100* (Украина) содержит блок управления и измерительный блок. Управление мостом и выбор пределов измерения осуществляются автоматически. Мост имеет встроенный образцовый конденсатор. Комплектуется высоковольтным экранированным кабелем, что упрощает процесс измерений по «перевернутой» схеме. Применение волоконно – оптического кабеля для связи блока управления моста с его измерительным блоком повышает электробезопасность персонала и помехозащищенность измерений. После подачи измерительного напряжения все процессы реализуются автоматически. Кроме  $\operatorname{tg} \delta$ , измеряются также емкость, напряжение и частота.

Управление мостом осуществляется либо посредством клавиатуры, с выводом результатов измерения на двухсторонний ЖК дисплей, либо с помощью манипулятора «мышь» и передачей данных на экран ПК. Частота рабочего напряжения – от 48,7 до 81,2 Гц, пределы измерения  $\operatorname{tg} \delta$  – от 0 до 1,0. Обеспечивается автоматическое подавление «токов влияния» путем смены фазы питающего напряжения. Масса измерительного блока 14 кг, блока управления – менее 1 кг. Мост сертифицирован и внесен в Госреестр РФ. Цена – около 300 000 руб.

#### **2.4.5. Испытание электрической прочности изоляции приложением повышенного напряжения.**

##### ***2.4.5.1. Электрические аппараты, вторичные цепи и электропроводки со всеми присоединительными аппаратами (автоматические выключатели, магнитные пускатели, контакторы, реле, приборы и т. п.) испытываются приложением напряжения 1 кВ промышленной частоты в течение 1 мин.***

Испытательное напряжение получают с помощью повышающих трансформаторов малой мощности, например, измерительных трансформаторов напряжения НОМ-3 или НОМ-6 (номинальное напряжение 3 или 6 кВ), регулируемых автотрансформаторами или потенциометрами. Поскольку при наладке эти испытания приходится проводить достаточно часто, целесообразно собрать постоянную схему испытательного устройства, как, например, на рис. 2.37.

Устройство питается от сети напряжением 220 В, которое подается выключателем SF; при этом загорается сигнальная лампа НЛ. Включение высокого напряжения производится кнопкой SB. Реле KL, сработавшая, включает реле времени КТ1 с уставкой 3 с. По истечении этого времени оператору нет необходимости касаться корпуса устройства, дальнейшая работа которого происходит автоматически: через контакт КТ1.1 включается пусковое реле KM и своим контактом KM.4 подает напряжение на повышающий трансформатор Т. Через контакт KM.3 реле становится на «самоподхват» и удерживается во включенном положении, а контактом KM1.1 подается напряжение на динамик НА, сигнализирующий о наличии высокого напряжения. Контакт KM.2 включает реле времени КТ.2, и через 60с его контакт КТ2.1 размыкает цепь реле KM и схема отключается от напряжения. Защита от пробоя или перегрузки осуществляется с помощью датчика тока ВА и реле КА.

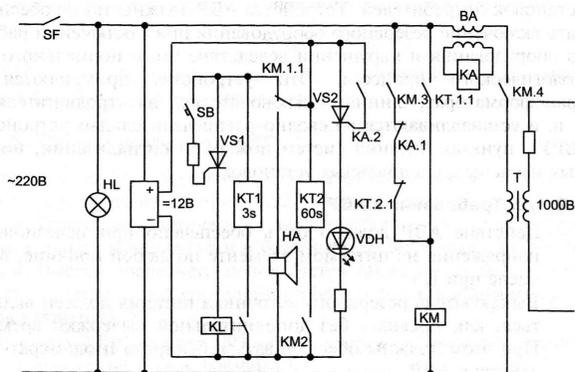


Рис. 2.37. Принципиальная схема устройства для получения напряжения 1000 В, 50 Гц.

#### 2.4.5.2. Испытание изоляции электрооборудования первичных цепей повышенным напряжением переменного тока промышленной частоты.

Высоковольтное электрооборудование подстанций испытывается напряжением переменного тока и напряжением постоянного (выпрямленного) тока. Испытательное напряжение превышает рабочее, что позволяет обнаружить скрытые дефекты изоляции объекта, которые при эксплуатации могли бы привести к выходу его из строя. Нормированные ПУЭ значения испытательного напряжения устанавливаются обычно на 10...15% ниже, чем при испытаниях на заводе-изготовителе, чтобы незначительные повреждения не развивались до опасных. С той же целью ограничивается время испытания. Испытания повышенным напряжением не допускаются при наличии видимых дефектов изоляции, загрязнении или увлажнении поверхности объекта.

Принципиальная схема установки для испытания повышенным (выше 1кВ) напряжением переменного тока промышленной частоты показана на рис.2.38. Автоматический выключатель SF предназначен для включения питания установки и быстрого отключения его при пробое или перекрытии изоляции. Уставка срабатывания его выбирается выше, чем ток потребления из сети, но не более чем в два раза. Автотрансформатор TUV служит для плавного подъема и снижения напряжения повышающего трансформатора TL, выключатель с видимым разрывом S (рубильник) исключает возможность случайной подачи напряжения на трансформатор. На выходе схемы установлен разрядник F для защиты от недопустимого повышения испытательного напряжения. Резистор R1 служит для ограничения тока испытательного трансформатора, резистор R2 – для защиты поверхности шаров от оплавления.

Кривая испытательного напряжения должна быть синусоидальной. Для исключения высших гармонических в питающем напряжении, которые могут привести к перенапряжением, установку желательно включать на линейное напряжение сети, так как наиболее опасная третья гармоника в нем отсутствует. Измерять напряжение удобно вольтметрами электромагнитной или электродинамической системы, с по-

грешностью не более 3%. Для контроля формы кривой напряжения можно воспользоваться амплитудным вольтметром, показания которого, деленные на  $\sqrt{2}$ , не должны отличаться от показаний измерительного вольтметра более чем на 7%.

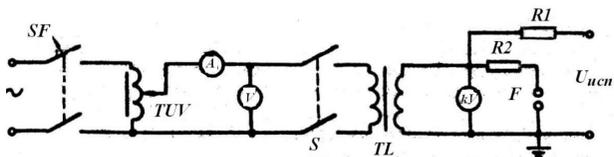


Рис.2.38. Принципиальная схема установки для испытания изоляции повышенным напряжением промышленной частоты

Мощность испытательного трансформатора определяется преимущественно реактивной мощностью, обусловленной емкостью объекта испытания:

$$S \geq U_{исп} I_c = U_{исп}^2 \omega C \cdot 10^{-9},$$

где  $S$  – мощность испытательного трансформатора, кВ·А;

$U_{исп}$  – испытательное напряжение, кВ;

$I_c$  – емкостный ток, А;

$\omega$  – угловая частота испытательного напряжения, рад/с;

$C$  – емкость объекта, пФ;

ориентировочно емкость отдельных объектов может составлять, пФ;

силовые трансформаторы – 1000 ... 10000;

вводы трансформаторов и масляных выключателей – 100...500;

трансформаторы напряжения и тока – 100...1000.

Могут быть применены специализированные испытательные трансформаторы, измерительные трансформаторы и силовые трансформаторы небольшой мощности. Расчетная мощность трехфазного силового трансформатора равна 1/3 номинальной при использовании напряжения одной фазы и 2/3 при использовании двух фаз. Допускается перегрузка по току до трехкратной номинальной, ограничиваемая нагревом. Измерительные трансформаторы типа НОМ могут быть перевозбуждены на 30...50% по напряжению при токе, допустимом по условиям нагрева.

Регулирующее устройство должно обеспечивать изменение испытательного напряжения в полном диапазоне. Ступени регулирования не должны превышать 1,5% испытательного напряжения. Регулирование должно быть плавным, без разрывов цепи. Скорость подъема напряжения до 25...30% может быть произвольной, выше – такой, чтобы обеспечить удобство отсчета по измерительным приборам и избежать резких бросков тока, например 1кВ/с. Снижение напряжения также производится плавно, ниже 25...30% допускается сброс.

Конструкция разрядника представляет собой два латунных шара, один из которых закреплен неподвижно, а другой может перемещаться по направляющим основания. Необходимое напряжение пробоя зависит от расстояния между шарами, которое мо-

жет регулироваться с помощью микрометрического винта. Сопротивление резистора R2 принимается в пределах  $1 \dots 10 \text{ Ом/В}$ , резистора R1-  $1 \dots 2 \text{ Ом/В}$ .

#### **2.4.5.3. Испытание повышенным напряжением постоянного тока.**

Применение переменного тока для испытаний повышенным напряжением ограничивается тем обстоятельством, что при большой емкости испытываемого объекта потребная мощность испытательного трансформатора резко возрастает и установка становится чрезмерно громоздкой, нетранспортальной.

Так, для испытания повышенным напряжением  $U_{\text{исп}} = 42 \text{ кВ}$  промышленной частоты ( $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $\omega = 2\pi f = 314/\text{с}$ ) трансформатора тока на  $10 \text{ кВ}$  при  $C = 10^3 \text{ пФ}$  потребуются сравнительно небольшая мощность  $S = 42^2 \cdot 314 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9} = 0,55 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ , для силового трансформатора может потребоваться на порядок большее значение мощности, а для кабелей, разрядников – еще больше.

Поэтому для таких объектов ПУЭ предусматривается испытание повышенным напряжением постоянного (выпрямленного) тока, требующее гораздо меньшей мощности. Например, при испытании выпрямленным напряжением  $U_{\text{исп}} = 60 \text{ кВ}$  и с учетом того, что сквозной ток утечки  $I_{\text{ут}}$  неповрежденной изоляции обычно не превышает  $1 \text{ мА}$ , получим:

$$P = U_{\text{исп}} I_{\text{ут}} = 60 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 60 \text{ Вт.}$$

Хотя по ряду причин (намагничивание сердечника постоянной составляющей, наличие переменной составляющей тока и др.) мощность испытательного трансформатора выбирается значительно больше расчетной, она, как правило, не превышает нескольких киловатт. Еще одним преимуществом использования постоянного тока является возможность измерения тока утечки, значение которого служит одним из критериев оценки состояния изоляции.

Выпрямление чаще всего осуществляется по однополупериодной схеме, как самой простой. В этом случае схема получения высокого напряжения переменного тока дополняется выпрямителем, и тогда оба рода испытаний (постоянным или переменным напряжением) могут осуществляться одним агрегатом. В качестве выпрямителя служит высоковольтный вентиль, состоящий из ряда соединенных последовательно кремниевых диодов. Число диодов определенного класса по напряжению выбирается с учетом того, что обратное напряжение на вентиле достигает  $2U_m$ . Равномерное распределение этого напряжения по отдельным диодам обеспечивается либо шунтированием их резисторами или конденсаторами, либо применением лавинных диодов.

При включении такой схемы на активную нагрузку выходное напряжение и ток нагрузки будут представлять собой положительные полусинусоиды (рис.2.39,а); в отрицательные полупериоды ток отсутствует. При этом среднее значение выходного напряжения будет:

$$U_{\text{ср}} = U_m / \pi = 0,45U_m,$$

где  $U_m$  – амплитуда вторичного напряжения испытательного трансформатора,  $U$  – его действующее значение.

Однако на практике в цепи нагрузки всегда имеется емкость (самого объекта, подводящих проводов и др.), которая в положительный полупериод заряжается, а в отрицательный разряжается по закону экспоненты, поддерживая напряжение и ток нагрузки и повышая их среднее значение (рис.2.39,б). Когда же нагрузка содержит большую емкость (например, кабель большой длины), выпрямленное напряжение сглаживается и приближается по форме к постоянному, а его среднее значение – к амплитудному:  $U_{cp} \approx U_m$  (рис.2.39,в).

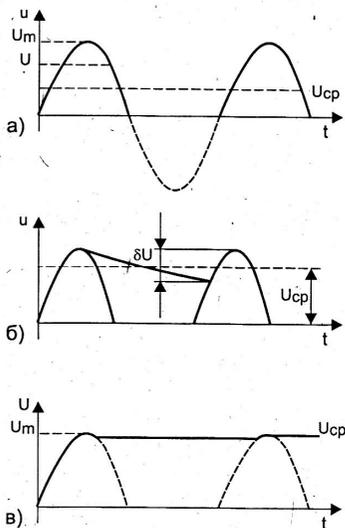


Рис.2.39. Форма кривой выпрямленного однополупериодного напряжения при нагрузке: а – активной; б, в – емкостной

Абсолютное значение пульсации напряжения  $\Delta U$  можно рассчитать по приближенной формуле

$$\Delta U \approx I_{VT} / Cf,$$

где  $f$  – частота питающего напряжения.

Соответственно относительное значение этой величины, называемое коэффициентом пульсации, будет:

$$K_{п} = 100 \frac{\Delta U}{U_m} \% = \frac{100}{RCf} \%,$$

где  $R = U_m / I_{VT}$  – эквивалентное сопротивление цепи нагрузки, в основном, активное сопротивление изоляции. Коэффициент пульсации тем меньше, чем больше активное сопротивление и емкость изоляции, или постоянная времени  $T = RC$ .

Для уменьшения массы испытательного трансформатора используют иногда способ питания его от источника напряжения повышенной частоты. Кроме однополупериодного выпрямления, применяют также схемы умножения напряжения, которые позволяют получить высокое постоянное напряжение от источника значительно меньшего напряжения, чем при однополупериодном выпрямлении. Однако в этих случаях совмещение обеих функций (испытание постоянным напряжением и переменным 50 Гц) в одной установке уже невозможно.

#### **2.4.5.4. Испытание повышенным напряжением сверхнизкой частоты (СНЧ, или VLF – Very Low Frequency).**

Наряду с отмеченными преимуществами, применение постоянного тока для испытания изоляции имеет и существенный недостаток: приложенное постоянное напряжение распределяется по толще изоляции в соответствии с активным сопротивлением, а не с емкостями ее слоев, как при рабочем напряжении или перенапряжении на переменном токе. По этой причине отношение (кратность) испытательного напряжения к рабочему в отдельных слоях получается различным и может превзойти допустимые значения, вплоть до пробоя изоляции. Это воздействие постоянного тока особенно заметно сказывается на полимерной изоляции (полиэтилен, сшитый полиэтилен, этиленпропилен) из-за образования в ней долговременных объемных зарядов и, как следствие, локальных перенапряжений, которые могут привести к пробую.

В последние десятилетия широкое распространение получает изоляция из сшитого полиэтилена (СПЭ). Сшивка – это создание пространственной решетки за счет образования продольно – поперечных связей между молекулами полимера. Изоляция из СПЭ характеризуется низкими значениями диэлектрической проницаемости и большим запасом термической стойкости, сниженными диэлектрическими потерями и большим сроком службы. Отсутствие масла обеспечивает возможность прокладки кабеля на участках с большим перепадом высот, а гибкость облегчает прокладку кабеля большой строительной длины на сложных трассах.

По указанным выше причинам изоляцию из сшитого полиэтилена нельзя испытывать напряжением постоянного тока той же сравнительно высокой кратности, как это предписывается ПУЭ для бумажно – масляной изоляции, например. Кроме того, для снятия объемных зарядов целесообразно периодически изменять полярность приложенного напряжения. Оптимальным считается гораздо более эффективный и экономичный, щадящий метод испытания изоляции из СПЭ напряжением сверхнизкой частоты при сверхмалом испытательном токе. Этот метод позволяет выявить дефекты изоляции без образования объемных зарядов в структуре полиэтиленовой изоляции и риска повреждения кабеля во время испытания. Правила МЭК рекомендуют проводить такие испытания переменным напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц.

Нормы VDE (Германия) предписывают испытывать кабель из СПЭ напряжением  $U_{исп} = 3U_{ф}$  частотой 0,1 Гц в течение 30 мин. В нашей стране действует Инструкция УП-Б-1 (Москва) с аналогичными нормами, то есть  $U_{исп} = 10,4; 17,3$  и  $60,6$  кВ (0,1 Гц) для кабелей из СПЭ с номинальным напряжением 6; 10 и 35 кВ соответственно.

## **2.4.6. Комплектные установки для испытания изоляции повышенным напряжением**

### **2.4.6.1. Переносные испытательные установки.**

*Прибор РЕТОМ – 2500* (НПП «Динамика», г. Чебоксары). Предназначен для проверки электрической прочности изоляции приложением повышенного напряжения до 2,5 кВ промышленной частоты. Имеет встроенные цифровые приборы: вольтметр, миллиамперметр, секундомер. Выдержка времени задается переключателем интервала 0,5 – 3,0 мин дискретно через 0,5 мин.

Прибор смонтирован в корпусе типа «чемодан». Выход выполнен в виде двух высоковольтных гнезд, защищенных крышкой. Выходное напряжение регулируется ЛАТРом. Предельные значения тока утечки 10, 50 или 500 мА устанавливаются переключателем. Готовность устройства к работе контролируется датчиками нулевого положения рукоятки ЛАТРа и закрытия защитной крышки высоковольтных гнезд. Снятие остаточного заряда с испытуемого объекта осуществляется подключением силовых клемм к разрядной цепи. Питание прибора предусмотрено только от сети 220 В, 50 Гц, что несколько ограничивает возможности его применения. Область применения – вторичная коммутация, аппаратура управления, электрические машины напряжением до 1000 В.

*Аппарат АИД-70М* (СКБ «Медрентех») является модификацией снятых с производства аппаратов АИД -70 (масса 175 кг), выпускаемых ранее заводом «Мосрентген». Выдает синусоидальное переменное напряжение до 50 кВ действ. частотой 50 Гц и постоянное напряжение до 70 кВ. Максимальный рабочий ток переменный 10 мА, постоянный 45 мА. Аппарат оснащен системой снятия остаточного заряда путем замыкания высоковольтного вывода на землю через вторичную обмотку повышающего трансформатора, так что наличия устаревшей конструкции внешнего замыкателя не требуется. Масса блока управления 14 кг, высоковольтного блока 37 кг.

В более современной модели *АИД-70Ц* применена микропроцессорная система обработки сигналов и управления силовой частью. Система стабилизации позволяет повысить точность поддержания испытательного напряжения на заданном уровне. Возможен автоматический подъем напряжения. Аппарат отличается наличием жидкокристаллического дисплея, многопозиционного джойстика и сенсорной панели управления. Масса пульта управления/высоковольтного блока 16/40 кг.

Переносное испытательное устройство *СКАТ -70* (НПО МОДУЛЬ) предназначено для испытаний переменным до 51 кВ и постоянным до 71 кВ напряжением; максимальный выходной ток 35 мА. Устройство состоит из высоковольтного трансформатора и измерительного блока, соединенных кабелем. Трансформатор снабжен штангой заземления, которая управляется от измерительного блока и во время испытания отводится от высоковольтного вывода. Устройство может также служить для прожига места повреждения изоляции кабеля при напряжении до 40 кВ током до 36 мА. Масса измерительного блока не более 15 кг, высоковольтного блока – не более 45 кг.

*АИСТ 50/70* (ООО МИР Энерго) вырабатывает переменное испытательное напряжение до 56 кВ, выпрямленное до 70 кВ, максимальный ток нагрузки 50 мА. Возможно изменение испытательного напряжения со скоростью от 1 до 10 кВ/с в автоматическом режиме. Масса пульта управления 16 кг, высоковольтного блока 36 кг.

Установки УКД-70 предназначены для испытания изоляции силовых кабелей выпрямленным напряжением и твердых диэлектриков синусоидальным напряжением частотой 50 Гц. Наибольшее напряжение 70 кВ, наибольший рабочий ток 10 мА; масса пульта управления не более 14 кг, источника испытательного напряжения – 40 кг. Установки выполнены во влаго- и пылезащищенном исполнении и могут эксплуатироваться в полевых условиях.

Установки переносные *серии УИВ* выпускаются в трех исполнениях, охватывающих диапазон напряжений от 1 до 105 кВ для испытания электрооборудования классов напряжения до 35 кВ. Обеспечивается плавное регулирование испытательного напряжения во всем рабочем диапазоне с помощью электропривода. Измерение высокого напряжения осуществляется емкостно – резистивным делителем напряжения и цифровым вольтметром. В повышающем трансформаторе и делителе напряжения в качестве изоляционной среды используется элегаз. Установка комплектуется штангой для наложения заземления и разрядным сопротивлением. Масса комплекта 85 кг.

Установка МИУ-60 позволяет производить испытания повышенным переменным напряжением 50 кВ и выпрямленным напряжением 60 кВ. Полная масса не более 70 кг.

*ИМ-60* (ООО «НПО РосТехЭнерго», г.Саратов) – высоковольтный аппарат для испытания изоляции выпрямленным напряжением до 60 кВ. Содержит преобразователь низкого постоянного напряжения в выпрямленное высокое напряжение с промежуточным звеном повышенной частоты. Максимальный ток нагрузки 0,5 мА (при 60 кВ), масса 8,7 кг.

Подобные установки производят и зарубежные фирмы, например, *Фирма MEGGER* – малогабаритные испытательные установки напряжением до 100 кВ переменного и до 160 кВ постоянного тока.

Портативные испытательные установки *серии PTS* предназначены для испытания кабелей постоянным напряжением от 37,5 до 200 кВ. Измеряемый ток утечки от 0 до 10 мА. Масса пульта управления 15 кг, высоковольтного узла 68 кг.

#### **2.4.6.2. Передвижные испытательные установки.**

*Ярославский электромеханический завод* (холдинговая компания «ЭМЗ») выпускает передвижные лаборатории в трех модификациях:

ЛВИ-1 – для испытания электрооборудования подстанций и распределительных устройств;

ЛВИ-2 (ЛВИ-2М1) – для испытания кабелей до 10 кВ и обнаружения места повреждения кабелей;

ЛВИ-3 – для проведения полного комплекса испытаний электрооборудования и кабельных линий и определения места повреждения кабелей. Базируются эти лаборатории на шасси грузовых и полугрузовых автомобилей отечественного производства.

Электропитание ЛВИ может осуществляться как от внешней электросети (максимальная потребляемая мощность 12 кВ·А), так и от встроенного синхронного генератора мощностью 20 кВ·А.

Для измерения высокого напряжения используются прецизионный делитель напряжения и амплитудный вольтметр.

Передвижная электротехническая *лаборатория ЭИЛ 10Г* (г. Омск) монтируется на шасси автомашин ГАЗ или УАЗ. Функции – испытание изоляции и электрооборудо-

вания и силовых кабелей с номинальным напряжением до 10 кВ, а также для поиска мест повреждения кабелей. Ряд технических решений защищены авторскими свидетельствами на изобретения. Работа лаборатории осуществляется в полуавтоматическом режиме. Имеется два источника тока:

1) Низкого напряжения. Обеспечивает режим прожига изоляции с плавным бесступенчатым регулированием тока до 500 А. В схеме прожига нет силового трансформатора.

2) Высокого напряжения. Генерирует напряжение до 50 кВ переменного или 70 кВ постоянного тока с плавным регулированием от 0 до максимального значения, ток до 300 мА.

Обеспечивается бесступенчатый переход от источника высокого напряжения к низковольтному мощному источнику тока прожига.

Для отыскания места повреждения кабеля индукционным и акустическим методами поставляется оригинальный измерительно – поисковый комплекс КИП2Т (ЗТ), а также аппарат Р5-13.

Передвижная *комбинированная лаборатория* высоковольтных испытаний (*ЛВИ НВИ*) устанавливается на шасси автомашин Урал и КамАЗ (УралСпецТранс). Выполняются все виды испытаний оборудования подстанций и распределительных устройств и кабелей до 35 кВ, включая испытания изоляции из сшитого полиэтилена напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц.

Электротехническая *лаборатория ЭТЛ-10* (ООО «Харьковэлектроприбор») смонтирована в фургоне автомобиля «Газель» и предназначена для:

- испытаний высоким напряжением переменного и постоянного тока;
- определения трассы кабельных линий;
- прожига дефектной изоляции кабелей с последующим дожигом ;
- определения места повреждения кабеля индукционным и акустическим методами;
- определения расстояния до места повреждения кабелей 0,4 – 10 кВ импульсным беспрожиговым методом.

Выпускаются и передвижные испытательные установки специального назначения. Известно, что на нефтяных скважинах доля отказов электрооборудования по вине кабелей достигает 80%, поэтому к эффективности их использования предъявляются особые требования. Для испытания и диагностики высоковольтных кабелей погружных электронасосов предназначена система «Скважина» (InterEng Messtechnik, Германия, Дрезден). К системе прилагаются программные средства, позволяющие выносить все результаты измерений на переносный компьютер. Осуществляются все виды высоковольтных испытаний, а также прожигание высокоомных повреждений изоляции с переводом их в низкоомные.

#### **2.4.6.3. Источники напряжения сверхнизкой частоты (СНЧ, VLF).**

Высоковольтная испытательная *установка серии НВА* – цифровая, универсальная, многофункциональная («4 в 1»), обеспечивает:

- 1) испытание напряжением СНЧ кабелей с изоляцией из СПЭ;
- 2) испытание постоянным напряжением до 90 кВ обеих полярностей;
- 3) испытание оболочки кабеля;
- 4) поддержание дуги при заплывающем пробое кабеля.

Система отвечает всем международным стандартам и обладает следующими характерными особенностями:

- полностью синусоидальный входной сигнал во всем диапазоне, независимо от нагрузки;
- большой ЖК дисплей, отображающий форму выходного сигнала, выходные параметры установки, емкость объекта;
- отсутствие подвижных механических частей;
- защита от короткого замыкания в случае пробоя или прожига изоляции.

Может использоваться для испытания как объектов с высокой емкостью (до 12 мкФ), например кабелей, так и высоковольтных выключателей, трансформаторов, изоляторов и пр. Испытания могут выполняться в ручном или автоматическом режиме. В память записываются емкость, сопротивление, напряжение пробоя, действующие значения напряжения и тока. Ниже приведены технические данные установки серии HVA28TD (HV Diagnostics, Швейцария), снабженной встроенным модулем TD для измерения тангенса угла диэлектрических потерь.

Таблица 2.3

Технические данные установки HVA28TD

Наименование параметра	Значение параметра
Напряжение питания	100 ...240 В (400 В·А)
Выходное напряжение	Переменное синусоидальное 0...28 кВ (ампл.), 20 кВ (действ.) Постоянное ± 0...28 кВ Прямоугольное 0...28 кВ
Разрешение	0,1 кВ во всем диапазоне
Погрешность	± 1% от диапазона
Выходной ток	0...20 мА
Разрешение	1 мкА
Погрешность	± 1% от диапазона
Частота высоковольтного выходного сигнала	0,01 ...0,1 Гц с шагом 0,01 Гц
Диапазон сопротивления	0,1 МОм ...5 ГОм
Максимальная выходная нагрузка при макс. напр.	0,5 мкФ; 0,1 Гц; 20 кВ действ. 5 мкФ; 0,01 Гц; 20 кВ действ.
Тангенс угла диэлектрических потерь	Погрешность ± 1·10 <sup>-4</sup>

Порядок выполнения измерений следующий.

1. Подключить заземление к установке и объекту испытаний.
2. Подключить кабель сетевого питания
3. Подключить высоковольтный вывод, оболочку заземлить.

4. Включить установку; производится самотестирование.
5. Подать высокое напряжение.
6. Выполнить измерение.
7. Отключить установку кнопкой аварийного отключения.
8. Наложить заземление на объект испытаний.
9. Обесточить установку.

Схема подключения установки показана на рис.2.40.

Масса прибора 14 кг, цена ок. 1 млн. рублей.

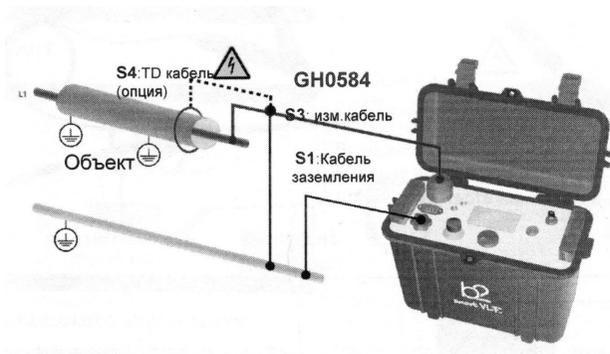


Рис.2.40. Подключение установки HVA28TD

Серия HVA30 обеспечивает получение пикового (амплитудного) напряжения до 33, 62 и 90 кВ и действующего напряжения соответственно 23, 44 и 64 кВ; выходной ток 0...15 мА; частота 0,01...0,1 Гц. Питание от сети 220 В, потребляемая мощность 400 В·А, масса устройства 19,5 кг.

У модификации HVA30-5 (увеличенной мощности) ток до 85 мА, потребление 1,5 кВ·А, масса 45 кг.

Установки *VLF* фирмы *HVI, Inc* – малогабаритные, легкие, простые в обслуживании, имеют высокую нагрузочную способность. Выходное напряжение *VLF-6028 SMF* синусоидальное, пиковое значение 60 кВ. Используются для испытания трансформаторов и кабелей класса 35 кВ. Эффективны для прожигания повреждений изоляции кабеля за несколько минут. Заряд кабеля и ток установки разряжаются через место повреждения, причем энергия разряда может достигать тысяч джоулей. Процесс ускоряется благодаря смене полярности напряжения: чередование положительных и отрицательных разрядов вызывает быстрое обугливание из-за снижения сопротивления в месте повреждения.

Фирма «Seba KMT» предлагает «*VLF Test System 20 kV (40 kV)*». Форма напряжения – прямоугольная с косинусоидальным передним фронтом, значение до 20 (40) кВ, частота 0,1 Гц. Масса установки менее 50 кг (на 40 кВ – 53 кг). Модификация на 80 кВ позволяет испытывать кабели до 35 кВ.

Испытательная установка «Высоковольтный *тестер VLF 28*» выпускается фирмой «BAUR». Выходное напряжение до 28 кВ, частота от 0,01 до 1 Гц. Форма напряже-

ния: синусоидальное до 28 кВ, постоянное до 40 кВ, импульсное. Масса установки 51 кг.

Установка для испытания кабелей из сшитого полиэтилена *типа СНЧ-25* (производитель – Украина) вырабатывает напряжение синусоидальной формы амплитудой до 25 кВ и выпрямленное напряжение обеих полярностей. Имеет встроенное устройство разряда кабелей. Потребляемая мощность установки 0,7 кВ·А, масса 45 кг, цена 360 тыс.руб. (2012 г.); модификации СНЧ-60КП – 799 тыс. руб. (2012 г.).

*АВ-60* (Кировоград, Украина) – аппарат для испытания кабелей из сшитого полиэтилена. Сконструирован для применения в качестве приставки к высоковольтному источнику напряжения. Форма генерируемого напряжения косинусно – прямоугольная, наибольшая амплитуда 60 кВ, частота 0,1 Гц.

## **2.5. Проверка заземления.**

### **2.5.1. Основные понятия.**

#### **2.5.1.1. Основные определения.**

Требования к заземлению, основные понятия и терминология, приводимые ниже, содержатся в Правилах устройства электроустановок 7-го изд.

*Заземление* — это преднамеренное электрическое соединение какой-либо точки сети, электроустановки или оборудования с заземляющим устройством. *Защитное заземление* выполняется в целях электробезопасности, *рабочее (функциональное)* — для обеспечения работы электроустановки (не в целях электробезопасности).

*Защитное зануление* — преднамеренное соединение открытых проводящих частей (металлических корпусов) электрооборудования с глухозаземленной нейтралью, выполняемое в целях электробезопасности. При однофазном замыкании на корпус (на «землю») образуется цепь («петля» фаза-нуль) тока однофазного КЗ, значение которого должно быть достаточно велико для срабатывания максимальной токовой защиты и автоматического отключения аварийной электроустановки за время, не превышающее норм ПУЭ.

*Заземляющее устройство* представляет собой совокупность заземлителя и заземляющих проводников. *Заземлители* — проводящие части, находящиеся в электрическом контакте с землей. В качестве *естественных* заземлителей могут служить металлические части различного назначения, находящиеся в земле. *Искусственные* заземлители выполняются в виде металлических электродов (труб, уголков, полос), расположенных в земле. *Заземляющие проводники* соединяют заземляемую часть (точку) с заземлителем.

*Уравнивание потенциалов* — это электрическое соединение проводящих частей для достижения равенства их потенциалов и исключения тем самым опасности электропоражения при одновременном прикосновении к двум проводящим частям, оказавшимся под напряжением. *Выравнивание потенциалов* — снижение разности потенциалов на поверхности земли или пола с помощью защитных проводников или специальных покрытий.

#### **2.5.1.2. Назначение**

Характеристики заземляющего устройства должны обеспечивать безопасность людей и животных при авариях, с одной стороны, и эксплуатационные функции

электроустановки, с другой стороны: действие релейных защит; отвод в грунт токов молнии; защита изоляции низковольтных цепей; снижение электромагнитных помех; обеспечение взрыво- и пожаробезопасности и др.

Для территориально сближенных электроустановок разных назначений и напряжений применяют, как правило, одно общее заземляющее устройство, которое в первую очередь должно удовлетворять требованиям к защитному заземлению (1.7.55).

Как источники питания, так и электроприемники содержат *проводящие части*, которые проводят или могут проводить электрический ток, и электроизоляцию, которая ток не проводит (не считая тока утечки). *Токоведущие* проводящие части в процессе эксплуатации электроустановки находятся под рабочим напряжением (например, жилы кабелей, шины, обмотки электрических машин, выводы и др.). Они не должны быть доступны для случайного прикосновения. Применение электроизоляции является одной из основных защитных мер для предотвращения *прямого* (непосредственного) прикосновения к ним. Доступны прикосновению *открытые проводящие части* (ОПЧ), которые нормально под напряжением не находятся, но при повреждении изоляции могут оказаться под напряжением (например, корпуса электродвигателей, трансформаторов и т. п.). Защитой при таком *косвенном* прикосновении к токоведущим частям и служит защитное заземление. Различают еще *сторонние проводящие части* (СПЧ), не являющиеся частью электроустановки (например, металлоконструкции зданий и сооружений, трубы водо- и газоснабжения и др.).

Заземление осуществляется путем соединения ОПЧ либо непосредственно с заземлителем, либо с заземленной нейтралью источника питания. *Глухозаземленная нейтраль* трансформатора присоединяется непосредственно к заземляющему устройству.

## **2.5.2. Сопротивление растеканию.**

### **2.5.2.1. Общие понятия.**

Если на электрод, погруженный в землю, подать напряжение относительно земли, то через него пойдет ток, который будет растекаться по всем направлениям — в стороны от электрода и в глубину земли. По мере удаления от заземлителя сечение массива земли, через которое проходит ток, увеличивается, а плотность тока и электрический потенциал соответственно уменьшаются, достигая нулевого значения на расстоянии около 20 м и более. Часть земли, электрический потенциал которой принимается равным нулю, называется *зоной нулевого потенциала*. *Сопротивление растеканию* — это сопротивление, которое оказывает току земля. Сопротивление растеканию заземлителя численно равно отношению напряжения на нем  $U_3$  относительно земли (т. е. точки нулевого потенциала) к току  $I_3$ , стекающему с заземлителя в землю:  $R_3 = U_3/I_3$ . Термин «сопротивление растеканию заземлителя» часто заменяют сокращенным «сопротивление заземлителя». Его не надо смешивать с сопротивлением заземлителя как проводника — в отличие от последнего, сопротивление растеканию не зависит от материала заземлителя, а определяется только его конфигурацией и удельным сопротивлением грунта. Аналогично, *сопротивление заземляющего устройства* — это отношение напряжения на нем (напряжения между заземляющей шиной и землей) к току, стекающему с заземлителя в землю.

В общем случае, чем меньше сопротивление заземляющего устройства, тем лучше оно выполняет свои защитные и эксплуатационные функции. Однако снижение со-

противления заземлителя удорожает его сооружение, а в некоторых случаях затруднено по характеристикам грунта. Для осуществления защитных функций заземлитель и заземляющее устройство в целом должны иметь сопротивление, не превышающее определенных нормированных значений.

#### **2.5.2.2. Нормирование.**

В нашей стране сети 3 – 35 кВ работают преимущественно с изолированной нейтралью, 110 кВ – с глухозаземленной нейтралью. В электроустановках с изолированной нейтралью сопротивление заземляющего устройства с учетом сопротивления естественных заземлителей должно быть

$$R \leq 250/I,$$

но не более 10 Ом;  $I$  – ток замыкания на землю, А (1.7.96).

При использовании заземляющего устройства одновременно для электроустановок напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью сопротивление заземляющего устройства должно быть не более 4 Ом при линейном напряжении трехфазного тока 380 В с учетом использования естественных заземлителей, а также заземлителей повторных заземлений нулевого проводника ВЛ до 1 кВ при количестве отходящих линий не менее двух. Сопротивление отдельного заземлителя, расположенного в непосредственной близости от нейтрали трансформатора, не должно превышать 30 Ом. При удельном сопротивлении земли  $\rho > 100$  Ом·м допускается увеличивать эти нормы в 0,01  $\rho$  раз, но не более чем в десять (1.7.97, 1.7.101).

Для подстанций напряжением 6 – 10/0,4 кВ должно быть выполнено одно общее заземляющее устройство, к которому должны быть присоединены:

- 1) нейтраль трансформатора на стороне 0,4 кВ;
- 2) металлические оболочки и броня кабелей;
- 3) открытые и сторонние проводящие части электроустановок.

Вокруг подстанции должен быть проложен замкнутый горизонтальный заземлитель, присоединенный к заземляющему устройству (1.7.98).

Заземляющие устройства на опорах ВЛ предназначены для повторного заземления, защиты от грозových перенапряжений, заземления электрооборудования, установленного на опорах. Сопротивление заземляющих устройств опор, снабженных молниезащитой, при их высоте до 50 м нормируется по п.2.5.129, табл.2.5.19 ПУЭ, в частности, не более 10 Ом при удельном эквивалентном сопротивлении грунта до 100 Ом·м и не более 30 Ом – от 1000 до 5000 Ом·м. Указанные нормы могут быть снижены вдвое на двух- и многоцепных линиях или увеличены в 2 раза на горных ВЛ.

Сопротивления заземляющих устройств железобетонных и металлических опор для ВЛ 3 – 20 кВ, проходящих в населенной местности, а также всех ВЛ 35 кВ должны быть не более приведенных в табл. 2.5.19 ПУЭ; для ВЛ 3 – 20 кВ в ненаселенной местности в грунтах с удельным сопротивлением  $\rho$  до 100 Ом·м – не более 30 Ом, а в грунтах с  $\rho$  выше 100 Ом·м – не более 0,3  $\rho$ , Ом.

Сопротивление заземляющих устройств опор ВЛ 3 – 35 кВ, на которых установлены силовые или измерительные трансформаторы, разъединители, предохранители и другие аппараты, не должно превышать 30 Ом (2.5.129). В больших переходах со-

противление заземляющего устройства опор с защитными аппаратами должно быть не более 10 Ом при удельном сопротивлении земли не выше 1000 Ом·м и не более 15 Ом при более высоком удельном сопротивлении (2.5.173).

Для ВЛ, защищенных тросами, сопротивление заземляющих устройств, выполненных по условиям молниезащиты, должно обеспечиваться при отсоединенном тросе, а по другим условиям – при неотсоединенном.

Сопротивления заземляющих устройств ВЛ должны обеспечиваться и измеряться при токах промышленной частоты в период их наибольших значений в летнее время. Допускается производить измерения в другие периоды с корректировкой результатов путем введения сезонного коэффициента (2.5.129). Документ РД 153-34.0-20.525-00 (РАО «ЕЭС России») рекомендует использовать сезонные коэффициенты в соответствии с табл. 3.13. Сезонные коэффициенты применяются и в тех случаях, когда они указаны в проекте, а также по требованию владельца электроустановки или надзорного органа.

Сечение каждого из заземляющих спусков на опоре ВЛ должно быть не менее 35 мм<sup>2</sup>, а для однопроволочных спусков – 78,5 мм<sup>2</sup> (диаметр 10 мм).

Для уменьшения сопротивления растеканию искусственных заземлителей в районах с большим удельным сопротивлением земли рекомендуются следующие мероприятия:

- устройство углубленных заземлителей;
- устройство выносных (до 2 км) заземлителей;
- искусственная обработка грунта (1.7.106).

Способы искусственного увеличения проводимости грунта: насыщение грунта легко растворимыми в воде солями; замена части грунта материалами с пониженным удельным сопротивлением; введение в грунт слабо растворимых в воде соединений. Соль (поваренная соль, медный купорос, сода) понижает температуру застывания почвенного раствора и удельное сопротивление грунта при низких температурах. Недостатки этого способа — усиленная коррозия электродов и необходимость повторных обработок грунта через 1...2 года, так как за это время соль растворяется и уносится почвенными водами.

При замене части грунта электрод окружается достаточно мощным слоем вещества повышенной проводимости, как правило, с использованием суспензии из глины или природного глиноподобного вещества — бентонита. В этом случае частая повторная обработка не требуется, но приходится производить большой объем земляных работ. К слабо растворимым веществам с низким удельным сопротивлением относятся, например, гипс; применяются также различные проводящие синтетические полимеры и гели. Общим недостатком этих веществ является их дороговизна, а у некоторых — повышенная коррозионная активность или токсичность.

Магистраль заземления или зануления и ответвления от них в закрытых помещениях и в наружных установках должны быть доступны для осмотра. Это требование не распространяется на нулевые жилы и оболочки кабелей, на арматуру железобетонных конструкций, а также на проводники, проложенные в трубах, коробах и внутри строительных конструкций.

Таблица 2.4

Наименьшие размеры заземлителей и заземляющих проводов,  
положенных в земле

Материал	Профиль сечения	Диаметр, мм	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Толщина стенки, мм
Сталь черная	Круглый:			
	для вертикальных заземлителей	16	-	-
	для горизонтальных заземлителей	10	-	-
	Прямоугольный	-	100	4
	Угловой	-	100	4
	Трубный	32	-	3,5
Сталь оцинкованная	Круглый:			
	для вертикальных заземлителей	12	-	-
	для горизонтальных заземлителей	10	-	-
	Прямоугольный	-	75	3
	Трубный	25	-	2
Медь	Круглый	12	-	-
	Прямоугольный	-	50	2
	Трубный	20	-	2
	Канат многопроволочный (каждая проволока)	1,8	35	-

В 2006 году Ассоциация «Росэлектромонтаж» выпустила технический циркуляр 11/2006, расширяющий и уточняющий содержание табл. 2.4 в соответствии с международным стандартом МЭК 60364-5-54. Здесь же указывается, что при использовании заземляющего устройства для электроустановки выше 1 кВ с изолированной нейтралью и одновременно для установки до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью сечение заземляющего проводника, соединяющего СПЧ с заземлителем, следует принимать с учетом тока замыкания в электроустановке выше 1 кВ.

Таблица 2.5

Сезонные коэффициенты удельного сопротивления грунта

Тип грунта	Влажность		
	средняя	ниже средней	выше средней
Глина	3	2	10
Супесь, суглинок	5	3	20
Песок	10	3	50

### 2.5.3. Заземлители.

#### 2.5.3.1. Удельное сопротивление грунта.

Сопротивление растеканию тока с заземлителя в грунт зависит, с одной стороны, от его геометрических размеров и расположения в земле, с другой — от свойств грунта, которые численно характеризуются его *удельным сопротивлением*. За эту величину принимается сопротивление между противоположными сторонами куба земли единичного объема, точнее — куба, длина ребра которого имеет единичное значение.

Как известно из электротехники, сопротивление проводника длиной 1 м с удельным сопротивлением  $\rho$  и площадью поперечного сечения  $S$  равно  $R = \rho l/S$ , откуда  $\rho = RS/l$ , а единицей удельного сопротивления в системе СИ будет  $\text{Ом} \cdot \text{м}^2/\text{м} = \text{Ом} \cdot \text{м}$ . Иногда встречается размерность  $\text{Ом} \cdot \text{см}$ , что соответствует кубу с ребрами единичной длины, причем  $1 \text{ Ом} \cdot \text{м} = \text{Ом} \cdot 100 \text{ см} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . В отличие от земли, удельное сопротивление проводниковых материалов, металлов в системе СИ выражается очень малыми числами, и поэтому предпочитают иногда, измеряя сечение проводника в квадратных миллиметрах, использовать более удобную единицу  $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ , причем  $1 \text{ Ом} \cdot \text{м} = 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ .

Если, например, сравнить удельное сопротивление земли и стали, приняв соответствующие значения равными  $20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  и  $0,2 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ , то оказывается, что удельное сопротивление земли в 100 млн. раз больше. Этим объясняется, что при расчетах сопротивления растеканию учитывают только сопротивление земли, пренебрегая сопротивлением заземлителя как проводника. Так, например, активное сопротивление стального стержня диаметром 16 мм и длиной 3 м составляет около  $0,003 \text{ Ом}$ , а сопротивление растеканию для этого стержня в земле может быть порядка  $10 \text{ Ом}$ . Таким образом, сопротивление растеканию заземлителя является основной составляющей сопротивления всего заземляющего устройства, поскольку сопротивление остальных его элементов как проводников из цветного металла сравнительно невелико.

Определение реального значения удельного сопротивления грунта затрудняется неоднородным строением земли, наличием в ней проводящих или непроводящих примесей, зависимостью от температуры и влажности, времени года и пр. Удельное сопротивление примесей может различаться в самых широких пределах — от значений порядка  $10^{-7}$  (металлы),  $10^{-5}$  (графит),  $10^{-2}$  (уголь) до  $10^3$  (песчаник),  $10^5$  (каменная соль) и  $10^9 \dots 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (нефть), а присутствие тех или иных примесей в грунте существенно влияет на его удельное сопротивление. Так, добавление в сухой песок всего 3% нефти увеличивает его удельное сопротивление втрое, а 10% — в несколько тысяч раз. Удельное сопротивление воды может быть от нескольких сотых (морская) до тысяч  $\text{Ом} \cdot \text{м}$  (дождевая). Влияние температуры тоже очень заметно: так, например, удельное сопротивление песчаника при температуре  $-12^\circ\text{C}$  составляет 184, а при  $20^\circ\text{C}$  только  $80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Воздействием тех или иных факторов объясняется широкий разброс значений удельного сопротивления грунта в конкретных условиях испытаний (табл. 2.6).

Ориентировочные значения удельного электрического сопротивления земли и воды при температуре выше 0°С

Род земли и воды	Сопротивление, Ом·м
Песок сухой	1500...000
Песок влажный	130...400
Суглинок	40...150
Глина	8...70
Садовая земля	40
Торф	20
Щебень	3000...5000
Гранит	22000
Морская вода	0,2
Речная вода	10...80

Различают *стационарное* сопротивление заземлителя, отводящего в землю ток частотой 50 Гц, и *импульсное* сопротивление, характерное для заземлителей грозозащиты. Последнее определяется как импульсным характером тока, так и физико-химическими процессами и искрообразованием в грунте при ударе молнии. Импульсный характер тока молнии отличают его высокая амплитуда (до 200 кА, в среднем 25 кА) и большая скорость изменения во времени (10...40 кА/мкс), в связи чем проявляется индуктивность, а в плохо проводящих грунтах и емкость заземлителя. При некотором значении напряженности поля в грунте начинают происходить сложные физико-химические процессы, вплоть до пробоя грунта, в результате которых его удельное сопротивление уменьшается. В зависимости от преобладания искровых процессов и емкости или индуктивности импульсное сопротивление может быть как больше, так и меньше стационарного, и прямой, непосредственной связи между ними не существует. Поэтому импульсное сопротивление ПУЭ не нормируется и в наладочной практике не измеряется, а пригодность заземлителей как молниеотводов оценивается по соответствию их типовым решениям, приведенным в инструкциях по устройству молниезащиты (РД 34.27.122-87, СО 153-3421-122-2003). В геодезической практике импульсное сопротивление измеряется специальными приборами.

#### 2.5.3.2. Естественные заземлители.

Это — находящиеся в непосредственном контакте с землей металлические части, которые могут быть использованы и для целей заземления. В качестве естественных заземлителей используются:

- металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений; металлические трубы водопровода;
- обсадные трубы буровых скважин;
- металлические части гидротехнических сооружений;
- рельсовые пути неэлектрифицированных железных дорог;
- другие находящиеся в земле металлические конструкции и сооружения;
- металлические (кроме алюминиевых) оболочки бронированных кабелей при количестве их не менее двух (1.7.109).

Не допускается использовать в качестве заземлителей трубопроводы горючих или взрывоопасных материалов, центрального отопления и канализации, что не исключает необходимости присоединения их к заземляющему устройству с целью уравнивания потенциалов (1.7.110).

Протяженные естественные заземлители (водопроводные трубы, металлические оболочки кабелей и т. п.) имеют малое сопротивление растеканию и в ряде случаев позволяют выполнить требования ПУЭ, не прибегая к сооружению искусственных заземлителей.

Хорошими естественными заземлителями могут служить металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений. Так, сопротивление растеканию железобетонного фундамента производственного здания, рассчитанное по формуле

$$R = 0,5 \rho / \sqrt{S},$$

где S — площадь здания, например, при S = 20 x 30 м и  $\rho = 50$  Ом·м, будет R = 1,1 Ом.

У железобетонных сооружений, находящихся в воде, сопротивление растеканию наиболее низкое. Металлические трубы в земле имеют, как правило, малое сопротивление, даже если они покрыты изоляцией. Для сохранения электрической цепи при ремонтах трубопроводов, на водомерах и задвижках должны быть установлены металлические перемычки. Присоединять заземляющие проводники к линии водопровода надо за водомером (в направлении от потребителя). При использовании протяженных заземлителей приходится считаться с падением напряжения на них, из-за чего потенциал протяженного заземлителя и ток, стекающий с него в землю, снижаются по его длине. По этой причине водопроводные трубы могут быть эффективно использованы в качестве заземлителей на расстоянии не более 1,5...2 км. Далее потенциал заземлителя приближается к потенциалу земли и стекание тока в землю прекращается.

То же относится и к использованию металлических оболочек кабелей. Свинцовые оболочки их могут иметь достаточно низкое сопротивление растеканию. Конкретные значения его зависят от числа кабелей, их длины, состояния покровов и удельного сопротивления грунта. Средние значения сопротивления растеканию (Ом) металлических труб и свинцовых оболочек кабелей в грунте с удельным сопротивлением  $\rho = 100$  Ом·м приведены в табл. 2.7,а и табл.2.7, б.

Таблица 2.7,а

Сопротивление растеканию металлических трубопроводов на глубине 2 м

Длина подземного участка трубы, м	Диаметр трубы, мм		
	75	100	150
100	0,35	0,28	0,13
1000	0,25	0,20	0,17
2000	0,20	0,17	0,15

Сопrotивление растеканию свинцовых оболочек кабелей на глубине 0,7 м

Длина подземного участка кабеля, м	Сечение кабеля, мм <sup>2</sup>		
	16...35	50...95	120 и выше
100	2	1,5	1,1
200	1,8	1,4	1,0
500	1,4	1,1	0,8
1000	1,2	0,9	0,7

Большой эффект может дать использование *обсадных труб* (артезианских колодцев, скважин, шурфов и т. п.), сопротивление растеканию которых не превышает обычно нескольких ом.

Заземляющие свойства рельсовой сети определяются переходным сопротивлением рельсы — шпалы — балласт — земляное полотно — земля. Наиболее характерный диапазон значений переходного сопротивления на длине 1 км составляет в летних условиях 0,4...2,5, в зимних 1,5...17,5 Ом/км. Как правило, 90% этого значения приходится на долю шпал и балласта.

### 2.5.3.3. Искусственные заземлители.

Это — заземлители, специально выполняемые для целей заземления, обычно — в виде стержней, уголков, полос, труб. Искусственные заземлители не должны иметь окраски, а их материал и размеры должны соответствовать табл. 2.10. В качестве материала заземлителей преимущественно применяется черновая сталь, а также оцинкованная сталь и медь. Однако медь значительно дороже стали и, кроме того, образует с другими металлами гальванические пары, вызывая их коррозию. Стальные стержни дешевле угловой стали и тем более труб.

Заземлитель может представлять собой один проводник-электрод или группу (два и более) таких проводников, соединенных между собой. В первом случае он называется *простым*, во втором — *сложным*, а если электроды образуют замкнутый контур, то такой заземлитель называют *заземляющим контуром* (рис. 2.41).

Увеличение диаметра электрода не дает существенного уменьшения сопротивления растеканию, гораздо более эффективно увеличение длины. Наиболее употребительны *вертикальные заземлители*, в частности стержни длиной 2,5...5 м и более. Чтобы уменьшить влияние температуры на сопротивление растеканию, электроды располагаются ниже уровня земли не менее чем на 0,5...0,8 м. Для ориентировочных расчетов сопротивление растеканию вертикального электрода можно принять равным

$$r_{\text{в}} = 0,8 \rho / l,$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление земли,  $l$  — длина электрода. Например, при значениях  $\rho = 100$  Ом·м и  $l = 3$  м сопротивление растеканию такого заземлителя будет около  $r_{\text{в}} = 0,8 \cdot 100 / 3 \approx 27$  Ом.

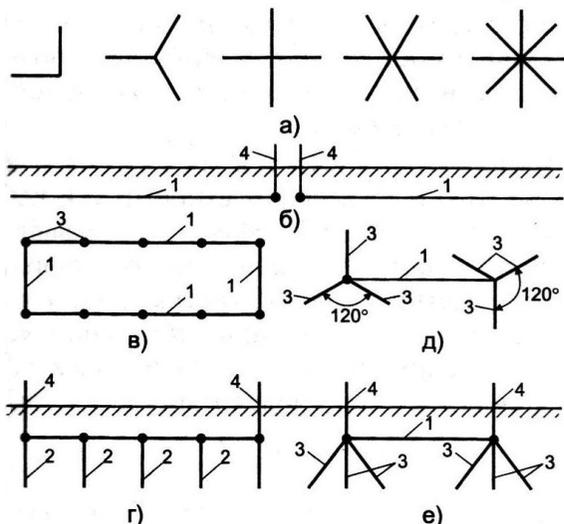


Рис. 2.41. Расположение искусственных заземлителей: а — сложные горизонтальные заземлители; б — одиночные горизонтальные заземлители с выводами; в, г — сложный заземлитель (контур) в плане и в разрезе; д, е — сложный наклонный заземлитель в плане и в разрезе; 1,2,3 — горизонтальный, вертикальный и наклонный электроды; 4 — вывод от заземлителя

*Горизонтальные* электроды из полос или круглой стали применяются как самостоятельные заземлители для грозозащиты, в электроустановках индивидуальных жилых домов и др., так и для связи вертикальных электродов между собой. Сопротивление растеканию горизонтального электрода будет несколько больше, чем вертикального той же длины. Одинаковые сопротивления имеют круглый стальной стержень и полоса шириной вдвое больше диаметра стержня. Зависимость сопротивления электродов от их длины в действительности оказывается несколько меньшей, чем следует из приведенной выше формулы

*Пластины* применяются в качестве заземлителей сравнительно редко, большей частью в сельской местности, так как при одинаковом сопротивлении растеканию масса их оказывается в несколько раз больше, чем у электродов удлиненного профиля. Целесообразно располагать пластины в земле вертикально, чтобы избежать нарушения контакта их с землей при возможной усадке грунта. Сопротивление растеканию такого электрода прямоугольной формы может быть приблизительно подсчитано по выражению

$$r_{пл} \approx \rho / 4 \sqrt{ab},$$

где  $a$  и  $b$  — длины сторон прямоугольника. Если, например, пластина имеет размеры  $a = b = 1$  м, то при  $\rho = 100$  Ом·м ее сопротивление будет  $r_{пл} = 100 / 4 \cdot 1 = 25$  Ом.

Сопротивление системы трос—опора при числе опор больше 15 можно вычислить по упрощенной формуле

$$R_{т-о} = \sqrt{R_{тп} R_{оп}},$$

где  $R_{тп}$  — сопротивление троса в одном пролете,  $R_{оп}$  — сопротивление заземляющего устройства одной опоры. Пусть, например, удельное сопротивление троса составляет 2,5 Ом•км, длина пролета 100 м = 0,1 км, то есть сопротивление троса 0,25 Ом, а сопротивление заземлителя каждой опоры 10 Ом; тогда сопротивление трос—опора будет  $R_{т-о} = \sqrt{0,25 \cdot 10} = 1,6$  Ом.

Сопротивление системы нулевой провод — повторные заземления можно рассчитать по аналогичной формуле, только заменив сопротивление троса в пролете сопротивлением участка нулевого провода между повторными заземлителями, а сопротивление опоры — сопротивлением повторного заземлителя.

Приведенные выше формулы для расчета сопротивления одиночных заземлителей предполагают отсутствие вблизи других электродов. Проводимость сложного заземлителя будет меньше, чем сумма проводимостей составляющих его электродов, из-за их взаимного влияния, или экранирования. Физически эффект экранирования заключается в том, что электрические поля близко расположенных электродов накладываются друг на друга, в результате чего напряженность поля вблизи электрода уменьшается, а его сопротивление растеканию возрастает. Это влияние численно характеризуется так наз. коэффициентом использования, на который при расчете следует поделить сопротивление одиночного заземлителя.

Пусть, например, требуется рассчитать сопротивление растеканию контура из 10 вертикальных стержней, сопротивление растеканию каждого из которых равно 27 Ом, и 10 соединительных полос сопротивлением 35 Ом каждая; по справочным данным, коэффициент использования вертикальных заземлителей в этом случае  $\eta_v = 0,69$ , горизонтальных —  $\eta_r = 0,40$ . Тогда сопротивление вертикальных заземлителей составит  $R_v = 27/10 \cdot 0,69 = 3,9$  Ом, горизонтальных  $R_r = 35/10 \cdot 0,40 = 8,8$  Ом, а общее сопротивление растеканию контура заземления

$$R_k = \frac{R_v R_r}{R_v + R_r} = \frac{3,9 \cdot 8,8}{3,9 + 8,8} = 2,7 \text{ Ом.}$$

Приведенные выше упрощенные выражения для расчета сопротивления растеканию заземлителей различного вида могут оказаться полезными при оценочном определении параметров заземляющих устройств, когда результаты их измерения вызывают сомнение или не удовлетворяют нормам, в связи с чем принятые ранее решения требуют доработки.

#### 2.5.4. Защитные функции заземления.

Заземление выполняет защитную функцию, поскольку при замыкании на корпус потенциал поврежденной фазы относительно земли снижается до значения  $U_{ф}$ , равного падению напряжения на заземлителе. Вместе с тем появление напряжения на заземлителе и соединенных с ним металлических частях оборудования, а также на

поверхности грунта создает опасность для людей и животных. При этом потенциал поверхности грунта по мере удаления от заземлителя уменьшается и на расстоянии  $l > 20$  м от него приближается к нулю (рис.2.42). Область, в пределах которой электрический потенциал, обусловленный токами замыкания на землю, не равен нулю, называют *зоной растекания тока*. *Зону нулевого потенциала* обыкновенно называют *землей*. Закон изменения потенциала поверхности грунта (или, что то же самое, напряжения относительно точки нулевого потенциала) описывается выражением

$$U_3 \frac{r}{1+r},$$

где  $r$  — радиус заземлителя (при упрощенных расчетах принимают, что заземлитель имеет форму полусферы);  $l$  — расстояние от заземлителя до данной точки на поверхности грунта.

Ноги человека, стоящего на поверхности грунта, приобретают потенциал данной точки поверхности. Коснувшись рукой какой-либо точки на ОПЧ или СПЧ,

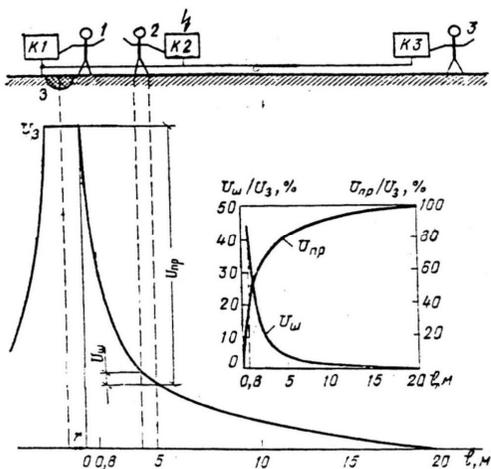


Рис.2.42. Распределение потенциала на поверхности грунта при замыкании на корпус.

он окажется под действием разности потенциалов между этими двумя точками. Напряжение между двумя проводящими частями или проводящей частью и землей при одновременном прикосновении к ним человека или животного называется *напряжением прикосновения* ( $U_{пр}$ ).

Когда человек делает шаг, ноги его приобретают разные потенциалы, в зависимости от расстояния до заземлителя и длины шага. Согласно ПУЭ, длина шага человека принимается равной 1 м, а напряжение между двумя точками на поверхности земли на расстоянии 1 м одна от другой называется *напряжением шага* (1.7.25), или *шаговым напряжением* ( $U_{ш}$ ).

Как видно из рис. 2.42, вблизи заземлителя потенциал грунта изменяется наиболее резко, и здесь напряжение шага имеет максимальное значение, а напряжение прикосновения — наименьшее (поз.1). При сравнительно небольшом удалении от заземлителя напряжение прикосновения быстро возрастает, а напряжение шага уменьшается (поз. 2). Вне зоны растекания (поз.3) напряжение прикосновения  $U_{пр} = U_3$  максимально, а напряжение шага равно нулю.

Для уменьшения опасности напряжения прикосновения или шагового выполняют металлическое соединение корпусов электрооборудования с заземленной нейтралью трансформатора (*зануление*). При этом создается замкнутая металлическая цепь фазануль, ток в которой достаточно велик для срабатывания максимальной токовой защиты за кратчайшее время.

## 2.5.5. Измерения.

### 2.5.5.1. Измерение удельного сопротивления грунта.

Удельное сопротивление грунта  $\rho$  определяется расчетным путем по известному сопротивлению заземлителей. В практике наладочных работ применяются два метода измерений: метод простого пробного (контрольного) одиночного электрода и метод четырех электродов. В качестве электродов применяют обычно вертикальные стальные стержни, трубы, уголки. Чтобы создать плотное соприкосновение с грунтом и избежать ошибки, которую может внести переходное сопротивление электрод — грунт, электроды рекомендуется погружать прямыми ударами или вдавливанием, не раскачивая их. Ввертывание стержней допускается как исключение только в песчаном грунте. Стержни или трубы диаметром не менее 5 мм погружаются в грунт на глубину не менее 0,5 м. В местах забивки электродов растительный или засыпной слой удаляют.

Согласно *методу пробного электрода* удельное сопротивление определяется по формуле

$$\rho = 2,73 Rl/lg(4 l/d),$$

где  $R$  — сопротивление растеканию;  $l$  — длина погруженной части электрода;  $d$  — диаметр электрода. Если в качестве электрода применяется угловая сталь, то принимают  $d = 0,95b$ , где  $b$  — ширина уголка. Пусть, например, измерено сопротивление растеканию  $R = 100$  Ом электрода в виде уголка, ширина стороны которого  $b = 40$  мм, погруженного в землю на глубину 600 мм. Тогда удельное сопротивление грунта будет

$$\rho = 2,73 \cdot 100 \cdot 0,6 / lg(4 \cdot 0,6 / 0,95 \cdot 0,04) = 163,8 / lg(2,4 / 0,038) = 91 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Следует иметь в виду, что таким способом получают среднее (*эквивалентное, эффективное*) удельное сопротивление, без учета неоднородности грунта по глубине: как правило, электропроводность грунта увеличивается с глубиной. Кроме того, не учитывается и возможное изменение удельного сопротивления грунта в горизонтальном направлении.

Более полное представление о характере грунта может дать *метод четырех электродов*. Расположение их и расчетные соотношения могут быть различными; в наладочной практике принят наиболее простой вариант (симметричная схема Веннера) — располагать электроды по одной прямой на одинаковом расстоянии между

ними (рис.2.43). В этом случае упрощается и выражение для удельного сопротивления:

$$\rho = 2\pi aR,$$

где  $a$  — расстояние между электродами,  $R$  — сопротивление растеканию, измеренное методом амперметра — вольтметра (рис.2.43,а) или специальным прибором (рис. 2.43,б).

Внешние электроды Т1 и Т2, к которым подключается источник питания  $G$  (рис.2.43,а) или выводы Т1, Т2 измерителя (рис.2.43,б), называются питающими, или токовыми, внутренниe П1 и П2 — измерительными, или потенциальными. Значение сопротивления  $R$ , полученное как отношение напряжения, измеренного на потенциальных электродах, к току через питающие электроды, называется *кажущимся сопротивлением растеканию*. Оно представляет собой среднее сопротивление объема грунта, примыкающего к электродам. Чем больше значение  $a$ , тем больше будет этот объем.

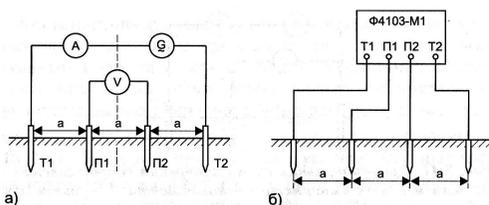


Рис.2.43. Измерение удельного сопротивления грунта:

а — методом амперметра-вольтметра с питанием от постороннего источника переменного тока; б — с помощью специального прибора для измерения сопротивления заземления

Если грунт (слой) однородный, то удельное сопротивление с изменением расстояния  $a$  изменяться не будет (значения  $a$  и  $R$  изменяются в обратной пропорции), при неоднородном же грунте оно зависит от разноса электродов и называется *кажущимся удельным сопротивлением*.

### 2.5.5.2. Измерение сопротивления растеканию заземлителя.

**Общие сведения.** Измерение методом амперметра-вольтметра (рис.2.44). При измерениях используется метод амперметра-вольтметра, как непосредственно, так и в специальных приборах, а также компенсационный метод. Для создания цепи измерительного тока в землю забивается вспомогательный (токовый) электрод. Вне зоны растекания тока забивается потенциальный электрод (зонд), относительно которого измеряется падение напряжения. В качестве электродов обычно используются неокрашенные заостренные стальные стержни диаметром 10...20 мм, длиной 0,8...1,5 м, снабженные рукояткой и барашком для подсоединения проводов. Размещаются электроды либо по *однолучевой* схеме, когда все три заземлителя З, П и Т расположены на одной прямой, либо по *двухлучевой*, когда линии, соединяющие вспомогательные электроды П и Т с рабочим заземлителем З, являются сторонами угла. В обоих ва-

риантах потенциальный электрод должен находиться вне зоны влияния поля тока через заземлитель или токовый электрод.

Измерения проводятся на переменном токе, чтобы избежать влияния ЭДС поляризации при постоянном токе. Для отстройки от блуждающих токов, имеющих по преимуществу частоту 50 Гц, в приборах генерируется напряжение частотой либо ниже (20...25 Гц), либо выше промышленной (от 200 до 1000 Гц). Сопротивление растеканию считается активным.

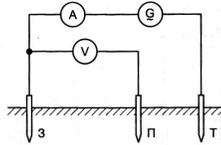


Рис.2.44. Принципиальная схема измерения сопротивления заземлителя методом амперметра — вольтметра: З — заземлитель; П-потенциальный электрод; Т — токовый электрод; G — источник переменного тока

При измерениях методом амперметра — вольтметра сопротивление заземлителя рассчитывается по закону Ома:

$$R_3 = U_3/I,$$

где  $U_3$  — падение напряжения на заземлителе при прохождении через него тока  $I$ . Значение тока должно быть возможно больше, чтобы напряжение можно было измерить с достаточной точностью. Кроме того, использование тока порядка 10 А и более позволяет избежать влияния блуждающих токов на результаты измерения. При малых значениях сопротивления заземлителя  $R_3$  сопротивление электрода Т также должно быть малым, желательно до 10 Ом.

В качестве источника питания можно применять понижающие трансформаторы небольшой мощности с питанием их от сети 220 В. Это позволяет, во-первых, изолировать измерительную цепь от общей сети, имеющей связь с землей, и исключить тем самым возможность замыкания между ними. Во-вторых, улучшаются условия электробезопасности, что имеет особое значение при работе в наружных электроустановках. В этой связи желательно выбирать питающие трансформаторы с вторичным напряжением 12...25 В. Когда для получения необходимой силы тока этого напряжения оказывается недостаточно, используют сварочные трансформаторы, напряжение холостого хода которых составляет 65...70 В, принимая при этом необходимые меры безопасности. Наконец, при пониженном напряжении облегчается и выполнение требований, предъявляемых к термической стойкости токового электрода: длительное протекание тока не должно вызывать подсушивания грунта и, как следствие, возрастания сопротивления электрода. С этой точки зрения падение напряжения на электроде должно быть ограничено; принимают  $U_3 \leq 14\sqrt{\rho}$ , т. е., например, не более 44 В при удельном сопротивлении грунта  $\rho = 10$  Ом·м. Учитывая, что в обычных условиях большая часть падения напряжения в измерительной цепи приходится на токовый электрод, с этим фактором приходится считаться.

Снизить сопротивление токового электрода можно увеличением глубины его погружения либо параллельным включением нескольких электродов, расположив их не ближе 1,0...1, 5 м друг от друга, либо увлажнением грунта вокруг электрода. Рекомендуется по возможности размещать электроды в зонах повышенной увлажненности грунта. Кроме того, токовый электрод следует располагать на достаточном удалении от испытываемого заземлителя, чтобы ток растекания электрода не искажал потенциал заземлителя. Рекомендуемое расположение электродов указывается в паспорте конкретного измерительного прибора. Измерения следует производить в местах, где нет протяженных металлических коммуникаций (труб, кабелей т. п.), так как при этом зона нулевого потенциала удаляется от места измерения.

Однако поставленные условия не всегда выполнимы, особенно на территориях городов и промышленных предприятий с большим количеством подземных коммуникаций и наземных сооружений. Близкое к истинному значение сопротивления растеканию заземлителя  $R_3$  может быть получено путем измерений сопротивления  $R_3$  при различных расстояниях  $l_{3п}$  и  $l_{3т}$  от края заземлителя  $Z$  до потенциального  $\Pi$  и до токового  $T$  электродов (рис.2.45) соответственно. С этой целью электроды размещаются по однолучевой схеме и выполняется серия измерений при разных значениях  $l_{3п}$  от  $0,2l_{3т}$  до  $l_{3т}$  ступенями через  $0,1l_{3т}$  и при фиксированном расстоянии  $l_{3т} = D$ , где  $D$  — наибольший линейный размер заземлителя (для лучевого заземлителя — длина луча, для заземлителя в виде многоугольника — наибольшая диагональ). По данным этих измерений строится кривая зависимости полученных значений сопротивления  $R_3$  от отношения  $l_{3п}/l_{3т}$  (рис. 2.46). Если эта кривая будет монотонной, с пологой средней частью, то за истинное  $R_{3и}$  принимается значение сопротивления при  $l_{3п}/l_{3т} = 0,5$ .

Согласно рекомендациям АО «Фирма ОРГРЭС», такое решение допустимо, когда разница сопротивлений  $\Delta R_3$ , измеренных при  $l_{3п}/l_{3т} = 0,4$  и  $l_{3п}/l_{3т} = 0,6$ , не превышает более чем на 10% значение сопротивления  $R_{3и}$ , измеренное при  $l_{3п}/l_{3т} = 0,5$ :  $\Delta R_3/R_{3и} < 10\%$  (рис. 2.45,а). Если это условие не соблюдается, то серия измерений повторяется при  $l_{3т} = 2D$ , и точка пересечения обеих кривых принимается за истинное значение сопротивления, а если кривые не пересекаются, то повторяют измерения при  $l = 3D$  и т. д. При этом обеспечивается погрешность измерения не более 10%. Если из-за влияния различных коммуникаций какая-либо кривая оказывается немонотонной, измерения повторяют, расположив электроды в другом направлении от заземлителя  $Z$ . Указанные рекомендации носят общий характер и в документах фирм-изготовителей конкретных приборов они варьируются.

В некоторых случаях измерение можно упростить. Так, на опорах ВЛ обычно применяются заземляющие устройства с небольшими размерами в плане. При этом условия удовлетворительные результаты можно получить, расположив электроды в соответствии с соотношением

$$L_{3п} = l_{3т} = 1,5D,$$

причем для двухлучевой схемы дополнительно должно соблюдаться условие  $l_{тп} = D$ . Расстояние  $l_{3п}$  необходимо отмерять от края заземляющего устройства; оно должно составлять не менее 30 м от тела опоры.

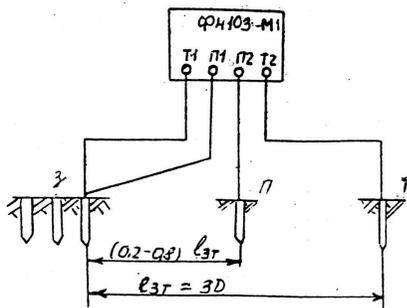


Рис. 2.45. Измерение сопротивления заземлителя при различных расстояниях до измерительных электродов

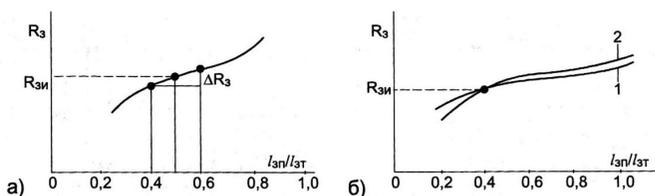


Рис. 2.46. Зависимость измеренного сопротивления растеканию заземлителя от расстояния до потенциального и токового электродов: а — при большом удалении электродов; б — при недостаточно большом удалении электродов;

1 — кривая при  $l_{ЗТ} = 2D$ ; 2 — кривая при  $l_{ЗТ} = 3D$

Схемы с питанием от отдельных понижающих трансформаторов, наряду с несомненными достоинствами (помехоустойчивость, точность, чувствительность), требуют громоздкого оборудования и повышенных трудозатрат. Поэтому в налагодной практике они применяются чрезвычайно редко, только в тех случаях, когда при измерении специальными приборами не удается отстроиться от влияния посторонних токов или когда такие приборы отсутствуют.

### 2.5.5.3. Измерительные приборы.

*Измеритель сопротивления заземления М 416.* Изготовитель этого прибора — завод «Мегомметр» (г. Умань, Украина), ранее выпускавший измерители типа МС-08. Источником питания в них служил электромашинный генератор постоянного тока с ручным приводом и механическим коммутатором для преобразования постоянного тока в переменный. Измерительная часть была выполнена в виде логометра постоянного тока с токовой и потенциальной рамками, т. е. использовался метод амперметра — вольтметра. Главный недостаток прибора — чрезмерно большая масса (13,5 кг).

Прибор М 416 — портативный (масса не более 3 кг) и более чувствительный. Питание прибора — от сухих элементов; описание см. 2.5.5.7. Для проведения измерений заземлитель З и вспомогательные электроды Т и П подключаются к зажимам 1,

2, 3 и 4 прибора (рис. 2.47). При измерениях по схеме рис. 2.47,а в результате измерений входит сопротивление провода, соединяющего зажим 1 с заземлителем 3. Поэтому такое включение допустимо при измерении сопротивлений выше 5 Ом.

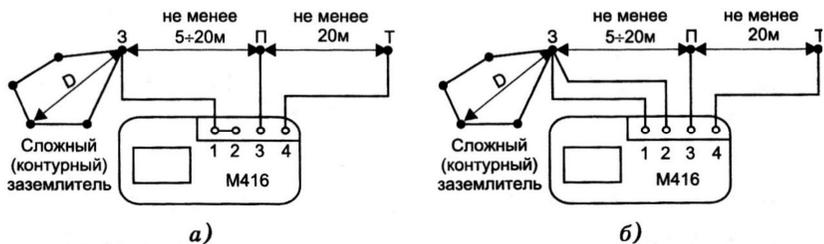


Рис. 2.47. Подключение прибора М 416 к сложному (контурному) заземлителю: а — по трехзажимной схеме; б — по четырехзажимной схеме

При меньших значениях измеряемого сопротивления применяют включение по четырехзажимной схеме (рис. 2.47,б).

Измерение удельного сопротивления грунта производится аналогично, но к зажимам 1 и 2 вместо контура присоединяется дополнительный электрод в виде стержня или трубы диаметром не менее 5 мм. Удельное сопротивление определяется по методу пробного электрода или по методу четырех электродов (п. 3.2.6.1). Этим прибором можно измерять также активные сопротивления по двух- и четырехзажимной схеме.

Основной недостаток прибора М 416 состоит в том, что он подвержен влиянию блуждающих токов и в ряде случаев дает большую погрешность. Прибор снят с производства, но еще эксплуатируется в ряде электрохозяйств.

*Измеритель сопротивления заземления Ф4103-М1.* Превосходит прибор М 416 по многим показателям: выше разрешающая способность и входное сопротивление (в 2 тыс. раз), защищен от помех и др. Класс точности 4,0 на диапазоне 0—0,3 Ом и 2,5 на остальных диапазонах (до 15 кОм). Частота измерительного тока в пределах 265...310 Гц. Переменное напряжение на токовых зажимах при разомкнутой внешней цепи 36 В.

Измеритель содержит генератор переменного измерительного тока с зажимами Т1 и Т2 и избирательный вольтметр с зажимами П1 и П2 для подключения соответственно токовых и потенциальных электродов. Генератор вырабатывает стабилизированный переменный ток прямоугольной формы. Избирательный вольтметр выделяет полезный сигнал на фоне помех, пропорциональный измеряемому сопротивлению. При превышении допустимого уровня помех загорается сигнальная лампа. Полезный сигнал усиливается, выпрямляется и поступает на измерительный прибор, шкала которого градуирована в единицах сопротивления. Имеется встроенный контроль напряжения питания, уровня помех и сопротивления вспомогательных электродов.

Измерение сопротивления заземлителей выполняют по схеме рис. 2.45. Направление разноса электродов П и Т выбирают так, чтобы соединительные провода не проходили вблизи металлоконструкций или параллельно трассе ЛЭП. Расстояние между токовым и потенциальным электродами должно быть не менее 1 м. Присоединение

проводов к сложному заземлителю выполняют на одном из электродов на расстоянии 0,2...0,4 м друг от друга. Измерительные электроды размещают по однолучевой или двухлучевой схеме, устанавливая потенциальный электрод на разных расстояниях от токового.

Перед началом измерений следует оценить уровень помех в проверяемой цепи, подключив к ней зажимы П1 и П2 прибора. Если напряжение помех превышает допустимый для предела 0,3 Ом уровень 3 В, необходимо перейти на диапазон 0—1 Ом, где допускается уровень 7 В. Превышение допустимого уровня определяется по загоранию сигнальной лампы. Далее следует измерить сопротивление потенциального электрода П по двухзажимной схеме. Если это сопротивление окажется выше допустимого значения, указанного в паспорте прибора для выбранного диапазона измерения, его необходимо уменьшить. После этого собирают схему рис. 2.43,б и производят калибровку прибора. Если при этом обнаруживается, что сопротивление токового электрода выше допустимого, то следует либо уменьшить его, либо провести измерения при повышенном сопротивлении с учетом возникающей в этой связи дополнительной погрешности. Измерения сопротивления точечного заземлителя производят при удалении токового электрода на расстояние  $I_{ст} > 30$  м.

Измерение удельного сопротивления грунта проводят методом четырех электродов (по схеме Веннера), предварительно проверив сопротивление потенциальных электродов. Расстояние  $a$  (рис. 2.43,б) принимается не менее чем в 5 раз больше глубины погружения электродов.

Измерение активных сопротивлений производится так же, как и прибором М 416.

Измерители сопротивления заземляющих устройств серии MRU-100 (Польша).

Цифровые измерители MRU-100, MRU-101 предназначены для измерения сопротивления заземляющих устройств, сопротивления соединительных проводников и удельного сопротивления грунта. Основные возможности измерителей:

- измерение сопротивления растеканию заземлителей по трех- или четырехзажимной схеме;
- измерение удельного сопротивления грунта с учетом расстояния между электродами;
- измерение активного сопротивления по двух- или четырехзажимной схеме;
- проверка напряжения помех и блокирование измерений при превышении допустимого уровня помех (40 В);
- память данных 300 измерений и передача их в компьютер (в измерителе MRU-101).

Прибор снабжен измерительными щупами и гнездами Н и Е — для коммутации цепи измерительного тока, ES и S — для соединения с потенциальными электродами, а также разъемами для подключения измерительных клещей и порта интерфейса (MRU-101). Поворотный переключатель обеспечивает выбор функций измерения сопротивления заземлителя, удельного сопротивления грунта, а также калибровки измерительных клещей. Инициация функций производится клавишами. Питание измерителя MRU-100 осуществляется от сухих батарей, измерителя MRU-101 — от никель-кадмиевых аккумуляторов. Измерительный ток 225 мА, частота 128 Гц, разрешение 0,01 Ом. Масса прибора 1,6 кг, цена \$1300.

Измерение сопротивления заземлителя (рис. 2.48) обычно производится по трехзажимной схеме (рис. 2.48,а). При этом следует обратить внимание на качество со-

единения заземлителя с подводящими проводами, очистить место контакта от краски, грязи и т. п. Если сопротивление потенциальных электродов очень велико по сравнению с заземлителем, есть возможность оценить возникающую дополнительную погрешность.

В случае, когда измеряемое сопротивление мало и требуется исключить влияние соединительных проводов и контактов, используют четырехзажимную схему (рис.2.48,б).

Измерение удельного сопротивления грунта производится по схеме Веннера. Эта функция отличается от измерения по схеме рис. 2.48,а тем, что в прибор дополнительно вводится расстояние  $a$  между электродами, а результат вычисляется автоматически.

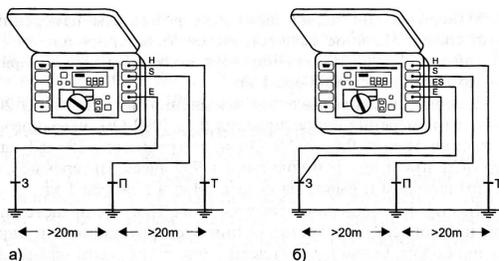


Рис. 2.48. Измерение сопротивления заземлителя прибором MRU-100: а — по трехзажимной схеме; б — по четырехзажимной схеме

Измерение активного сопротивления производится по двухзажимной или четырехзажимной схеме (рис. 2.49). Наиболее часто используется двухзажимная схема (рис. 2.49,а). Влияние подводящих проводов может быть исключено путем вычитания сопротивления измерительных проводов из показаний прибора. В четырехпроводной схеме (рис. 2.49,б) это сопротивление в измерительной цепи не содержится.

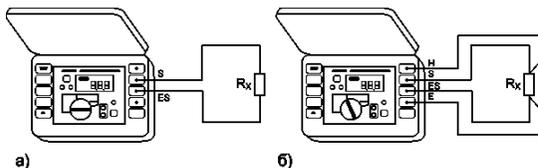


Рис.2.49. Измерение активного сопротивления прибором MRU-100: а – по двухзажимной схеме; б – по четырехзажимной схеме

### Современные приборы других фирм

1) Цифровые измерители сопротивления земли и удельного сопротивления грунта GEOTEST 2016 HT- Italia. Эти приборы позволяют измерять сопротивление заземления в диапазоне 0,01...1999 Ом с точностью  $\pm 2\% + 3$  ед.сч., а также удельное со-

противление грунта в диапазоне 0,6...199,9 Ом·м с той же точностью. Измеритель позволяет вычислять результаты измерений и запоминать их. Питание осуществляется от батареек или от сети через адаптер. Тестовые значения тока не более 10 мА, напряжения — до 80 В. Масса прибора 1 кг.

2) Измерители сопротивления заземления и грунта ИСЗ 2016. Диапазоны измерения сопротивления 0,1...1999 Ом, удельного сопротивления грунта 0,6...199,9 Ом·м; погрешность 2% ±3 ед.сч. Измеритель имеет внутреннюю память 999 ячеек, интерфейс с оптическим выходом и вывод на печать. Масса прибора 1 кг.

3) Многофункциональные тестеры Fluke 1650. Отличаются простотой и безопасностью тестирования электроустановок и управления прибором, большим дисплеем с широким углом обзора. Обладая высокой механической прочностью, могут работать в полевых условиях. Имеют внутреннюю память и интерфейс для работы с PC. Функции измерения сопротивления заземления выполняет модель 1653. Масса (с батареями) 1,2 кг.

4) Измеритель сопротивления заземления и удельного сопротивления грунта DET4TD («MEGGER», Великобритания). Выбор режима измерения производится поворотным переключателем. Большой легко читаемый дисплей и большая отдельно стоящая кнопка TEST облегчают пользование прибором даже в плохо освещенных местах.

Перед началом измерений прибор выполняет автоматическую диагностику и выдает информацию о наличии неисправностей или помех в измерительной цепи. Схема прибора позволяет осуществить отстройку от помех напряжением до 40 В. Диапазон измерения сопротивления от 0,01 Ом до 2 кОм, выходное напряжение 25 или 50 В.

5) Измеритель сопротивления заземляющих устройств, удельного сопротивления грунта и металлосвязи ИС-10 (НПФ «Радио-Сервис», Россия). Микропроцессорная схема прибора обеспечивает автоматический выбор диапазона измерения, учет сопротивления соединительных проводов произвольной длины, вычисление удельного сопротивления грунта. Имеет встроенную память на 40 измерений, защиту от неправильного включения.

6) Широкую гамму современных цифровых приборов для измерения параметров безопасности электроустановок предлагает дистрибьютер ООО «ПАРМА» (производитель Metrel DD). Приборы снабжены встроенным источником питания, ЖК дисплеем. Для измерения сопротивления заземлителей и удельного сопротивления грунта может служить измеритель типа M12124. Измерение производится по 4-х проводной схеме, расстояние между электродами — до 30 м. Диапазон измерения сопротивления — от 0,11 Ом с разрешением 0,01 Ом до 20 кОм, удельного сопротивления от 0 до 2000 Ом; память 1000 тестов; масса 1,3 кг.

#### ***2.5.5.4. Измерение сопротивления пола и стен.***

Измеряется сопротивление участка пола или стены относительно земли. Площадь такого участка принимается равной или близкой площади двух ступней человека. Сопротивление измеряется между испытательным электродом и защитным проводником электроустановки, обычно с помощью мегаомметра (рис. 2.50). В качестве испытательного электрода применяется металлическая пластина или сетка.

Согласно документам РАО «ЕЭС России» (РД 153-34.0-20.525) собирается схема рис. 2.50,а. Измерение производится мегаомметром 1 с помощью конструкции, состоящей из доски 2, поролоновой пластины 3, медной сетки 4 и влажной ткани 5. Конструкция прижимается к полу грузом Р.

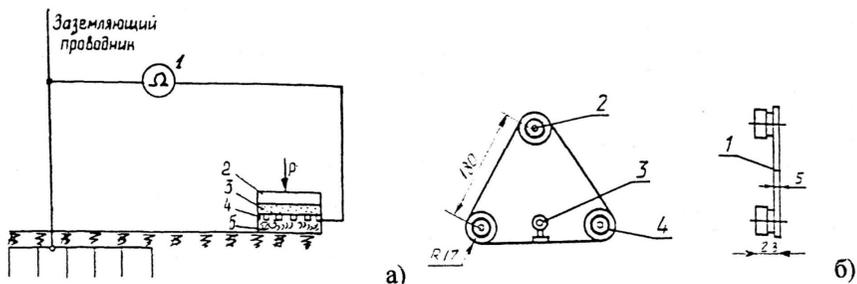


Рис. 2.50. К измерению сопротивления пола и стен: а — схема измерения; б — вариант конструкции испытательного электрода

Согласно рекомендациям ГОСТ Р 50571.16-99 испытательные электроды могут быть одного из двух типов. Электрод первого типа состоит из квадратной металлической пластины со стороной 250 мм и квадратной влажной водопоглощающей бумаги или материи со стороной примерно 270 мм, помещаемой между металлической пластиной и поверхностью пола (стены).

Электрод второго типа (рис. 2.50,б) представляет собой треножник, ножки которого образуют вершины равностороннего треугольника. Каждая ножка имеет эластичное основание, обеспечивающее при нагрузке плотный контакт с поверхностью пола (стены) площадью примерно  $900 \text{ мм}^2$  и сопротивление менее 5000 Ом. Перед измерением поверхность смачивают или покрывают влажной материей. Конструкция треножника содержит: алюминиевую пластину 1, винт 2 с шайбой и гайкой, клемму 3 для подключения провода от измерителя и контактную ножку 4 из проводящей резины.

Во время измерений электроды прижимают к поверхности пола или стены с усилием, равным 750 или 250 Н (75 или 25 кгс) соответственно.

Опыт показывает, что значения сопротивления зависят не столько от материала пола, сколько от состояния поверхности и связи ее с землей, а также от контакта между пластиной и полом. Особенно велика эта зависимость у сухих полов, а у влажных и сырых разница небольшая. Надо также иметь в виду, что часть измерительного тока растекается по поверхности пола к ОПЧ и СПЧ, связанным с системой заземления, из-за чего значения поверхностного сопротивления мокрого и сухого пола могут различаться на несколько порядков. Поэтому испытательный электрод следует располагать по возможности дальше от зануленных частей оборудования. В общем случае при влажных и проводящих полах измеренная величина является суммой сопротивления собственно пола и сопротивления прохождению тока по поверхности пола.

### 2.5.5.5. Измерение напряжения прикосновения.

Для определения напряжения прикосновения режим замыкания на землю в цепи выше 1000 В имитируется с питанием измерительной цепи от постороннего источника пониженного напряжения. Когда измерительный ток  $I_{из}$  отличается от значения  $I_k$  тока реального замыкания на землю, измеренное значение  $U_{пр.из}$  следует умножить на отношение  $I_k/I_{из}$ :

$$U_{пр} = U_{пр.из} I_k / I_{из}.$$

Напряжение измеряется между двумя точками, одна из которых выбирается в месте возможного прикосновения к металлической поверхности ОПЧ или СПЧ, а другая — на металлической пластине, имитирующей ступни ног человека. Пластины располагают на расстоянии 0,8...1 м от оборудования. Для удобства подключения к корпусу оборудования один из проводов вольтметра присоединяют к напильнику, которым непосредственно перед измерением делают надпил. Выводы вольтметра шунтируют резистором, моделирующим сопротивление тела человека. Класс точности измерительных приборов не ниже 2,5.

В качестве источника питания применяется понижающий трансформатор с вторичным напряжением 12—25 В.

*Предельно допустимые значения напряжений прикосновения* регламентируются ГОСТ 12.1.038-82 с изменениями, введенными 01.07.88, в системе ССБТ (Система стандартов безопасности труда). Эти значения установлены для путей тока от одной руки к другой и от руки к ногам (как наиболее опасных) и в зависимости от продолжительности воздействия напряжения на человека. Ниже приводятся данные для электроустановок переменного тока частотой 50 Гц, различающихся по назначению и режиму.

#### 1) Нормальный режим.

Напряжение прикосновения при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки не должно превышать 2В при продолжительности воздействия не более 10 мин в сутки. Для лиц, выполняющих работу в условиях высоких температур (выше 20 °С) и влажности (относительная влажность более 75%) напряжения прикосновения должны быть уменьшены в три раза.

Сопротивление резистора, моделирующего сопротивление тела человека, принимается равным 6,7 кОм.

#### 2) Аварийный режим производственных электроустановок.

Предельно допустимые напряжения прикосновения не должны превышать значений, указанных в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Зависимость предельно допустимых значений напряжений прикосновения от продолжительности воздействия в производственных электроустановках

Продолж. возд., с	0,01-0,06	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Св. 1,0
Напряж., В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60	20

Сопротивление тела человека должно моделироваться резистором сопротивлением 0,85 кОм при времени воздействия до 0,5 с, а более 0,5 с — сопротивлением, имеющим зависимость от напряжения согласно рис.2.51а.

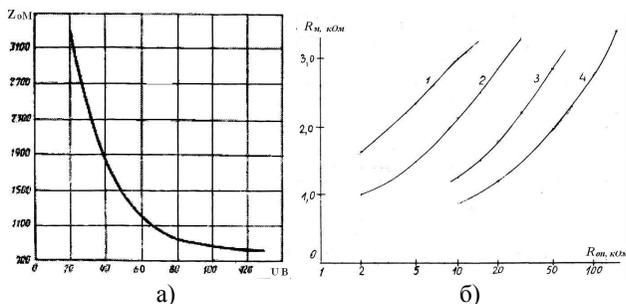


Рис.2.51. К выбору сопротивления резистора моделирующего сопротивление тела человека в зависимости от приложенного напряжения при времени воздействия более 0,5с: а) зависимость сопротивления тела человека (Z) от приложенного напряжения (U) согласно ГОСТ; б) кривые 1-4 зависимости моделирующего сопротивления (R<sub>м</sub>) от сопротивления опоры (R<sub>оп</sub>) при напряжениях на ПЧ U<sub>0</sub> =100; 200; 500; 1000 В соответственно

Однако практически воспользоваться этой зависимостью сложно. Можно, не измеряя непосредственно напряжение U<sub>пр</sub>, измерить напряжение между проводящей частью и землей U<sub>0</sub> и сопротивление опоры R<sub>оп</sub>, а напряжение U<sub>пр</sub> между проводящей частью и опорой найти расчетным путем из выражения

$$U_{пр} = U_0 \frac{R_m}{R_m + R_{оп}}$$

где R<sub>м</sub> – моделирующее сопротивление. Поскольку в этом уравнении два неизвестных (U<sub>пр</sub> и R<sub>м</sub>), решение его может быть получено в дискретном виде с помощью компьютера. Кривая зависимости Z(U) оцифровывается (программа Get Data Graph Digitizer) и таблица с данными заносится в программу Excel; загружается также функциональная зависимость U<sub>пр</sub>(R<sub>м</sub>). Компьютер сравнивает функции Z(U) и R<sub>м р</sub>(U<sub>пр</sub>) и найдет координаты их общей точки U=U<sub>пр</sub> и Z= R<sub>м</sub>. Фрагмент такого решения представлен представлен графически на рис 2.51б в полулогарифмическом масштабе.

В отдельных конкретных случаях можно, не прибегая к помощи РС, воспользоваться приведенной выше формулой и, зная U<sub>0</sub> и R<sub>оп</sub>, построить кривую зависимости R<sub>м</sub>(U<sub>пр</sub>); точка пересечения ее с кривой Z(U) на рис.2.51а укажет искомые значения R<sub>м</sub> и U<sub>пр</sub>.

Пусть, например, измерены напряжение на ПЧ U<sub>0</sub> = 200 В и сопротивление опоры R<sub>оп</sub> = 4,5 кОм; тогда координаты точки пересечения кривых функций

$$R_m = 4,5 \frac{U_{np}}{200 - U_{np}}$$

и  $Z(U)$  будут:  $R_m = 1,35$  кОм и  $U_{np} = 47$  В.

### **2.5.5.6. Проверка цепи между заземлителями и заземляемыми элементами. Виды защитных проводников и требования к ним. Назначение и использование**

Цепь металлической связи между заземлителями и заземляемыми элементами осуществляется с помощью защитных проводников (РЕ-проводников) и является частью систем защитного заземления.

Использование ОПЧ и СПЧ допускается, если они отвечают требованиям к проводимости и непрерывности электрической цепи, а СПЧ, кроме того, при условии, что их демонтаж невозможен, если не предусмотрены меры по сохранению непрерывности цепи и ее проводимости (1.7.122).

Не допускается использовать в качестве РЕ-проводников:

- металлические оболочки изоляционных трубок, несущие тросы электропроводки, металлорукава, а также свинцовые оболочки проводов и кабелей;
- трубопроводы горючих и взрывоопасных веществ, канализации и центрального отопления;
- водопроводные трубы при наличии в них изолирующих вставок.

#### **Выбор сечения**

В качестве материала защитных проводников используют медь, алюминий, сталь. Наименьшие площади поперечного сечения защитных проводников выбираются в зависимости от сечения фазных проводников линии, питающей данную электроустановку, мм<sup>2</sup>:

Фазные проводники	Защитные проводники
$S < 16$	$S$
$16 < S < 35$	16
$S > 35$	$S/2$

Площади сечений приведены для случая, когда защитные проводники изготовлены из того же материала, что и фазные проводники. Сечения защитных проводников из других материалов должны быть эквивалентны по проводимости приведенным (1.7.126), т. е. для меди, алюминия и стали выбираться в соотношении примерно 1 : 1,6 : 8 соответственно. В электромонтажной технологии такой выбор осуществляется согласно табл. 2.9.

ПУЭ-7 допускается в необходимых случаях принимать сечения защитного проводника менее требуемых, но с условием, чтобы при прохождении тока КЗ температура его за время срабатывания защитного аппарата не превысила допустимых максимальных значений. В этих случаях сечение проводника рассчитывается по формуле

$$S \geq I \sqrt{t} / k,$$

где  $I$  — ток КЗ, обеспечивающий время отключения поврежденной цепи защитным аппаратом в соответствии с требованиями ПУЭ, но не более 5 с (1.7.79, 1.7.81),

A; t — время срабатывания защитного аппарата, с; k — коэффициент, значение которого принимается по ПУЭ-7 в зависимости от материала защитного проводника, его изоляции, начальной и конечной температур (1.7.126).

Во всех случаях сечение медных защитных проводников, не входящих в состав кабеля или проложенных не в общей оболочке (трубе, коробе, на одном лотке) с фазными проводниками, должны быть не менее:

2,5 мм<sup>2</sup> — при наличии механической защиты;

4 мм<sup>2</sup> — при отсутствии механической защиты.

Сечение отдельно проложенных защитных алюминиевых проводников должно быть не менее 16 мм<sup>2</sup>.

Таблица 2.9

Проводники равной активной проводимости при плотности тока до 2 А/мм<sup>2</sup>

Алюминиевые про- водники сечением, мм <sup>2</sup>	Стальные проводники		
	круглые диа- метром, мм	полоса разме- ром, мм	труба внутренним диаметром, мм (дюйм)
2,5	6	-	-
4	10	20x3	6,3(1/4)
6	14	25x3	9,4 (3/8)
10	22	40x3	19(3/4)
16	32	70x4	32 (5/4)

### Особенности стальных проводников

Как видно из таблицы 2.9, сечение стального проводника, эквивалентного по проводимости алюминиевому, принято здесь с большим запасом по сравнению с отношением удельных проводимостей этих металлов, приведенным выше. Объясняется это, главным образом, тем, что соотношение 1:5 соответствует значению удельного сопротивления стали при постоянном токе, равному 0,13...0,14 Ом·мм<sup>2</sup>/м. На переменном токе сопротивление стали значительно выше и при неизменной частоте зависит от плотности тока в проводнике. Зависимость эта имеет нелинейный характер с резко выраженным максимумом сопротивления в области сравнительно небольшой плотности тока 0,25...0,5 А/мм<sup>2</sup>, который может превышать сопротивление постоянному току в 3...5 раз. С повышением плотности тока до 1...2 А/мм<sup>2</sup> сопротивление плавно снижается до двукратного, а свыше 30 А/мм<sup>2</sup> — остается постоянным, превышая сопротивление постоянному току не более чем на 10%. В качестве примера на рис. 2.51 приведены кривые зависимости удельных значений активного (R<sub>акт</sub>), внутреннего индуктивного (X), полного (Z) и омического (R) сопротивления стальной

полосы 40 x 3 мм от плотности тока частотой 50 Гц. Расчетное значение внутреннего индуктивного сопротивления стальных проводников  $X = 0,6 R_{\infty}$ , а полное сопротивление  $Z = R_{\infty} \sqrt{1^2 + 0,6^2} = 1,17 R_{\infty}$ .

Надо иметь в виду еще и то, что при замене сечения на большее проводимость стального проводника возрастает не пропорционально отношению площадей сечения, а в значительно меньшей степени из-за того, что при уменьшении плотности тока удельное сопротивление стали увеличивается. Так, например, при замене стальных шин сечением 30 x 4 (площадь 120 мм<sup>2</sup>) на шины 50 x 4 мм (площадь сечения 200 мм<sup>2</sup>) сопротивление проводника уменьшится не в  $200 : 120 = 1,66$  раза, а лишь в  $2,0 : 1,7 = 1,18$  раза (удельное сопротивление полосы 50 x 4 мм при плотности тока  $300 : 200 = 1,5$  А/мм<sup>2</sup> составляет 1,7 Ом/км).

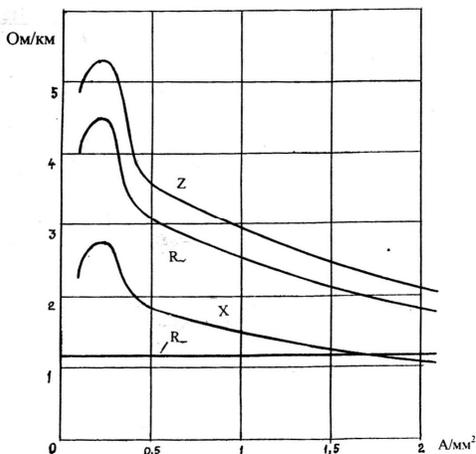


Рис. 2.52. Зависимость сопротивления стальной полосы 40 x 3 мм от плотности тока:  $R_{\infty}$  и  $X$  — активная и индуктивная составляющие полного сопротивления  $Z$ ;  $R$  — сопротивление постоянному току (омическое)

### Проводники системы уравнивания потенциалов

В качестве проводников системы уравнивания потенциалов могут быть использованы открытые и сторонние проводящие части, специально проложенные проводники или их сочетание (1.7.136). Сечение проводников *основной* системы уравнивания потенциалов должно быть не менее половины наибольшего сечения защитного проводника электроустановки. Сечение более 25 мм<sup>2</sup> по меди, как правило, не требуется, но в любом случае оно должно быть не менее: медных проводников — 6, алюминиевых — 16, стальных 50 мм<sup>2</sup> (1.7.137). Сечение проводников *дополнительной* системы уравнивания потенциалов должно быть не менее: при соединении двух ОПЧ — наи-

меньшего из сечений проводников, подключенных к ним; при соединении ОПЧ и СПЧ — половины сечения защитного проводника, подключенного к ОПЧ (1.7.138).

**Соединения и присоединения защитных проводников и проводников уравнивания потенциалов**

Соединения должны быть защищены от коррозии и механических повреждений. Присоединения к ОПЧ должны выполняться при помощи болтовых соединений или сварки (1.7.139, 1.7.142).

Присоединение каждой ОПЧ электроустановки к защитному заземляющему проводнику должно быть выполнено при помощи отдельного ответвления.

Последовательное включение в цепь защитного проводника открытых проводящих частей не допускается.

Присоединение проводящих частей к основной системе уравнивания потенциалов должно быть выполнено также при помощи отдельных ответвлений. Присоединение проводящих частей к дополнительной системе уравнивания потенциалов может быть выполнено как при помощи отдельных ответвлений, так и путем присоединения к одному общему неразъемному проводнику (1.7.144).

#### ***2.5.5.7. Проверка цепи между заземлителями и заземляемыми элементами.***

##### **Нормативные требования**

Согласно ПУЭ, следует проверить сечения, целостность и прочность проводников цепи, их соединений и присоединений. Не должно быть обрывов и видимых дефектов в заземляющих проводниках, соединяющих аппараты с заземлителем. Надежность сварки проверяется ударом молотка (1.8.39.2).

«Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей» предусматривают, кроме того, инструментальную проверку соединений заземлителей с заземляемыми элементами путем измерения переходных сопротивлений (Приложение 3, п. 26.1). Аналогичное измерение может производиться и согласно Нормам РАО «ЕЭС России» («Объем и нормы испытаний электрооборудования», п. 28.2). При этом считается, что сопротивление исправного соединения не превышает 0,05 Ом. Известно, что переходное сопротивление надежно выполненного сварного или болтового соединения близко по значению к сопротивлению целого проводника на отрезке той же длины. Результаты одного из обследований показали, что хорошо затянутые стыки стальных труб имели сопротивление порядка 0,0001 Ом, плохо затянутые — от 0,01 Ом и выше.

Директивные документы не устанавливают отдельных норм на сопротивление цепи металlosвязи. В некоторых регионах надзорные службы требуют измерять сопротивление всех переходных контактов в цепи металlosвязи, и это их требование следует выполнять.

##### **Визуальный контроль**

- Убедиться в том, что окраска проводников по всей длине соответствует ПУЭ.
- Проверить соответствие материала и размеров проводников проектным документам и требованиям ПУЭ.
- Путем осмотра убедиться в исправности электрической изоляции проводников и защитного покрытия неизолированных проводников.
- Проверить правильность монтажа контактных соединений.
- Путем осмотра и простукивания молотком (масса до 1 кг) выявить видимые дефекты.

ты и обрывы в цепи металлической связи заземлителей с заземляемыми элементами.

**Измерение сопротивления заземляющих проводников.**

**Методика измерений**

В сетях простой конфигурации непосредственно измеряют сопротивление цепи между заземлителем и каждым заземляемым элементом. В сложных, разветвленных сетях сначала измеряют сопротивление между заземлителем и магистралью заземления, а затем между нею и заземляемыми элементами.

Перед началом измерений следует убедиться в отсутствии напряжения на элементах проверяемой цепи. Измерения могут проводиться по методу амперметра — вольтметра или специальными приборами серийного производства: мостами, омметрами (миллиомметрами, микроомметрами), измерителями заземления. Для присоединения соединительного провода от измерительной цепи к металлическим корпусам оборудования с окрашенной или ржавой поверхностью удобно пользоваться трехгранным напильником, рукоятка и конец которого обмотаны изоляционной лентой. Вблизи рукоятки приваривается контактный зажим для соединительного провода, а другой провод снабжается струбиной для присоединения к заземлителю или к магистрали заземления. В этом случае работу выполняют два человека: один прижимает напильник к металлическому корпусу, другой производит измерения непосредственно.

Поскольку высокой точности таких измерений не требуется, можно использовать приборы классов 2,5—4.

В качестве соединительных проводов рекомендуется использовать гибкие многожильные проводники сечением 2,5—4 мм<sup>2</sup>, длиной до 100 м. При этом надо иметь в виду, что сопротивление соединительных проводов сопоставимо с измеряемым: сопротивление заземляющего проводника не превышает обычно нескольких десятых долей ома, тогда как, к примеру, сопротивление медных соединительных проводов сечением 2,5 мм<sup>2</sup> достигает 0,1 Ом всего лишь на длине около 7 м. Для учета этого сопротивления либо производят калибровку измерительного прибора (если такая коррекция в нем предусмотрена), либо измеряют сопротивление соединительных проводов и вычитают полученное значение из общего результата измерения.

**Измерение методом амперметра — вольтметра**

Схема измерения показана на рис. 2.53. Питание на схему подается от понижающего трансформатора с вторичным напряжением 12—25 В, мощностью от 100 до 300...500 В·А. Ток в измерительной цепи устанавливают в пределах 10...30 А посредством автотрансформатора или переменного резистора на первичной стороне питающего трансформатора. Протекание сравнительно больших токов вызывает выгорание случайных перемычек малого сечения, нагрев или искрение в плохих контактах и позволяет таким образом выявить скрытые дефекты. Отсутствие тока, колебание стрелки амперметра или слишком малое значение тока указывают на разрыв или ослабленный контакт.

Метод амперметра — вольтметра неудобен тем, что отсчет надо производить по двум приборам и вычислять сопротивление как частное от деления напряжения на силу тока. Некоторое упрощение достигается видоизменениями этого метода, предусматривающими либо стабилизацию напряжения или тока и тем самым исключающими необходимость использования одного из измерительных приборов, либо применением градуированного в омах амперметра. В последнем случае ампер-

метр шунтируется ползунковым реостатом. Перед измерением струбину и щуп-напильник соединяют вместе и реостатом устанавливают стрелку амперметра на нуль, что позволяет автоматически учесть сопротивление проводов и фактическое значение напряжения сети. Полное отклонение стрелки должно соответствовать заданному значению тока, например, 10 А.

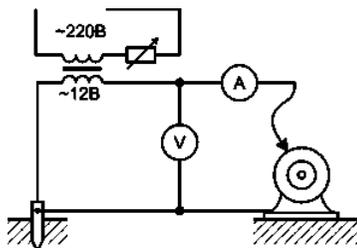


Рис. 2.53. Принципиальная схема измерения сопротивления заземляющих проводников методом амперметра-вольтметра

Рекомендуется, чтобы это испытание выполнялось с использованием источника питания, имеющего напряжение холостого хода от 4 до 24 В постоянного или переменного тока при испытательном токе не менее 0,2 А. Если измерение производится на переменном токе частотой выше 50 Гц, то для компенсации увеличения внешнего индуктивного сопротивления проводников в ряде приборов предусматривается соответствующая коррекция. Следует заметить, что не все приборы могут обеспечить указанные условия, но применение их допустимо.

### *Измерения сопротивления заземляющих проводников серийными приборами*

*Омметр типа М372.* Прибор предназначен для измерения сопротивления заземляющих проводников, установления факта обрыва их, а также для обнаружения аварийного напряжения на оборудовании. Конечное значение диапазона показаний 50 Ом, диапазон измерений от 0,1 до 20 Ом. Ток потребления 3,7 мА, система прибора магнитоэлектрическая. Отсчетное устройство — стрелочный указатель. Основная приведенная погрешность прибора +1,5% от длины шкалы; масса 1,3 кг. Основной недостаток прибора — трудность измерения малых сопротивлений ниже 0,1 Ом, в частности, переходных сопротивлений контактов.

### *Измеритель сопротивления заземления М416.*

Действие измерителя основано на компенсационном принципе: падение напряжения на измеряемом сопротивлении уравнивается напряжением на калиброванном резисторе. Нижний предел измерения 0,1—10 Ом. Источником питания служат сухие элементы общим напряжением 4,5 В; потребляемый ток не более 90 мА. Прибор содержит транзисторный преобразователь U<sub>V</sub> постоянного напряжения в переменное частотой 1100 Гц и измерительное устройство, состоящее из реохорда R<sub>к</sub> со шкалой и усилителя переменного тока U<sub>W</sub> (рис.2.54). Выходное напряжение усилителя выпрямляется и поступает на индикаторный прибор, в качестве которого слу-

жит гальванометр (микроамперметр  $\mu A$ ) магнитоэлектрической системы. Нагрузку подключают с одной стороны к зажимам 1 и 2, с другой — к зажимам 3 и 4. Переменный ток от преобразователя UV, протекая через первичную обмотку трансформатора Т во внешнюю цепь, создает в ней падение напряжения, которое поступает на резистор R и сравнивается с напряжением на резисторе  $R_K$  во вторичной цепи трансформатора. Разность напряжений подается на усилитель UW и индикатор. Движок реохорда устанавливают в такое положение, чтобы ток в цепи индикатора стал равным нулю. Значение измеряемого сопротивления отсчитывается непосредственно по шкале реохорда, проградуированной в омах. Погрешность измерения на нижнем пределе достигает  $+ (4 + 10/R_x)\%$ , т. е. при малых значениях  $R_x$  может превысить допустимые значения.

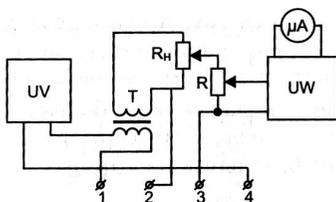


Рис. 2.54. Упрощенная структурная схема измерителя М416

#### *Измеритель сопротивления заземления Ф 4103 – М1.*

Электронный измеритель типа Ф 4103 превосходит прибор М416 по всем основным данным. Он обладает повышенной чувствительностью, высоким входным сопротивлением (в 2 тыс. раз больше, чем у М416), защищен от помех. Нижние диапазоны измерений 0—0,3; 0—1 Ом. Пределы допускаемой основной приведенной погрешности  $+ 4\%$  на диапазоне 0—0,3 Ом и  $\pm 2,5\%$  на остальных диапазонах измерения.

Измеритель представляет собой четырехзажимный омметр переменного тока и содержит генератор измерительного тока с зажимами Т1 и Т2 и избирательный вольтметр, выделяющий полезный сигнал на фоне помех, с зажимами П1 и П2. Измерительный ток — стабилизированный, прямоугольной формы, частотой 265—310 Гц. Переменное напряжение на зажимах Т1 и Т2 при разомкнутой внешней цепи не более 36 В.

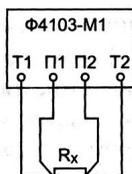


Рис. 2.55. Подключение прибора Ф4103-М1

Электропитание измерителя осуществляется либо от встроенных сухих элементов, либо от внешнего источника постоянного тока напряжением 11,5...15 В, ток потребления не более 160 мА. Габаритные размеры измерителя 305 x 125 x 155 мм, масса — не более 2,2 кг. Схема подключения прибора показана на рис. 2.55.

Прибор следует устанавливать на ровной горизонтальной поверхности, вдали от мощных силовых трансформаторов, так как уже при наклоне на 10° или под воздействием переменного магнитного поля частотой 50 Гц напряженностью до 400 А/м дополнительная погрешность может достигать основной. После включения питания выбирают диапазон измерения, производят корректировку нуля и калибровку прибора. Далее переводят переключатель рода работ в положение «измерение» и считывают показание прибора. При переходе на более высокий предел измерения установка нуля и калибровка производятся заново. После измерения переключатель устанавливают в положение «отключено» для предотвращения разряда батарей. Для блокировки включения измерителя необходимо закрыть крышку.

При измерении сопротивления со значительной индуктивной составляющей результаты могут отличаться от полученных на промышленной частоте или на постоянном токе в связи с повышенной частотой измерительного тока прибора. Пределы допускаемой дополнительной погрешности, вызванной индуктивной составляющей измеряемого сопротивления с постоянной времени  $10^{-4}$  с, равны удвоенным значениям допускаемой основной погрешности. Такой постоянной времени на частоте 50 Гц соответствует соотношение  $X \approx 0,03 R$ , т. е. весьма малая доля индуктивной составляющей, тогда как в ряде случаев (в цепях со сталью, с разнесенными проводниками) она может быть гораздо больше.

*Прибор «Вымпел» для измерения комплексного сопротивления цепи*

Прибор представляет собой омметр для измерения малых комплексных (полных) сопротивлений. Встроенный генератор синусоидального переменного тока частотой 50 Гц позволяет измерять активную и реактивную составляющие сопротивления участка цепи и фазный угол между током и напряжением. Результаты измерения выводятся на жидкокристаллический индикатор. Параметры омметра:

Тестирующий ток, мА, не менее ..... 50...150  
Диапазон измеряемых модулей  
полных сопротивлений, Ом ..... 0,05 ...5,00  
Диапазон измеряемых углов  
сдвига фаз, град.эл ..... -90...+90  
Напряжение питания, В ..... 6—9,5

Прибор снабжен микроконтроллером, который управляет процессом измерения и позволяет реализовать ряд дополнительных функций:

электронную калибровку и установку «0»;  
защиту и индикацию при случайном подключении к сети 220 В;  
индикацию обрыва цепи;  
индикацию состояния батарей;  
экономичное управление электропитанием (режим ожидания);  
таймер автоматического отключения;

подачу звукового сигнала при разряде батарей, обрыве цепи, наличии в цепи напряжения 220 В.

*Измеритель сопротивления* ИС-10 (НПФ «Радио-Сервис») имеет микропроцессорное управление, ЖК дисплей, встроенную память на 40 измерений, возможность калибровки с учетом сопротивления соединительных проводов произвольной длины. Измерение производится током свыше 200 мА с разрешением 1 мОм.

*Приборы фирмы «SONEL»*

Ряд многофункциональных приборов польской фирмы позволяет, в частности, осуществить контроль целостности нулевых защитных проводников и измерить их сопротивление. Приборы снабжены жидкокристаллическим дисплеем.

1) Измеритель MZC-300 (MZC-303E). Контроль целостности защитных проводников и уравнительных соединений проводится в течение 20 мс током 15 мА, порог срабатывания блокировки измерений сопротивления 3 кОм. Превышение этого порога и нарушение целостности проверяемой цепи сигнализируется световым и звуковым сигналами. В качестве источника питания используется одна из фаз сети 220 В, 50 Гц. Измерение может производиться в режиме измерения сопротивления цепи фаза — нуль или в режиме автокалибровки. Диапазон измерения сопротивления 0—0,5 Ом, разрешение 0,001 Ом, основная погрешность  $\pm(5\% + 3 \text{ ед. мл. разряда})$ . Размеры 230 x 67 x 35 мм, масса измерителя с элементами питания ок. 0,4 кг, цена ок. \$600.

2) Измеритель MRU-100 (MRU-101). Прибор со встроенным микропроцессором, обе модификации различаются только комплектацией элементов питания и памятью. Измерения можно производить по двухзажимной схеме или, если требуется исключить сопротивление соединительных проводов, по четырехзажимной схеме (рис. 2.49).

3) Микроомметр MMR-600 (MMR-610). Это — специализированный портативный прибор для измерения малых сопротивлений, в частности, переходных сопротивлений сварных, болтовых, паяных соединений и присоединений защитных проводников. Рабочий ток — от 0,1 мА до 10 А, диапазон (верхний предел) от 2 мОм до 200 Ом, разрешение — до 1 мкОм, точность  $\pm(0,25\% R_x + 0,1\% R_{в.п.})$ , где  $R_x$  — измеряемое сопротивление,  $R_{в.п.}$  — верхний предел измерения. Прибор MMR-610 обеспечивает более высокие разрешение (на порядок) и точность. Имеются возможность ручной и автоматической калибровки, собственная память (990 измерений) и возможность передачи результатов измерения в память компьютера, а также защита от попадания внешнего напряжения до 440 В. Размеры прибора 295 x 222 x 95 мм, масса ок. 1,7 кг, цена ок. \$3600. Использование постоянного измерительного тока несколько ограничивает возможности прибора при определении полного сопротивления цепей с индуктивностью.

4) Измеритель МС-3. Цифровой многофункциональный прибор, предназначенный для измерения сопротивления изоляции, проводников присоединения к земле и выравнивания потенциалов, контактных соединений. Измерительный ток — не менее 200 мА, напряжение от 4 до 24 В.

Измерение активного сопротивления защитных и уравнительных соединений производится на диапазоне 0,00...19,99 Ом с разрешением 0,01 Ом, что вполне достаточно; основная погрешность  $\pm(2\% + 3 \text{ ед. мл. раз.})$ . Максимальное напряжение на разомкнутых зажимах 5 В, ток при замкнутых зажимах более 200 мА (батарея 2,4 В); дисплей жидкокристаллический. Размеры измерителя 230 x 67 x 35 мм, масса 0,3 кг, цена ок. \$500.

*Тестеры фирмы HT Italia*

Широкую номенклатуру итальянских тестеров для проверки заземляющих устройств предлагает компания «Теккноу» (Tek Know Holding).

1) Тестер CombiTest 2019. В режиме проверки целостности защитных проводов нижний диапазон измерения сопротивления составляет 0,01—9,99 Ом, разрешение 0,01 Ом, точность  $\pm 2\% R_x + 2$  ед. сч. Тестовый ток постоянный  $>200$  мА, масса прибора 1,0 кг.

2) Цифровой измеритель сопротивления земли GEOTEST 2016. Нижний диапазон измерения сопротивления 0,01—19,99 Ом, разрешение 0,01 Ом, точность  $\pm 2\% R_x + 3$  ед. сч. Тестовый ток до 10 мА, частотой 125/75/41,6 Гц, синусоидальный, масса прибора 1 кг.

3) Комплексный многофункциональный тестер для измерений параметров безопасности сетей GSC53 и GSC57. Одна из функций — проверка целостности и измерение сопротивления защитных проводников. У обеих модификаций нижний диапазон 0,01—9,99 Ом, разрешение 0,01 Ом. Для GSC53 точность  $\pm 2\% R_x + 2$  ед. сч., тестовый ток 200 мА постоянный, масса прибора 1,2 кг; для GSC57 (измерение сопротивления заземляющих проводников мед. учреждений) точность  $\pm 1\% + 2$  ед.сч., тестовый ток более 10 А переменный, масса прибора 1,7 кг.

4) Близкие характеристики имеют и другие аналогичные по назначению тестеры этой фирмы. Кроме того, измеритель сопротивления и изоляции защитных проводников ISOTEST 2010 содержит встроенный оптический интерфейс, тестер MACRO-TEST 5035 — микропроцессор и встроенный интерфейс, что позволяет производить автоматическую запись результатов измерения и передавать данные на компьютер.

При выборе приборов различных фирм следует обращать внимание на следующие технические характеристики:

- параметры измерительного тока. Напряжение должно быть безопасным и во всяком случае не выше 50 В в помещениях без повышенной опасности. Проверку проводников со значительной индуктивностью предпочтительно проводить на переменном токе частотой 50 Гц; рекомендуется обеспечивать силу тока не менее 200 мА.
- порог чувствительности. Ряд отечественных приборов имеет порог чувствительности 0,1 Ом, что недостаточно для оценки сопротивления контактов.
- разрешающая способность. При измерении сопротивления контактов разрешение должно быть не хуже 0,01 Ом.

## Глава 3.

# Силовые трансформаторы

### 3.1. Общие сведения.

В соответствии с ГОСТом в РФ принята единая структура *условных обозначений* трансформатора: О – однофазный или Т – трехфазный трансформатор, М – масляный с естественной циркуляцией воздуха и масла, С – сухой, З – защищенное исполнение, Г – герметичное, Н (последняя буква – регулирование под нагрузкой). После буквенной части обозначения через тире указывается номинальная мощность трансформатора в киловольт-амперах (кВ·А), затем через дробь – класс напряжения стороны высшего напряжения (ВН) в киловольтах (кВ) и далее через тире – климатическое исполнение и категория размещения оборудования. Например, условное обозначение ТСЗ-1000/10-УЗ относится к трансформатору сухому с естественным воздушным охлаждением, в защищенном исполнении, двухобмоточному, мощностью 1000 кВ·А, класса напряжения 10 кВ, исполнения У категории размещения З (для умеренного климата и закрытых помещений). В паспортной табличке приводятся основные параметры трансформатора.

*Номинальные значения напряжения, мощности и тока трансформатора.* В качестве номинального указывается значение междуфазного (линейного) напряжения. Большинство трансформаторов с ВН 10 кВ выпускается с низшим напряжением (НН) для питания электроприемников напряжением 380 и 220 В. В обмотке ВН ряда трансформаторов предусматривается возможность изменения напряжения в диапазоне  $\pm 5\%$  номинального ступенями по 2,5%. Это достигается переключением ответвлений обмотки ВН, при обязательном отключении всех обмоток трансформатора от сети. Такой вид переключения сокращенно обозначается ПБВ (переключение без возбуждения), в отличие от РПН (регулирование под нагрузкой). Устройство типа ПБВ – ручного действия, устройства типа РПН имеют привод с кнопчным (дистанционным и местным) или автоматическим управлением.

Мощность трехфазного трансформатора определяется как сумма мощностей всех трех фаз. При равномерной нагрузке фаз полная мощность равна:

$$S = \sqrt{3} UI,$$

где  $U$  и  $I$  – линейные напряжение и ток.

Из этого выражения по известным номинальным значениям мощности и напряжения можно рассчитать соответствующие значения токов обмоток трансформатора:

$$I_{\text{н}} = S_{\text{н}} / \sqrt{3} U_{\text{н}}.$$

Так, например, у трансформатора с номинальной мощностью 400 кВ·А и напряжением 10/0,4 кВ номинальные токи обмоток будут:

$$I_{н1} = 400/(1,73 \cdot 10) = 23,1 \text{ А} - \text{ на стороне ВН (первичной)};$$

$$I_{н2} = 400/(1,73 \cdot 0,4) = 578 \text{ А} - \text{ на стороне ВН (вторичной)}.$$

Как правило, рабочий ток не должен превышать номинальных значений. Однако допускаются и токи выше номинального, значение которых и длительность ограничены и регламентированы так, чтобы не допустить при этом перегрева обмоток трансформатора.

*Схемы и группы соединения обмоток.* Обмотки трехфазных трансформаторов чаще всего соединяются по схеме «звезда» (Y, У) или «треугольник» (Δ, Д). Значительно реже встречается соединение «зигзаг» (Z), когда каждая фаза вторичной обмотки располагается на двух различных сердечниках. В электроустановках общего назначения наиболее распространены следующие схемы и группы соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов:

- звезда – звезда с выведенной нейтралью..... 12 (0);
- треугольник – звезда с выведенной нейтралью ..... 11;
- звезда с выведенной нейтралью – треугольник ..... 11.

Графические символы отражают схему соединения обмоток, а цифры – группу соединения в часах: положение часовой стрелки соответствует фазовому сдвигу векторов линейных напряжений обмотки НН относительно линейных напряжений обмотки ВН. Эти цифры получаются как частное от деления значения угла фазового сдвига в электрических градусах на 30, так что, например, «11 часов» соответствует отставанию вектора вторичного напряжения от первичного на 330 град. эл., а если эти вектора совпадают, то соединение принадлежит к группе 12 (360 : 30). В зависимости от схемы соединения фазных обмоток между собой и их полярности всего может быть получено 12 групп включения.

При симметричной нагрузке всех фаз трансформатора с выведенной нейтралью ток небаланса в нулевом проводе невелик. Значение его у трансформаторов со схемой «звезда – звезда» не должно превосходить 0,25, «треугольник – звезда» – 0,75 номинального тока обмотки НН во избежание перегрева и повреждения трансформатора. Соединение обмотки ВН в треугольник обеспечивает также значительно большие токи при однофазных КЗ в сети НН с заземленной нейтралью, что повышает надежность работы максимальной защиты. Поэтому при мощности 400 кВ·А и больше предпочтительно применение трансформаторов со схемой соединения обмоток ВН в треугольник.

*Напряжение короткого замыкания ( $u_k$ )* – это то пониженное значение линейного напряжения (приводится в процентах от номинального), которое надо приложить к одной из обмоток трансформатора, чтобы при замкнутой накоротку другой обмотке значения токов в обмотках были равны номинальным. Средние значения  $u_k$  для масляных трансформаторов находятся в пределах 4...6%, сухих трансформаторов – около 5,5%.

*Электрическая изоляция.* Различают изоляцию внешнюю (в воздухе) и внутреннюю (в масле), которая не подвергается атмосферным и другим внешним воздействиям. Внутреннюю изоляцию разделяют на главную и продольную. Главная – это изоляция обмотки от других обмоток и заземленных частей трансформатора, продольная – изоляция между витками, слоями, катушками данной обмотки. В сухих

трансформаторах изоляцию разделяют на главную и продольную. Различают также изоляцию нормальную, подвергающуюся грозovým перенапряжениям, и облегченную, на них не рассчитанную.

Объем испытаний и проверки параметров трансформаторов (автотрансформаторов, реакторов) при наладке регламентирован ПУЭ (1.8.16.), ПТЭЭП, действующими руководящими документами, а также инструкциями заводов – изготовителей. Перед началом испытаний необходимо произвести внешний осмотр трансформатора, проверить исправность бака и радиаторов, состояние изоляторов, уровень масла, положение кранов на радиаторе и маслопроводе к расширителю, целость маслоуказательного стекла, заземление, а также наличие противопожарных средств. Объем проверки и условия включения зависят от мощности, класса напряжения и условий транспортировки трансформатора (с маслом, с расширителем или без него).

## **3.2. Измерение характеристик и испытание электрической изоляции.**

### **3.2.1. Условия измерений.**

Измерение характеристик изоляции производится при температуре не ниже 10°C. Для трансформаторов, не остывших после нагрева, а также находящихся на открытом воздухе, за температуру изоляции принимают значение, измеренное по ее активному сопротивлению. Для масляных трансформаторов, находящихся внутри помещения, длительно отключенных и не подвергшихся подогреву, за температуру изоляции принимается температура верхних слоев масла. У трансформаторов без масла измерения производятся термометром, помещенным в карман термосигнализатора на крышке бака. При этом карман следует заполнить маслом.

Если температура масла ниже 10°, то трансформатор должен быть нагрет. Температура изоляции принимается равной средней температуре обмотки ВН фазы В, определяемой по сопротивлению обмотки постоянному току. Измерять сопротивление следует не ранее чем через 60 мин после прекращения тока нагрева или 30 мин после отключения внешнего источника тепла. Температуру обмотки рекомендуется рассчитывать по формуле:

$$T_x = \frac{R_x - R_o}{R_o} (235 + T_o) + T_o,$$

где  $R_x$  – измеренное значение сопротивления обмотки при температуре  $T_x$ ;  $R_o$  – сопротивление обмотки, измеренное на заводе-изготовителе при температуре  $T_o$  (по паспортным данным); 235 – температурная постоянная сопротивления для медных обмоток (для алюминиевых – 245).

Измерение характеристик изоляции следует производить не ранее, чем через 12 ч после окончания заливки масла. Перед началом измерений необходимо протереть поверхность вводов трансформатора и заземлить проверяемую обмотку для снятия емкостного заряда не менее чем на 5 мин, а между измерениями – не менее чем на 2 мин. Все вводы одного напряжения соединяют вместе, остальные обмотки и бак трансформатора заземляют, присоединив заземляющий проводник к специальному заземляющему болту (табл.3.1).

Таблица 3.1

## Схемы измерения характеристик главной изоляции трансформатора

Двухобмоточные трансформаторы		Трехобмоточные трансформаторы	
Обмотки, на которых производятся измерения	Заземляемые части трансформатора	Обмотки, на которых производятся измерения	Заземляемые части трансформатора
НН	Бак, ВН	НН	Бак, СН, ВН
ВН	Бак, НН	СН	Бак, ВН, НН
ВН+НН	Бак	ВН	Бак, НН, СН
		ВН+СН	Бак, НН
		ВН + СН +НН	Бак

К электрическим показателям состояния изоляции относятся ее сопротивление постоянному току, тангенс угла потерь, емкостные характеристики.

### 3.2.2. Измерение сопротивления изоляции обмоток.

Измерение производится мегаомметром на 2500 В с верхним пределом измерения не ниже 10 000 МОм. Показания мегаомметра отсчитываются через 60 с после приложения напряжения к изоляции обмотки. Значения  $R_{60}$  для вновь вводимых трансформаторов на напряжение до 35 кВ включительно мощностью до 10 МВ·А, залитых маслом, и дугогасящих реакторов должны быть не ниже следующих:

$T, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50	60	70
$R_{60}, \text{МОм}$	450	300	200	130	90	60	40

Сопротивление изоляции сухих трансформаторов при температуре 20...30 °С должно быть для обмоток с номинальным напряжением:

- более 1кВ до 6 кВ – не менее 300 МОм;
- более 6 кВ – не менее 500 МОм.

У остальных трансформаторов сопротивление изоляции, приведенное к температуре измерений на заводе-изготовителе, должно составлять не менее 50% исходного значения.

С повышением температуры сопротивление изоляции уменьшается. Для приведения значений  $R_{60}$ , измеренных на заводе-изготовителе, к температуре измерения при наладке производится пересчет.

По результатам измерения сопротивления изоляции определяется коэффициент абсорбции, который для трансформаторов напряжением до 35 кВ и мощностью до 10 000 кВ·А включительно при температуре от 10 до -30 °С должен быть не ниже 1,3. В ПУЭ это измерение не оговаривается.

### 3.2.3. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь.

При измерении  $\text{tg } \delta$  изоляции между обмотками трансформатора, изолированными от земли, применяется нормальная схема, а при измерениях согласно табл.3.1 – перевернутая схема. Для трансформаторов, залитых маслом, значение испытательного напряжения должно быть не более 60% заводского испытательного и не выше 10 кВ.

Измеренные значения  $\operatorname{tg} \delta$ , приведенные к температуре измерений на заводе – изготовителе, не должны отличаться от исходных в сторону ухудшения более чем на 50%. Исходными считаются результаты измерений, полученные на заводе – изготовителе или после капитального ремонта. При отсутствии на объекте сведений о результатах заводских испытаний можно ориентироваться на данные табл.3.2 (для вновь вводимых трансформаторов, залитых маслом, классов напряжения до 35 кВ включительно).

Таблица 3.2

Наибольшие допустимые значения  $\operatorname{tg} \delta$  (%) изоляции обмоток трансформатора

Мощность трансформатора, кВ·А	Температура обмотки, °С						
	10	20	30	40	50	60	70
До 6300 включительно	1,2	1,5	2,0	2,5	3,4	4,5	6,0
10 000 и более	0,8	1,0	1,3	1,7	2,3	3,0	4,0

В случае неудовлетворительного результата измерения  $\operatorname{tg} \delta$  обмоток следует измерить  $\operatorname{tg} \delta$  масла, подсушка или замена которого при необходимости осуществляется силами монтажной или эксплуатирующей организации.

Измерение  $\operatorname{tg} \delta$  для трансформаторов мощностью до 1600 кВ·А не обязательно.

#### 3.2.4. Измерение емкостных характеристик.

Определение отношения  $C_2/C_{50}$  производится по схемам табл.3.1. Допустимые значения  $C_2/C_{50}$  трансформаторов напряжением до 35 кВ включительно, залитых маслом, приведены в табл.3.3 (РД 16.363-87).

Таблица 3.3

Наибольшие допустимые значения  $C_2/C_{50}$  изоляции обмоток трансформаторов напряжением до 35 кВ

Мощность трансформатора, кВ·А	Температура обмотки, °С		
	10	20	30
До 6300 включительно	1,1	1,2	1,3
10 000 и более	1,05	1,15	1,25

Отношение  $\Delta C/C$  (метод «емкость – время») измеряется, как правило, для трансформаторов, не заполненных маслом, в связи с тем, что значение  $\Delta C/C$  сильно зависит от  $\operatorname{tg} \delta$  масла. У сухого трансформатора значение  $\Delta C/C$  невелико (0,02 – 0,08), у влажного может быть значительно больше. Если трансформатор подвергался ревизии со сливом масла, то фиксируют значение отношения  $\Delta C/C$ , измеренное после ревизии, и его приращение за время ревизии, приведенные к одной и той же температуре (табл.3.4).

ПУЭ, 7- изд., и ПТЭЭП емкостные характеристики не нормируют и их измерения не требуют, однако оно может производиться, если владелец электроустановки или

электроснабжающая организация сочтут это необходимым для окончательного суждения о качестве изоляции.

Таблица 3.4

Наибольшие допустимые значения  $\Delta C/C$  обмоток трансформатора без масла

Класс напряжения обмотки ВН, мощность трансформатора	Температура, °С	Значение $\Delta C/C, \%$	Приращение $\Delta C/C, \%$
До 35 кВ включительно, мощностью до 6300 кВ·А включительно	10	13	4
	20	20	6
	30	30	9
	40	45	13,5
	50	75	22
До 35 кВ включительно, мощностью до 10 000 кВ·А и более и 110 кВ независимо от мощности	10	8	3
	20	12	4
	30	18	5
	40	29	8,5
	50	44	13

Отношение  $\Delta C/C$  растет с повышением не только влажности, но и температуры. Пересчет от температуры  $T_2$  к температуре  $T_1$  производят умножением измеренного значения  $\Delta C/C$  на поправочный коэффициент:

Разница температур $T_2 - T_1, ^\circ\text{C}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Поправочный коэффициент	1,25	1,55	1,95	2,40	3,00	3,70	4,60	5,70	7,00	8,80

Метод *емкость – температура* для трансформаторов используется редко в связи с большой трудоемкостью и потерями энергии.

### 3.2.5. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты.

Испытание осуществляется, как правило, на собранном трансформаторе (установлены постоянные вводы, крышки, залито масло), после проверки характеристик изоляции и масла, если они удовлетворяют нормам. В продолжение испытаний расширитель силового трансформатора следует оставлять открытым.

Испытывается изоляция обмоток вместе с вводами. Продолжительность приложения нормированного испытательного напряжения 1 мин. Испытуемую обмотку замыкают накоротко и присоединяют к выводу испытательного трансформатора, другой вывод которого заземляют; свободные обмотки силового трансформатора также замыкают накоротко и присоединяют к заземленному баку. Испытание внутренней изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов и реакторов с нормальной изоляцией и трансформаторов с облегченной изоляцией (сухих и маслонаполненных) производится по нормам табл.3.5.

Трансформатор считается выдержавшим испытание, если не произошло пробоя или перекрытия изоляции, замеченных по звуку, выделения газа или дыма или по характерным показаниям приборов (падение напряжения и резкое увеличение тока утечки при пробое). Испытание производится при удовлетворительных результатах

проверки состояния обмоток. До и после испытания необходимо измерить сопротивление изоляции, значение которого за время испытания не должно измениться.

Таблица 3.5

**Испытательное напряжение по отношению к корпусу и другим обмоткам трансформаторов и реакторов**

Класс напряжения обмотки, кВ	Испытательное напряжение, кВ, для изоляции	
	нормальной	облегченной
3	16,2	9
6	22,5	15,4
10	31,5	21,6
15	40,5	33,5
20	49,5	-
35	76,5	-

Согласно ПУЭ, испытание повышенным напряжением изоляции обмоток маслонаполненных трансформаторов не обязательно. Испытание сухих трансформаторов должно производиться по нормам табл.3.5 для аппаратов с облегченной изоляцией. Импортные трансформаторы разрешается испытывать по нормам табл.3.5, если они не превышают значений напряжения, которым трансформатор был испытан на заводе – изготовителе.

### **3.3. Проверка обмоток трансформатора.**

#### **3.3.1. Измерение сопротивления обмоток постоянному току.**

Это измерение позволяет обнаружить ряд характерных дефектов и повреждений, как то:

- обрыв одного или нескольких из параллельных проводов;
- нарушение контактных соединений и присоединений проводников;
- ненадежные контакты в переключающих устройствах;
- неправильная установка привода ПБВ.

Измерение производится на всех ответвлениях обмоток всех фаз, при всех положениях устройства переключения ответвлений. Перед измерением рекомендуется не менее трех раз произвести полный цикл переключения РПН с тем, чтобы устранить окисел на контактах. При измерении на одной из обмоток все остальные обмотки должны быть разомкнуты.

Измеряются линейные сопротивления, а при наличии нулевого вывода дополнительно одно из фазных сопротивлений. Измерения производятся миллиметром (микрометром) по четырехпроводной схеме или методом амперметра – вольтметра. Результат не должен отличаться более чем на 2% от значения, полученного на таком же ответвлении других фаз, или от данных завода-изготовителя.

Измерение производится либо мостами постоянного тока, либо методом амперметра – вольтметра (милливольтметра). При выборе источника измерительного тока следует иметь в виду, что напряжение его должно быть достаточным для получения

необходимого значения измерительного тока, но вместе с тем и не высоким, чтобы при изменении и особенно при разрыве тока не вызвать возникновения опасных ЭДС на свободных обмотках. В качестве источника тока удобно использовать аккумуляторную батарею на 4...12 В, значение измерительного тока выбирается в пределах 0,5 ...20 А.

Измерение омического сопротивления обмоток силового трансформатора в режиме холостого хода имеет специфическую особенность, обусловленную тем, что полное сопротивление цепи обмотки является комплексной величиной с малой активной составляющей ( $R_{об}$ ) и значительной индуктивностью ( $L_m$ ), из-за чего постоянная времени ( $T = L_m/R_{об}$ ) достаточно велика и тем больше, чем больше мощность трансформатора (табл.3.6). Поэтому при подаче на обмотку постоянного напряжения ток в ней устанавливается не сразу, а по истечении некоторого времени. Если потребовать, чтобы отклонение от установившегося значения измерительного тока  $I$  было не более 1%, то это время составит около  $5T$ , т.е. достигает нескольких минут уже для трансформаторов мощностью порядка 1000 кВ·А.

Таблица 3.6

Ориентировочные значения некоторых параметров обмоток силовых трансформаторов напряжением 10 кВ

Мощность трансформатора, кВ·А	Сопротивление обмотки постоянному току, Ом	Индуктивность намагничивания, Гн	Постоянная времени, с
10	120	75	0,5
25	70	70	1,0
63	25	64	2,5
100	11	58	5,5
160	6	50	8
250	3	36	12
400	1,5	27	18
630	1,0	34	34
1000	0,5	21	42
1600	0,3	13	44
6300	0,06	6	100
25000	0,01	2	200

Примечания: 1. Приведенные данные являются средними расчетными значениями указанных параметров. 2. Значения индуктивности цепи намагничивания  $L_m$  рассчитаны в предположении, что потери в стали отсутствуют.

Из-за малости сопротивления  $R_{об}$  значение установившегося падения напряжения на нем  $\Delta U = IR_{об}$  обычно не превышает несколько вольт. Во избежание повреждения вольтметра от перенапряжений, возникающих при изменении тока, вначале подают напряжение на обмотку, а вольтметр подсоединяют после установления тока; по окончании измерений сперва отсоединяют вольтметр, затем прерывают ток. Провода от вольтметра подключают к выводам трансформатора непосредственно, чтобы исключить падение напряжения на амперметре. Принимают меры для сокращения длительности переходного процесса:

а) напряжение источника постоянного тока  $U_n$  выбирают заведомо больше, чем ожидаемое значение падения напряжения на измеряемом сопротивлении:  $U_n \gg \Delta U$ . В процессе измерения постепенно уменьшают приложенное напряжение от  $U_n$  до  $\Delta U$  так, чтобы значение измерительного тока не превышало 20% номинального тока обмотки во избежание ее нагрева. При кратковременных (до 1 мин) измерениях допускается повышать значение тока до 50% номинального.

б) в измерительную цепь вводят дополнительное активное сопротивление  $R_d = (5 \dots 10)R_{06}$ , уменьшая тем самым постоянную времени до значения  $T = L_m / (R_{06} + R_d)$ ; по окончании измерений из полученного результата вычитают  $R_d$ .

В современных специализированных приборах эти меры осуществляются автоматически.

Для сравнения измеренных сопротивлений их значения должны быть приведены к одной и той же температуре:

для обмоток из меди

$$R_2 = R_1 \frac{235 + T_2}{235 + T_1};$$

для обмоток из алюминия  $R_2 = R_1 \frac{245 + T_2}{245 + T_1}$ ,

где  $R_2$  – сопротивление, приводимое к температуре  $T_2$ ;

$R_1$  – сопротивление, измеренное при температуре  $T_1$ .

Температура обмотки масляного трансформатора, не подвергавшегося нагреву более 20 ч, принимается равной температуре верхних слоев масла, а если не менее 3 ч, то полусумме температур верхних и нижних слоев. Для сухих трансформаторов и масляных мощностью до 1 МВ·А, находящихся в помещениях, за температуру обмотки принимают температуру окружающего воздуха.

### 3.3.2. Проверка коэффициента трансформации.

Коэффициентом трансформации называют отношение первичной и вторичной ЭДС или напряжений в режиме холостого хода:

$$K_T = E_1/E_2 = U_1/U_2.$$

У понижающего трансформатора  $K_T > 1$ , у повышающего  $K_T < 1$ . Из практических соображений коэффициент трансформации часто определяют как отношение большей ЭДС к меньшей, независимо от того, какая обмотка является первичной. У трехобмоточных трансформаторов коэффициенты трансформации представляются отношениями ЭДС обмоток ВН/СН, ВН/НН и СН/НН. Коэффициент трансформации измеряют для проверки паспортных данных и правильности подсоединения ответвлений обмоток к переключателям, на всех ответвлениях обмоток всех фаз. Кроме того, этим методом можно обнаружить наличие витковых замыканий в обмотках.

Измерения производят методом двух вольтметров класса точности 0,2 или 0,5. Подводимое напряжение должно быть не менее 1% номинального. При испытании трехфазных трансформаторов симметричное линейное напряжение подводят к одной из обмоток и измеряют линейные напряжения на одноименных зажимах обеих обмоток. В большинстве случаев подают напряжение 3х0,4 кВ со стороны ВН. Если нуль соединенной в звезду обмотки доступен, то коэффициент трансформации может быть определен по фазным напряжениям.

При отсутствии источника симметричного трехфазного напряжения коэффициент трансформации трехфазного трансформатора со схемой соединения Y/Δ или Δ/Y можно определить путем однофазного возбуждения. Для этого поочередно закорачивают одну из фаз обмотки, соединенной в треугольник, и проводят измерения на свободных фазах обеих обмоток. При схеме Y/Δ фазные коэффициенты трансформации будут равны:

$$k_{1ф} = U_{AB}/2U_{ab}; k_{2ф} = U_{BC}/2U_{bc}; k_{3ф} = U_{AC}/2U_{ac}.$$

Переход к линейному коэффициенту трансформации осуществляется умножением фазного на  $\sqrt{3}$ , а при схеме Δ/Y – делением на  $\sqrt{3}$ . При соединении обмоток по схеме звезда с нулевым выводом – треугольник напряжение подводится поочередно к каждой фазе и закорачивать фазы не требуется. В этом случае определяется фазный коэффициент трансформации:

$$k_{1ф} = U_{A0}/U_{ab}; k_{2ф} = U_{B0}/U_{bc}; k_{3ф} = U_{C0}/U_{ac}.$$

Измеренное значение коэффициента трансформации не должно отличаться более чем на 2% от полученного на том же ответвлении обмоток других фаз, или от заводских данных. У трансформаторов с РПН разница не должна превышать значения ступени регулирования. Для трехобмоточных трансформаторов достаточно определить коэффициент трансформации у двух пар обмоток, причем желательно, чтобы в каждую проверяемую пару входила обмотка без ответвлений.

### **3.3.3. Проверка группы соединения трехфазных трансформаторов и полярности выводов однофазных трансформаторов.**

Производится при отсутствии паспортных данных или сомнении в их достоверности. Наиболее распространены трехфазные трансформаторы с группами соединения 12 (0) и 11: это схемы Y/Y и Y/Δ со сдвигом фаз 0 и 330° соответственно. Для однофазных трансформаторов возможны две группы соединений: 0 и 6. У трехобмоточных трансформаторов проверку производят обычно для обмоток ВН-СН и ВН-НН. Точное знание группы соединений необходимо для решения вопроса о возможности включения трансформаторов на параллельную работу. Проверка может производиться путем снятия векторных диаграмм напряжений на выводах обмоток или одним из следующих методов.

*Прямой метод (метод фазометра).* Последовательную обмотку однофазного фазометра подключают через реостат к выводам одной из обмоток (обычно НН), а параллельную – к одноименным выводам другой обмотки испытуемого трансформатора (рис.3.1). Значение сопротивления реостата R2 выбирается так, чтобы ограничить

ток в последовательной обмотке до номинального, например, до 5 А. Благодаря тому, что активное сопротивление R2 оказывается намного больше сопротивления обмотки, ток в ней совпадает по фазе с напряжением, и прибор измерит поэтому фазный угол между напряжениями  $U_{AB}$  и  $U_{ab}$ . Значение напряжения, подводимого к параллельной обмотке, должно быть достаточным для нормальной работы фазометра; при необходимости вводят добавочное сопротивление R1 и в цепь этой обмотки.

Группу соединения определяют по измеренному углу фазного сдвига  $\varphi$  между векторами напряжений обмоток ( $\varphi / 30$ ). У трехфазных трансформаторов производят не менее двух измерений (для двух пар линейных зажимов).

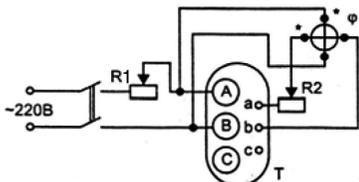


Рис.3.1. Проверка группы соединения обмоток трансформатора с помощью фазометра

*Метод импульсов постоянного тока (метод полярмера).* Используется для однофазных трансформаторов, а также для трехфазных с выведенной нулевой точкой или при соединении обмоток по схеме  $\Delta/\Delta$ . К обмотке ВН трансформатора подводится напряжение 2...12 В постоянного тока, к обмотке НН (или СН) подключается поляризованный вольтметр (милливольтметр), например стрелочный магнитоэлектрической системы, желательно с нулем посередине, или цифровой с индикацией полярности; в аналоговом приборе с нулем в начале шкалы стрелку следует сдвинуть вправо с помощью корректора. Источник питания (батарею) и прибор подключают к одноименным выводам обмоток зажимами одинаковой полярности (рис.3.2) и замечают отклонение стрелки прибора при кратковременном включении батареи.

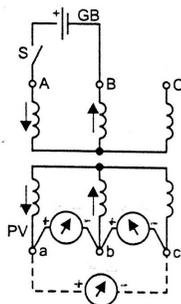


Рис.3.2. Проверка группы соединения обмоток трансформатора импульсным методом

Полученные результаты сравнивают с данными табл.3.7, где «+» обозначает отклонение стрелки вправо, а «-» влево, «0» – стрелка не отклоняется. При отключении тока стрелка отклоняется в обратную сторону, и знаки в табл.3.7 должны быть изменены на противоположные.

Таблица 3.7

Показания поляризованного прибора при подаче импульсов постоянного тока

Питание подведено к зажимам	Отклонение стрелки прибора, присоединенного к зажимам					
	ab	bc	ca	ab	bc	ca
	Группа 0			Группа 11		
AB	+	-	-	+	0	-
BC	-	+	-	-	+	0
CA	-	-	+	0	-	+

*Метод двух вольтметров* (рис.3.3). Вольтметрами PV1 и PV2 измеряют линейный коэффициент трансформации  $K_{л}$ . Если вольтметр PV2 включается через трансформатор напряжения, найденное значение следует разделить на коэффициент трансформации измерительного трансформатора.

Соединяют выводы А и а испытываемого трансформатора, подводят напряжение к одной из его обмоток и вольтметром PV2 измеряют напряжения на выводах другой обмотки, непосредственно или через измерительный трансформатор. При проверке однофазных трансформаторов измеряют напряжение между выводами x – X (рис.3.3,а).

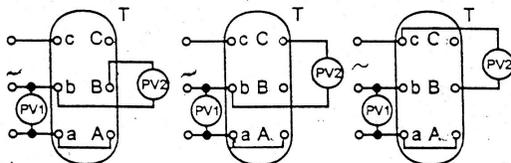


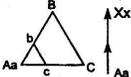
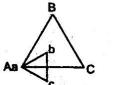
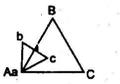
Рис.3.3. Определение группы соединения обмоток трансформатора методом двух вольтметров при непосредственном включении вольтметра PV2

У трехфазных трансформаторов вольтметром PV2 измеряют поочередно напряжения между выводами в – В, в – С и с – В (рис.3.3,б).

Измеренные значения напряжения сравнивают с расчетными из табл.3.8, где  $U_{л}$  – линейное напряжение, измеренное вольтметром PV1.

Таблица 3.8

Векторные диаграммы и расчетные формулы для определения группы соединения обмоток трансформатора (группы 0; 1 и 11).

Возможное соединение обмоток и векторная диаграмма линейных ЭДС	$U_{b-b} (U_x - x)$	$U_{b-c}$	$U_{c-b}$
УУ; ДД; ДЗ 	$U_2(K_n - 1)$	$U_2\sqrt{1 - K_n + K_n^2}$	$U_2\sqrt{1 - K_n + K_n^2}$
УД; ДУ; ДЗ 	$U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}K_n + K_n^2}$	$U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}K_n + K_n^2}$	$U_2\sqrt{1 + K_n^2}$
УД; ДУ; УЗ 	$U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}K_n + K_n^2}$	$U_2\sqrt{1 + K_n^2}$	$U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}K_n + K_n^2}$

Описанный метод имеет существенные недостатки:

- высокий потенциал в измерительных цепях;
- при больших значениях коэффициента трансформации разность напряжений на ВН и НН близка к напряжению на ВН, следствием чего может быть большая погрешность расчета по табл.3.8, особенно при колебаниях напряжения;
- введение промежуточных трансформаторов (измерительных, понижающих) чрезмерно усложняет схему;
- необходимость расчетов;
- неоднозначность результата (в табл.3.8 – три варианта соединений).

В наладоочной практике используется преимущественно импульсный метод.

### 3.4. Измерение тока и потерь холостого хода (XX).

Согласно ПУЭ, измерения производятся у трансформаторов мощностью 1000 кВ·А и более при напряжении на обмотке НН, равном указанному в протоколе заводских испытаний (паспорте), но не более 380 В. Потери холостого хода трехфазных трансформаторов измеряются при однофазном возбуждении по схемам завода – изготовителя. При вводе трансформаторов в эксплуатацию соотношение потерь на разных фазах трехфазных трансформаторов не должно отличаться от заводских данных более чем на 5%, а у однофазных трансформаторов отличие измеренных значений потерь от исходных не должно превышать 10%.

Ток и потери XX определяют из *опыта холостого хода*. Опытom XX называют испытание, при котором к одной из обмоток трансформатора (обычно НН) подводится симметричное трехфазное напряжение промышленной частоты, практически синусоидальной формы, причем другие обмотки остаются незамкнутыми. В этом опыте могут быть выявлены витковые замыкания в обмотке и повреждения в активной час-

ти магнитопровода (замыкание между листами электротехнической стали). Измеряются ток ХХ, который создает магнитный поток в сердечнике, и мощность холостого хода, которая расходуется в основном на потери в стали.

Потери ХХ выражаются обычно в процентах от номинального тока трансформатора, реже – в кВт. В трехфазных трансформаторах значения тока ХХ различных фаз неодинаковы: в средней фазе они обычно на 20...30% меньше, чем в крайних, из-за меньшей длины пути магнитного потока. Поэтому значение тока ХХ трехфазного трансформатора определяют как среднеарифметическое из значений токов трех фаз.

Измерения потерь могут проводиться при номинальном или пониженном напряжении. Второй способ реализуется проще и получил более широкое распространение, чем первый. При этом используют, как правило, линейное напряжение сети, более близкое к синусоидальному, чем фазное напряжение. Измерения желательно производить до начала других испытаний трансформатора, особенно тех, которые связаны с подачей постоянного тока (измерение сопротивления обмоток постоянному току, прогрев постоянным током и др.) и остаточным намагничиванием. Остаточное намагничивание может возникать также и при отключении трансформатора от сети переменного тока, если оно произошло не в момент перехода тока через нуль. У трансформатора, магнитопровод которого был намагничен, потери холостого хода, определенные при пониженном напряжении, могут в 1,5...2 раза превысить результаты заводских или аналогичных испытаний.

Снятие остаточного намагничивания производят однократным плавным (не менее чем за 30 с) увеличением и последующим плавным снижением переменного напряжения или пропуская постоянный ток с изменением его полярности. Начальное значение постоянного тока размагничивания должно быть не менее удвоенного тока холостого хода трансформатора при номинальном напряжении, а каждое последующее значение на 30...40% ниже предыдущего. В конце процесса ток размагничивания должен быть не больше тока ХХ при малом напряжении.

Измерения потерь холостого хода при малом напряжении могут производиться с приведением или без приведения их к номинальному напряжению. Измерение *без приведения потерь* к номинальному напряжению (метод сравнения) имеет то преимущество, что подводимое напряжение может выбираться в пределах 1...50% номинального, т.е. почти всегда может быть использовано напряжение 220 или 380 В. Для трехфазных трансформаторов одно и то же напряжение подводится поочередно:

– к линейному и нулевому выводам (например, а – 0, b – 0, с – 0), если возбуждаемая обмотка соединена в звезду с выведенной нейтралью;

– к двум линейным выводам (например, а – b, b – с, с – а), если обмотка соединена в звезду с недоступной нейтралью или в треугольник.

Измерения выполняют по схемам рис.3.4 Сначала измеряют суммарную мощность  $P_o$ , потребляемую трансформатором и измерительными приборами, а затем, отключив трансформатор, – мощность  $P_n$ , потребляемую приборами. Потери в трансформаторе находят как разность

$$P_{пт} = P_o - P_n.$$

Оценку результатов опыта производят путем сопоставления измеренных значений мощности  $P_{пт}$  с данными завода – изготовителя или полученными на одинаковых

трансформаторах при том же напряжении возбуждения. Обычно эти результаты близко совпадают, тогда как измеренные значения тока холостого хода могут заметно отличаться.

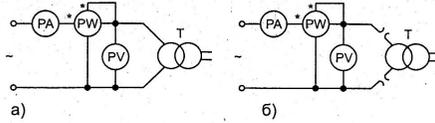


Рис.3.4. Измерение потерь холостого хода трансформатора (для одной пары выводов): а – суммарных потерь; б – потерь в приборах

Измерение с *приведением потерь* к номинальному напряжению проводится по тем же схемам, но одна из фаз трансформатора при этом поочередно закорачивается. Подводимое напряжение выбирается равным 5... 10% номинального напряжения возбуждаемой обмотки. Потери определяются из трех опытов по формуле:

$$P_o = \frac{P_{ab} + P_{bc} + P_{ac}}{2},$$

где  $P_{ab}$ ,  $P_{bc}$  и  $P_{ac}$  – потери при закорачивании соответственно фаз С, А и В.

При измерении потерь у трансформаторов с группой соединения обмоток  $Y_o/\Delta$  можно руководствоваться табл.3.9.

Таблица 3.9

Проведение опытов XX у трансформаторов с группой  $Y_o/\Delta$

№ опыта	Питание подводится к выводам НН	Закорачиваются выводы НН или ВН	
		Выводы НН	Выводы ВН
1	a – b	b – c	C – 0
2	b – c	a – c	A – 0
3	a – c	a – b	B – 0

Потери холостого хода  $P_{он}$ , приведенные к номинальному напряжению  $U_n$ , определяются по формулам:

$$P_{он} = P_o \left( \frac{2U_n}{U_{исн} \sqrt{3}} \right)^n$$

для обмоток, соединенных в звезду, или

$$P_{он} = P_o \left( \frac{U_n}{U_{исн}} \right)^n$$

для обмоток, соединенных в треугольник,

где  $n$  – показатель степени, значение которого зависит от сорта трансформаторной стали и составляет обычно 1,8 для горячекатаной и 1,9 для холоднокатаной стали.

Значение приведенных потерь сравнивают с данными завода – изготовителя; у исправных трансформаторов расхождение обычно не превышает 5%.

Измерение *тока холостого хода* производят после включения трансформатора под рабочее напряжение. Используемые для измерения амперметры (а также токовые обмотки ваттметров) должны быть включены в цепь вторичных обмоток стационарных трансформаторов тока класса точности Д или 0,5 с небольшой нагрузкой. Не рекомендуется применять амперметры выпрямительной системы в связи с тем, что вследствие несинусоидальности кривой тока холостого хода при измерениях может быть получена большая погрешность.

Оценку результатов измерений производят по соотношению токов фаз и их абсолютному значению. Токи возбуждения крайних фаз трехфазного трансформатора практически одинаковы и на 20...35% больше тока возбуждения средней фазы. Ориентировочно значения тока холостого хода большинства трансформаторов мощностью 1...32 МВ·А напряжением до 35 кВ – в пределах 0,5 ...1.5% и тем меньше, чем больше мощность и напряжение трансформатора.

### 3.5. Опыт короткого замыкания трансформатора.

В этом опыте определяют напряжение, потери и сопротивление короткого замыкания. ПУЭ-7 предусматривают только измерение полного сопротивления короткого замыкания ( $Z_k$ ) у трансформаторов 125 МВ·А и более, но соответствующие измерения могут потребоваться и для аппаратов меньшей мощности. Измеренное значение не должно отличаться от паспортного более чем на 5%.

При опыте вторичную обмотку замыкают накоротко, а первичную (ВН, СН) питают от сети переменного тока 380 или 220 В. Максимальная чувствительность измерений достигается выбором пар обмоток, расположенных на одном стержне, а минимальное число пересоединений на трехобмоточных трансформаторах – при последовательности измерений ВН – НН, СН – НН и ВН – СН. У трехфазных трансформаторов измерения производятся поочередно замыканием накоротко каждой пары фаз вторичной обмотки при подаче напряжения на одноименные фазы первичной обмотки, а в качестве результата принимается среднеарифметическое значение параметра для всех трех фаз. Замыкание обмоток и подвод питания к ним выполняют возможно более короткими проводами, плотность тока в которых принимают не более 1,8 (медь) и 1,2 А/мм<sup>2</sup> (алюминий). Значение тока в обмотках трансформатора должно находиться в пределах от 25% до 100% номинального. При токе свыше 40% номинального время его протекания должно быть не более, с:

$$240/(\sigma_1 \sigma_2) \text{ для алюминиевых проводов и } 480/(\sigma_1 \sigma_2) \text{ для медных проводов,}$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – плотность тока в обмотках, А/мм<sup>2</sup>. Это означает, что если измерительный ток выбран в пределах 40...100% номинального, то, например, при плотности тока в первичной обмотке  $\sigma_1 = 2,5$  А/мм<sup>2</sup>, во вторичной –  $\sigma_2 = 2,0$  А/мм<sup>2</sup> интервал от момента подачи напряжения до снятия показаний приборов должен быть ограничен временем около 50 с для алюминиевых или 100 с для медных обмоток.

Схемы измерения параметров холостого хода и короткого замыкания аналогичны. Потери и напряжение короткого замыкания, соответствующие номинальному току обмотки, вычисляются по формулам:

$$P_k = P_{оп} \left( \frac{I_n}{I_{оп}} \right)^2, U_k = \frac{U_{оп} I_n}{U_n I_{оп}} 100\%.$$

Здесь  $P_{оп}$ ,  $U_{оп}$  – потери и напряжение короткого замыкания, соответствующие тому значению тока  $I_{оп}$ , при котором проводился опыт;  $U_n$  и  $I_n$  – номинальные значения напряжения и тока обмотки, к которой подводилось напряжение при опыте.

Для трехфазных трансформаторов опыт КЗ можно производить в режиме однофазного возбуждения, с замыканием накоротко всех трех фаз на вторичной стороне и питанием попарно двух фаз на первичной. Измеренные значения потерь и напряжения КЗ пересчитывают на трехфазный режим:

$$P_k = \frac{P_{кAB} + P_{кBC} + P_{кAC}}{2}, U_k = \frac{\sqrt{3}}{6} (U_{кAB} + U_{кBC} + U_{кAC}).$$

Здесь:  $P_{кAB}$  ( $BC$ ,  $AC$ ),  $U_{кAB}$  ( $BC$ ,  $AC$ ) – потери и напряжения КЗ, измеренные в однофазном режиме.

Полученные данные позволяют рассчитать сопротивления короткого замыкания трансформатора:

$$\text{полное } Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3} I_n},$$

$$\text{активное } R_k = \frac{P_k}{3 I_n^2} \text{ и}$$

$$\text{индуктивное } X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

На рис.3.5 показана эквивалентная электрическая схема однофазного трансформатора с замкнутой накоротко вторичной цепью (пунктир). Нетрудно видеть, что при этом вторичная обмотка подключается параллельно ветви намагничивания  $R_{ст} - L_m$ , а так как сопротивление этой ветви намного больше, чем обмотки, практически можно считать, что сопротивление короткого замыкания есть сумма сопротивлений обмоток трансформатора:

$$R_k \approx R_1 + R_2'; X_k \approx X_1 + X_2'.$$

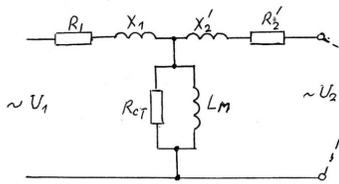


Рис.3.5. Типовая круговая диаграмма работы переключающего устройства:

При этом надо учитывать, что здесь в качестве слагаемых участвуют *приведенные* сопротивления вторичной обмотки, т.е. величины, приведенные к первичной обмотке. Чтобы получить действительные значения сопротивлений вторичной обмотки, достаточно их приведенные значения поделить на квадрат коэффициента трансформации:

$$R_2 = R_2'/K_T^2; X_2 = X_2'/K_T^2.$$

Сопротивления обмоток легко найти из опыта короткого замыкания, если приближенно принять, что у обеих обмоток (в схеме замещения) они одинаковы:

$$R_1 \approx R_2' = R_K/2; X_1 \approx X_2' = X_K/2.$$

### 3.6. Измерение сопротивления нулевой последовательности.

Знание этого сопротивления требуется при расчете несимметричных режимов работы трехфазного трансформатора (несимметричная нагрузка фаз, обрыв или короткое замыкание фазы). Сопротивление нулевой последовательности измеряют между соединенными вместе линейными выводами и выведенной нейтралью обмоток, собранных в звезду или зигзаг; соединение треугольником сохраняется. Сопротивление нулевой последовательности, приходящееся на одну фазу, будет, Ом :

$$Z_0 = 3 U/I,$$

где  $U$  – подводимое напряжение, В;  $I$  – измеренное значение тока, А.

Длительность испытания должна быть ограничена с тем, чтобы не допустить перегрева металлических частей трансформатора. ПУЭ эти измерения не регламентируются.

### 3.7. Проверка работы переключающего устройства (РПН).

Устройства РПН осуществляют ступенчатое регулирование напряжения трансформатора под нагрузкой путем переключения ответвлений обмотки без разрыва цепи тока. Переключение производится подвижными контактами так называемого избирателя (переключателя) в обесточенном состоянии, а разрыв цепи и дугогашение достигаются с помощью контакторов в двух параллельных ветвях. В нормальном рабочем положении обе ветви подключены к одному ответвлению регулировочной об-

мотки трансформатора. При переключении вначале контактор разрывает цепь тока в одной ветви, избиратель переходит на другое ответвление при отсутствии тока, а весь нагрузочный ток после погасания дуги проходит через вторую ветвь. Затем контактор вновь включает первую цепь и прерывает ток во второй, которая затем подключается на параллельную работу с первой.

Разрыв дуги контактами может осуществляться в масле, воздухе, вакууме или с применением силовых полупроводниковых приборов. В качестве токоограничивающих элементов используются реакторы или резисторы. В ряде схем применяется предизбиратель, позволяющий изменять полярность подключения регулировочной обмотки по отношению к основной и тем самым расширить диапазон регулирования напряжения.

Проверку срабатывания переключающего устройства следует производить согласно заводским инструкциям. С этой целью снимают диаграммы последовательности работы устройства, называемые *круговыми диаграммами*. Круговая диаграмма отражает зависимость моментов действия контактов избирателя, предизбирателя и контактора от углов поворота вала привода или отдельного элемента. Снятие круговой диаграммы следует производить на всех положениях переключателя, одновременно для всех фаз, в обоих направлениях переключения. Последнее требование вызвано тем, что из-за наличия люфтов, т.е. зазоров в механизмах переключения и привода, круговые диаграммы для разных направлений отличаются значением угла люфта (угла поворота валов для выбора всех зазоров).

На рис.3.6 в качестве примера приведена круговая диаграмма переключающего устройства реакторного типа, на которой обозначены углы поворота вала:

$\alpha$  - от нормального положения до момента размыкания контактора или от момента замыкания до нормального положения контактора;

$\beta$  - от момента размыкания контакта контактора до момента размыкания контакта избирателя или от момента замыкания контакта избирателя до момента замыкания контакта контактора;

$\gamma$  - от момента размыкания контакта избирателя до момента его замыкания;

$\Delta$  - от момента размыкания контакта предизбирателя до момента его замыкания.

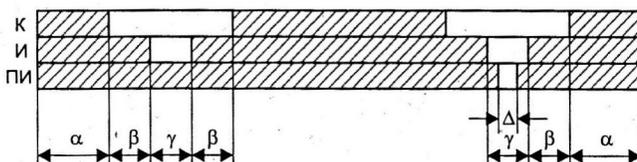


Рис.3.6. Типовая круговая диаграмма работы переключающего устройства:

К – контактор; И – избиратель; ПИ – предизбиратель; заштрихованная часть – контакт замкнут

Угол  $\alpha$  должен гарантировать полное замыкание контактов контактора, в том числе главного контакта, что необходимо для нормальной эксплуатации устройства.

Угол  $\beta$  характеризует перекрытие контактов избирателя и отсутствие одновременного размыкания контактов контактора и избирателя. Недопустимо его уменьшение до нуля, так как контакты избирателя не предназначены для разрыва тока. У РПН типа РНТ-13 этот угол должен быть в пределах  $25...30^\circ$ , типа РНТ-18 –  $15...20^\circ$ , а у РНТ-20 – не менее  $30^\circ$ .

Наладка РПН рассматривается ниже на примере устройства типа РНТ-13. Для отсчета углов изготавливают диск (круг) со шкалой на  $360^\circ$  и стрелку из проволоки. Если на крышке привода отсутствует отсчетный лимб, то на вертикальный вал надевается шкала (которую обычно разрезают, чтобы не расцеплять нониусную муфту), а на неподвижной части, к одному из болтов на нониусной муфте, прикрепляют стрелку. Можно поступить и наоборот: шкалу укрепить на нониусной муфте, а стрелку – на одном из болтов в верхней части приводного механизма. Переключающее устройство прокручивают во всем диапазоне регулирования, чтобы убедиться в отсутствии дефектов в механической части привода и регулировочного устройства. Открывают бак контактора и сливают из него некоторое количество масла до тех пор, когда контакты контактора окажутся на воздухе. К контактам подсоединяют сигнальные лампы, а к соответствующим выводам подводят напряжение питания – переменное (например, 12 или 36 В) или постоянное от батареек или аккумуляторов (рис.3.7). По моментам погасания и загорания сигнальных ламп (или с помощью шупа толщиной  $0,1...0,2$  мм) фиксируют углы поворота вала. Если средняя точка реактора не выведена, диаграмма снимается поочередно для плеч SAC1-K1 и SAC2-K2; между контактами свободного контактора вставляют изоляционные прокладки. Перед подачей напряжения на схему одна из нерегулируемых обмоток трансформатора, например обмотка НН, закорачивается.

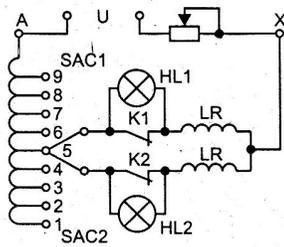


Рис.3.7. Схема снятия круговой диаграммы работы переключающего устройства типа РНТ-13

Устанавливают привод в одно из положений, вращая его в том же направлении, в каком будет сниматься круговая диаграмма, чтобы выбрать люфты приводного механизма. Положение стрелки на шкале отмечается как условный нуль. Пусть, например, переключатель, установленный в положение 5 путем вращения привода со стороны положения 6, требуется перевести в положение 6. Вращая рукоятку в сторону положения 6, фиксируют размыкание контакта K1 по загоранию сигнальной лампы HL1. При дальнейшем перемещении происходит размыкание контакта SAC1 избирателя с ламелью контакта 5, и сигнальная лампа HL1 гаснет. После замыкания контакта SAC1 с ламелью контакта 6 она загорается вновь. При последующем полуобороте вала от  $180^\circ$  до  $360^\circ$  работают контактор K2 и избиратель SAC2 (табл.3.10).

Таблица 3.10

Последовательность работы элементов переключающего устройства типа РНТ-13

Состояние контактов	Сигнальная лампа		Угол поворота вертикального вала, град.					
	HL1	HL2	Ход от положения ... к положению			Ход от положения ... к положению		
			A	B	C	A	B	C
K1 размыкается	Загорается	Не горит						
SAC1-5 размыкается	Гаснет	Не горит						
SAC1-6 замыкается	Загорается	Не горит						
K1 замыкается	Гаснет	Не горит						
K2 размыкается	Не горит	Загорается						
SAC2-5 размыкается	Не горит	Гаснет						
SAC2-6 замыкается	Не горит	Загорается						
K2 замыкается	Не горит	Гаснет						

Далее поворачивают рукоятку еще на 40...50° в сторону положения 7, чтобы исключить влияние люфтов, и снимают эту же часть диаграммы в обратном направлении, т.е. из положения 6 в положение 5. На основании полученных данных строят развернутую круговую диаграмму (рис.3.8).

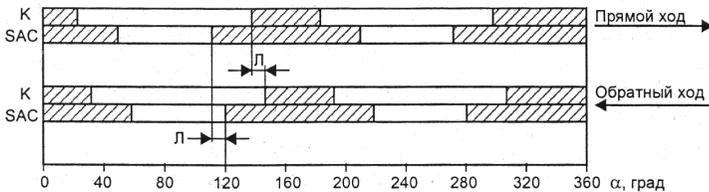


Рис.3.8 Развернутая круговая диаграмма работы устройства РНТ-13; Л – угол люфта

Правильность работы переключателя оценивают по симметрии расположения на диаграмме участков работы избирателя и контакторов, а также по ширине зоны  $\beta$ . В случае необходимости ее следует отрегулировать с помощью нониусной муфты горизонтального вала, находящейся внутри трансформатора. Круговые диаграммы должны соответствовать паспортным данным в пределах допусков завода – изготовителя.

Круговая диаграмма может быть построена также на основании осциллограмм, полученных с помощью магнитоэлектрического или цифрового осциллографа; в по-

следнее время находят применение автономные микропроцессорные и компьютерные средства регистрации. Путем осциллографирования получают и временные диаграммы для контакторов быстродействующих переключающих устройств.

### 3.8. Включение трансформатора на параллельную работу.

#### 3.8.1. Условия включения на параллельную работу.

Параллельная работа трансформаторов предусматривает включение их по схеме, при которой их первичные обмотки присоединены к общей первичной сети, а вторичные – к общей вторичной сети. Основное условие нормальной параллельной работы – нагрузка должна распределяться между трансформаторами пропорционально их номинальной мощности, а это, в свою очередь, сводится к требованию, чтобы между трансформаторами не было уравнильных токов. В конечном счете трансформаторы могут быть включены на параллельную работу при обеспечении следующих условий:

- *Группы соединений* обмоток одинаковы или одна группа может быть приведена к другой. В некоторых случаях это достигается путем простых пересоединений. Так, возможность параллельной работы групп 0, 4, 8; 6, 10, 2; 11, 3, 7; 5, 9, 1, разнящихся на 4 часа (120 электрических градусов), реализуется путем круговой перестановки фаз. Трансформаторы групп 0, 4, 8 и 6, 8, 2 (сдвиг на 180 град эл.) могут работать параллельно, если поменять местами начало и конец первичной или вторичной обмотки одного из трансформаторов. Параллельную работу некоторых нечетных групп можно обеспечить, перекрестив две фазы на высшем и низшем напряжении. В то же время практически невозможно осуществить параллельную работу трансформаторов четных и нечетных групп.

- Равенство *коэффициентов трансформации* в пределах допусков. Для силовых трансформаторов с коэффициентом трансформации меньше 3 допускается разница  $\pm 1\%$ , для прочих  $\pm 0,5\%$ . Когда вторичные напряжения  $U_1$  и  $U_2$  параллельно включенных трансформаторов не равны друг другу, в замкнутом контуре вторичных обмоток будет протекать уравнильный ток  $I_y$ , ограниченный только внутренними сопротивлениями трансформаторов  $Z_{k1}$  и  $Z_{k2}$ :

$$I_y = \frac{U_1 - U_2}{Z_{k1} + Z_{k2}}.$$

Трансформатор с более высоким вторичным напряжением принимает на себя большую (в процентном отношении) нагрузку.

- Равенство напряжений короткого замыкания  $U_k$  (допуск  $\pm 10\%$ ). Превышение допусков разрешается при условии, что ни один трансформатор не будет перегружен. При параллельной работе трансформаторов с равными напряжениями  $U_k$  нагрузка распределяется между трансформаторами пропорционально их мощностям, а если напряжения  $U_k$  различны, то нагрузка распределяется обратно пропорционально значениям  $U_k$ .

Не рекомендуется параллельная работа трансформаторов при отношении их мощностей более чем 3:1.

Перед включением трансформаторов на параллельную работу необходимо произвести их фазировку.

### 3.8.2. Фазировка трансформаторов.

Фазировкой называют проверку совпадения по фазам и значению вторичных напряжений вновь вводимого трансформатора с одноименными напряжениями другого источника (сети или работающего трансформатора). Только убедившись в правильности фазировки, можно включать трансформаторы на параллельную работу. В противном случае возможно возникновение больших уравнивающих токов, а при обратном чередовании фаз – короткое замыкание. Сравнимые напряжения должны быть одинаковы по значению (отклонение не более 10%) и симметричны.

Для получения замкнутой электрической цепи обмотки должны иметь общую точку. У трансформаторов с заземленной нейтралью они соединены через землю, а если хотя бы одна из фазуемых обмоток не имеет заземленной нейтрали, соединяют любые два вывода обеих обмоток. В первом случае приборы сравнения должны быть рассчитаны на двойное фазное напряжение, во втором – на двойное линейное. Соединение осуществляют либо временными перемычками, либо указателями напряжения или оперативными штангами, либо отключением одной фазы разъединителя. На обмотках трансформаторов до 0,4 кВ включительно измерения предпочтительно производить вольтметром (рис.2.18), так как индикаторы напряжения дают лишь ориентировочное представление о разности фазных напряжений и четко фиксируют только их совпадение. На обмотках от 1 до 10 кВ используют измерительные трансформаторы напряжения и вольтметр (рис.3.9) или два указателя напряжения, в один из которых вместо неоновой лампы вмонтирован резистор сопротивлением порядка 3 МОм при напряжении 6 кВ и 5...7 МОм при 10 кВ; зажимы указателей соединяют гибким проводом с усиленной изоляцией. Обмотки напряжением свыше 10 кВ фазируют с помощью стационарных трансформаторов напряжения и вольтметра.

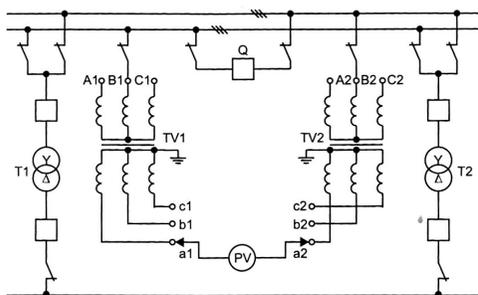


Рис.3.9. Фазировка силовых трехфазных трансформаторов (Т1, Т2) с помощью трансформаторов напряжения (TV1, TV2); шиносоединительный выключатель Q отключен.

При фазировке обмоток с заземленными нейтральями проводят девять измерений, с изолированными – четыре (табл.3.11).

## Измерения вольтметром при фазировке трехфазных трансформаторов

Режим нейтрали	Напряжение между выводами								
Глухое заземление	а - а	а - в	а - с	в - а	в - в	в - с	с - а	с - в	с - с
Изолированная, переключатель а-а	в - в		в - с		с - в		с - с		

При использовании измерительных трансформаторов напряжения следует предварительно проверить их фазировку подачей одного и того же напряжения.

### 3.9. Испытание включением толчком на номинальное напряжение

При 3– 5 – кратном включении не должны иметь место явления, указывающие на неудовлетворительное состояние трансформатора. Этим опытом проверяется также отстройка максимальной токовой защиты от бросков тока намагничивания. Физически появление сверхтока объясняется следующим. При включении трансформатора в сеть возникает переходный процесс, в продолжение которого магнитный поток можно рассматривать как сумму установившейся гармонической и медленно затухающей апериодической составляющих. Если в начале процесса полярность периодической и апериодической составляющих совпадет (такое совпадение зависит от момента включения и носит случайный характер), результирующее значение потока резко вырастет. Максимальная кратность потока (до 2) достигается в том случае, когда трансформатор включается в момент перехода напряжения через нуль. Аномальное увеличение потока приводит к насыщению стали сердечника, которая по своим свойствам приближается к немагнитным материалам, и ток в первичной обмотке резко возрастает. Вследствие глубокого насыщения стали бросок тока холостого хода может превысить установившееся значение в десятки и сотни раз, в 4...6 раз – номинальный ток, и вызвать срабатывание максимальной токовой защиты (отсечки).

Трансформаторы, входящие в схему блока генератор – трансформатор, рекомендуется включать в сеть подъемом напряжения с нуля (**1.8.14**).

### 3.10. Включение трансформаторов в эксплуатацию.

Перед включением трансформатора на рабочее напряжение необходимо проверить:

- действие всех предусмотренных защит;
- действие механизмов блокировки выключателей;
- показания всех установленных термометров;
- уровень масла в расширителе и его сообщение с баком расширителя;
- положение крана в маслопроводе газового реле (должен быть открыт);
- отсутствие воздуха в газовом реле;
- соответствие указателя положений переключателя заданному;
- отсутствие течи масла;
- исправность заземления бака;
- отсутствие посторонних предметов на трансформаторе.

Сигнальные цепи газовой защиты следует перевести на отключение.

Включение трансформатора производят, как правило, с той стороны, где установлена защита, и в продолжение не менее чем 30 мин проводят прослушивание и наблюдение за состоянием трансформатора. При удовлетворительных результатах пробного включения трансформатор может быть включен под нагрузку и сдан в эксплуатацию.

### 3.11. Цифровые устройства для испытания трансформаторов.

При большом объеме однотипных работ по испытанию электрооборудования и измерениям целесообразно автоматизировать их проведение с помощью средств современной цифровой техники. Применение цифровых и микроэлектронных устройств позволяет повысить точность измерений и сократить время проведения испытаний, обработки результатов и составления отчетности. Комплекс устройств такого рода разработан и апробирован специалистами энергосистемы Чувашской республики (Г.М. Михеев и др.). Основным узлом этих устройств является многоканальный цифровой регистратор, который используется для определения омического сопротивления обмоток силового трансформатора, группы соединения обмоток, коэффициента трансформации, тока и потерь холостого хода, сопротивления короткого замыкания, а также для снятия круговой диаграммы РПН.

Структурная схема (упрощенная) многофункционального цифрового регистратора (ЦР) показана на рис.3.10.

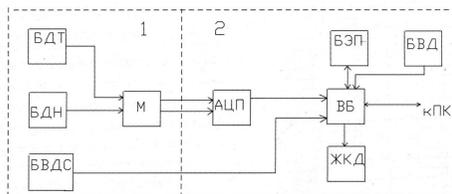


Рис.3.10. Структурная схема цифрового регистратора:

БДТ, БДН – блоки датчиков тока и напряжения; БВДС – блок ввода дискретных сигналов; М – мультиплексор; АЦП – аналого – цифровой преобразователь; БВ – вычислительный блок; БЭП – блок энергонезависимой памяти; БВД – блок ввода данных; ЖКД – жидкокристаллический дисплей

Схема ЦР состоит из двух частей. Блоки части 1 используются избирательно в зависимости от вида измерений, блоки части 2 – во всех видах измерений. Регистрацию измеряемых величин можно производить с частотой дискретизации от 50 до 4000 Гц, разрядность цифрового аналогового сигнала – 12. Для управления прибором служит интерфейс пользователя, который включает более 30 различных экранов – меню, состоящих из текстовых сообщений и кнопок с пиктограммами. Полученные экспериментальные данные, сохраненные в памяти ЦР, могут быть занесены в память персонального компьютера (ПК).

Ниже в качестве примера рассматривается автоматизированное устройство для определения коэффициента трансформации обмоток со схемой и группой соединения  $Y_n/\Delta-11$ , структурная схема которого показана на рис.3.11. Запуская процесс, оператор переводит РПН в положение 1 и включает источник ИРПН в цепь питания. С помощью блока БВД на экране ЖКД выбирается режим, соответствующий схеме и группе соединений. После этого на управляющем выходе D цифрового регистратора ЦР появляется сигнал, который подается на управляющие входы коммутирующих органов 1КО и 2КО и ИРПН. С помощью переключателей П1 – П4 источник ИРПН подключается на выводы AN обмотки ВН и линейного напряжения  $ac$  обмотки НН трансформатора Т. Вслед затем напряжение на ИРПН автоматически начинает плавно увеличиваться до определенного значения, аналоговые сигналы со входов напряжения ЦР поступают в АЦП и преобразуются в цифровые.

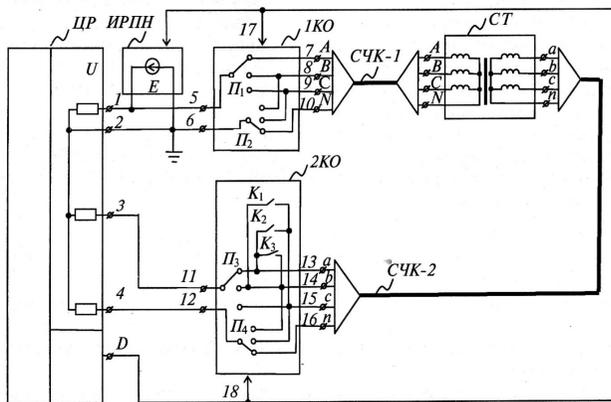


Рис.3.11. Структурная электрическая схема устройства для определения коэффициента трансформации: ИРПН – источник регулируемого переменного напряжения; 1КО, 2КО – коммутирующие органы; П1- П4 – переключатели; СЧК-1, СЧК-2 – соединительные кабели, СТ –испытываемый трансформатор.

Далее вычислительный блок ВБ выполняет преобразование Фурье: фильтрует гармоники основной частоты и кратных ей, определяет действующее значение входного сигнала и рассчитывает линейное напряжение  $ac$ . Коэффициент трансформации  $K_T$  вычисляется как частное от деления действующего значения синусоидального напряжения фазы А обмотки ВН на действующее значение линейного напряжения  $ac$  обмотки НН испытываемого трансформатора Т. Полученные значения коэффициента  $K_T$  выдаются на ЖКТ и в блок энергонезависимой памяти БЭП. Операция измерения на фазе А оканчивается по команде на отключение источника ИРПН, напряжение которого плавно снижается с поступлением сигнала с управляющего выхода D регистратора ЦР.

Аналогично производятся измерения на фазах В и С. Блок ВБ определяет процентное отклонение коэффициента  $K_T$  для всех трех фаз, которое запоминается в БЭП и выдается на ЖКД. Измерения производятся на всех положениях РПН.

# Глава 4.

## Распределительные устройства.

### 4.1. Основные элементы распределительных устройств.

*Распределительное устройство (РУ)* представляет собой совокупность связанных между собой электрических устройств и аппаратов, предназначенных для приема и распределения электрической энергии, а также для защиты сети от КЗ и ненормальных режимов. РУ, силовые трансформаторы и устройства управления входят в состав *трансформаторной подстанции*.

Вторичное напряжение силовых трансформаторов подается на шины РУ. Различают сборные и комплектные РУ. *Сборные РУ* закрытого типа (ЗРУ) на напряжение 6 – 35 кВ монтируются в кирпичных или бетонных капитальных зданиях, на напряжение выше 35 кВ строятся РУ открытого типа (ОРУ). Монтаж и наладка электрооборудования сборных РУ, поступающего с заводов – изготовителей, производится на месте его установки. Более высокие технико – экономические показатели при строительстве и эксплуатации РУ достигаются применением *комплектных РУ*, все электрооборудование которых монтируется на заводе-изготовителе. Различают КРУ, предназначенные для работы в закрытом помещении, или для наружной установки на открытом воздухе (КРУН). Разновидностью КРУ является КСО – камера сборная одностороннего обслуживания. Трансформаторы, блоки (КРУ и КРУН) и другие элементы, поставляемые на место монтажа в собранном виде, образуют *комплектную трансформаторную подстанцию (КТП)*.

По отходящим от РУ линиям (фидерам) питаются электроустановки потребителей. РУ и отходящие линии напряжением выше 1000 В могут содержать высоковольтные коммутационные аппараты, реакторы, разрядники, измерительные трансформаторы тока и напряжения, изоляторы, шины и токопроводы, кабельные и воздушные линии электропередачи, конденсаторные установки, а также устройства защиты, автоматики, измерений и вспомогательные.

Основным видом силовых высоковольтных коммутационных аппаратов, предназначенных для коммутации как рабочих, так и аварийных токов, являются *выключатели*: масляные, воздушные, электромагнитные, вакуумные и элегазовые, принципиально отличающиеся друг от друга изоляционной средой и способом гашения дуги. К высоковольтным коммутационным аппаратам относятся также разъединители, отделители, короткозамыкатели и выключатели нагрузки, которые для разрыва дуги не приспособлены. *Разъединитель* – самый распространенный коммутационный аппарат в РУ. Основным назначением разъединителей является снятие напряжения цепи после ее отключения выключателем. Видимый воздушный промежуток между разомкнутыми контактами аппарата, имеющий повышенную электрическую прочность, должен гарантировать безопасность обслуживающего персонала при ремонте или ревизии оборудования. Чтобы предотвратить возможность разрыва разъединителем тока нагрузки линии до отключения его выключателем, вводятся механические и электромагнитные блокировки. Разъединители, устанавливаемые без выключателей

(например, в цепях трансформаторов напряжения, разрядников), служат для отключения небольших токов.

Короткозамыкатели и отделители не отличаются по конструкции от разъединителей, но снабжены автоматическим приводом. Они применяются на стороне высшего напряжения трансформаторов вместо выключателей, что значительно (на 40...50%) сокращает стоимость подстанции. Действуя по сигналу релейной защиты, *короткозамыкатель* создает искусственное короткое замыкание на питающей линии, вызывающее срабатывание выключателя на питающей подстанции. *Отделители* предназначены для переключения или автоматического отключения трансформаторов ограниченной мощности без нагрузки и различных цепей в бестоковую паузу. *Выключатели нагрузки*, конструктивно отличающиеся от разъединителей наличием малоомощного дугогасительного устройства, предназначены для включения и отключения токов вплоть до номинальных значений, но не способны отключать токи короткого замыкания. Эту функцию выполняют предохранители, включаемые последовательно с силовыми контактами выключателя нагрузки, или выключатели головных участков.

*Реактор* представляет собой катушку с неизменной индуктивностью и служит для ограничения токов короткого замыкания в сети и поддержания напряжения на шинах при аварийном режиме. Это позволяет снизить требования к динамической и термической стойкости проводников и аппаратов, облегчить работу элементов электроустановок. В длительном режиме работы потеря напряжения на реакторе невелика.

*Разрядники* служат для защиты электрооборудования от перенапряжений. Перенапряжения могут быть внутренние (коммутационные) и внешние, атмосферные. Основным элементом разрядника является искровой промежуток, который должен пробиться раньше, чем изоляция защищаемого оборудования. В трубчатом разряднике, воздушном или газовом, искровой промежуток образован стержневыми электродами. В вентильных разрядниках искровые промежутки дополнены нелинейным резистором, сопротивление которого резко падает при больших токах, что дает возможность уменьшить падение напряжения на разряднике и обеспечить защиту объекта.

*Ограничители перенапряжений* отличаются от вентильных разрядников отсутствием искрового промежутка и служат для снижения атмосферных и коммутационных перенапряжений.

*Трансформаторы напряжения* предназначены для снижения высокого напряжения сети до стандартного значения, удобного для питания цепей защиты и автоматики, измерения и сигнализации, обычно 100 или  $100/\sqrt{3}$  В, и для изоляции вторичной цепи с измерительными приборами и реле от высокого первичного напряжения. Они классифицируются по числу обмоток, фаз, номинальному напряжению сети ВН. Могут использоваться либо однофазные трансформаторы, по два или три в одной установке, либо трехфазные, трех- и пятистержневые. Последние, с целью контроля изоляции в системах с изолированной нейтралью, снабжены дополнительной обмоткой, напряжение на которой появляется при замыкании одной из фаз на землю. При напряжении сети 110 кВ и выше применяется каскадное исполнение трансформаторов напряжения или подключение их через емкостные делители напряжения.

*Трансформаторы тока* обеспечивают пропорциональную зависимость значения вторичного тока от первичного и совпадение их по фазе в пределах допустимой по-

грешности, а также изоляцию вторичной цепи от высокого напряжения сети. При токах свыше 400 А применяют одновитковые трансформаторы с первичной обмоткой в виде стержня или шины, при меньших токах – многovitковые. Через первичную обмотку пропускается измеряемый ток, в цепь вторичной обмотки включаются измерительные приборы и реле и один из выводов ее обязательно заземляется. Номинальный вторичный ток принимается обычно равным 5 или (реже) 1А. Номинальный коэффициент трансформации выражается как отношение номинальных значений первичного и вторичного токов, например 600/5.

*Изоляторы* представляют собой электрокерамические конструкции для электрической изоляции и механического крепления токоведущих частей. Линейные изоляторы служат для крепления проводов линий электропередач. Аппаратные изоляторы предназначены для крепления и вывода токоведущих частей электрических аппаратов, крепления шин. Опорные изоляторы используют для крепления шин и аппаратуры РУ. Проходные изоляторы предназначены для вывода токоведущих частей из зданий

*Шина* – металлический (медь, алюминий, сталь) неизолированный сильнотоочный проводник прямоугольного, круглого или коробчатого сечения. В РУ наиболее распространены алюминиевые прямоугольные шины. *Сборные шины* РУ предназначены для приема электроэнергии от генераторов или питающих трансформаторов и распределения ее между отходящими линиями. *Соединительные шины* служат для соединения отдельных аппаратов РУ между собой и присоединения их к сборным шинам. Сборные шины большой протяженности состоят из отдельных секций длиной до 15 м, разделенных гибкими компенсаторами линейного расширения, обусловленного нагревом. Температура нагрева допускается не более 70 °С во избежание окисления контактов.

*Токопроводом* называется устройство, предназначенное для передачи и распределения электроэнергии, состоящее из изолированных или неизолированных проводников и относящегося к ним оборудования. В зависимости от вида проводников различают гибкие (при использовании проводов) или жесткие (при использовании жестких шин) токопроводы.

Применяются *силовые и контрольные* (буква К в начале маркировки) *кабели* с алюминиевыми (буква А в начале) и медными (буквенное обозначение отсутствует) жилами. Изоляция жил – бумажная, поливинилхлоридная, полиэтиленовая или резиновая. Изолированные жилы силовых кабелей защищены от механических повреждений броней из стальной ленты или проволоки. Отдельные участки кабелей соединяют с помощью соединительных муфт. Концы кабелей заделываются посредством концевых муфт или различных лент и материалов.

#### **4.2. Подготовительные работы.**

До начала наладочных работ непосредственно на объекте следует выполнить подготовку к ним.

*Работа с документацией:*

- изучить электрическую часть проекта;
- ознакомиться с технической документацией заводов – изготовителей;
- получить от заказчика согласованные с соответствующими энергослужбами

установки реле защит;

- произвести поверочный расчет уставок;
- передать заказчику замечания по проекту.

*Ознакомление с объектом.*

• обратить внимание на чистоту и освещенность помещений и территории РУ, наличие свободного прохода, исправность строительных конструкций, дверей и замков, наличие и четкость надписей на камерах и дверях;

- убедиться в наличии и исправности противопожарных средств;
- проверить наличие и целость заземлений открытых проводящих частей.

*Внешний осмотр* силового электрооборудования и аппаратуры.

- убедиться в соответствии установленного оборудования проекту;
- проверить соответствие проекту типов и уставок реле защит и автоматики;
- проверить наличие пломб, целостность кожухов, состояние уплотнений, винтов или шпилек у оборудования;
- Убедиться в отсутствии видимых повреждений и следов коррозии, надежности болтовых соединений, соответствии электромагнитов номинальному напряжению сети оперативного тока, отсутствию затирания подвижной системы при включении и отключении коммутационной аппаратуры.

Далее следует подготовить соответствующую аппаратуру, средства измерений, испытательное оборудование, приспособления и комплект отчетных документов.

### **4.3. Масляные выключатели.**

#### **4.3.1. Общие сведения.**

##### **4.3.1.1. Типы выключателей.**

В масляных выключателях (ВМ) дугогасящей средой служит трансформаторное масло. Гашение дуги осуществляется за счет эффективного ее охлаждения в газообразной среде, образующейся при испарении и разложении масла под действием высокой температуры. В многомасляных (многообъемных) ВМ масло служит также для изоляции токоведущих частей от других фаз и от бака, в маломасляных (малообъемных) в качестве изоляции применены различные твердые материалы, а масло предназначено лишь для гашения дуги. По конструкции различают баковые и горшковые (маломасляные) ВМ. В баковых выключателях вводы, контактная и дугогасительная системы помещены в бак, заполненный маслом: в однобаковых – все три фазы в одном баке, в трехбаковых – каждая фаза в отдельном баке. В отличие от баковых, где дугогасительное устройство размещено в заземленном корпусе, в колонковых выключателях оно размещается в изолированном от земли корпусе, находящемся под напряжением.

Основными электрическими параметрами являются напряжение сети и номинальный ток выключателя. Номинальный ток – наибольший допустимый ток (действующее значение периодической составляющей) в момент размыкания контактов ВМ. В РФ приняты следующие обозначения:

В – выключатель; М – масляный, маломасляный; Г – горшковый, генераторный; К – колонковый, для КРУ; П – подвесной; П или Э – со встроеным пружинным или электромагнитным приводом.

Выключатель ВМГ-10 (маломаляный, вместо ранее выпускавшегося ВМГ-133) на 6 – 10 кВ предназначен для внутренней установки. Подвижный контакт – стержневой, неподвижный – розеточного типа.

Выключатели ВМП, ВМПЭ, ВМПП – малообъемные, подвесные, с пружинным или электромагнитным приводом, трехполосные. Выпускаются на напряжение до 35 кВ в исполнениях для КСО или КРУ.

Выключатели МГ и МГГ (горшковые, для цепей генераторов) – малообъемные, на большие номинальные токи, имеют два параллельных токоведущих контура: главный и дугогасительный. При включенном положении аппарата преобладающая часть тока идет через главный контур, имеющий меньшее сопротивление; при отключении контакты главного контура размыкаются раньше контактов дугогасительного.

Выключатель МГ-35 состоит из трех вертикально расположенных полюсов на одной раме, где закреплены также общий для полюсов приводной механизм и коробки для трансформаторов тока, по два на полюс.

Выключатели ВМК (маломаляный колонковый) выпускаются на напряжение 35 – 220 кВ. Дугогасительное устройство прикреплено к верхнему фланцу, контактные стержни проходят в него снизу вверх. Управление выключателем осуществляется встроенным пневматическим приводом, расположенным у основания аппарата.

Выключатели типов МКП, Урал (У) и С – многообъемные, на напряжение 35 кВ состоят из трех полюсов, каждый из которых помещен в отдельный бак. Выключатель и привод смонтированы на общем каркасе, к которому крепится лебедка для подъема и опускания баков с маслом.

Выключатели на 110 и 220 кВ выпускаются в виде отдельных полюсов со встроенными трансформаторами тока – от двух до четырех на каждый полюс.

#### **4.3.1.2. Приводы к выключателям.**

*Электромагнитный привод.* Тяговая характеристика соответствует противодействующим силам ВМ. Требуется наличие мощного источника постоянного (выпрямленного) тока. Сечение подводящих проводов, выбираемое по условию допустимого падения напряжения, получается значительным. Из-за большой индуктивности обмоток электромагнитов время включения велико (до 1 с). Выпускаются и электромагниты переменного тока, применяемые в основном для приводов небольшой мощности.

*Пружинный привод.* Энергия, необходимая для включения, запасается в мощной пружине, которая заводится либо от руки, либо с помощью электродвигателя небольшой мощности (до 1 кВт). Тяговое усилие уменьшается к концу хода включения вследствие уменьшения деформации пружин. Быстродействие привода позволяет осуществить операции АПВ (автоматическое повторное включение) и АВР (автоматическое включение резерва). Конструктивным преимуществом привода является отсутствие мощного источника постоянного тока.

*Пневматический привод.* Энергия запасается в резервуаре со сжатым воздухом, который приводит в движение поршень в цилиндре. Расход воздуха позволяет проводить 5 – 6 операций включения без подкачки. Тяговое усилие нарастает практически мгновенно и изменяется мало. Быстродействие привода дает возможность использовать его для самых мощных выключателей. Недостатки – необходимость в ре-

зервуарах со сжатым воздухом и пневматическом хозяйстве, а также в специальных мерах по обеспечению нормальной работы пневматики при низких температурах.

*Пневмогидравлический привод.* Аккумулирование энергии, необходимой для включения, осуществляется за счет сжатия газа (обычно азота). Применение гидравлики позволяет значительно облегчить подвижную часть выключателя и получить компактный механизм. Время включения может быть меньше, чем у пневматического привода. Температурный диапазон нормальной работы практически не ограничен.

При определенных условиях могут применяться ручные приводы, осуществляющие включение и отключение выключателя воздействием на рычаг или маховик привода; отключение может быть также автоматическим или дистанционным.

#### **4.3.2. Измерение сопротивления изоляции.**

а) *Первичные цепи.* Мегаомметром на 2500 В измеряется сопротивление изоляции подвижных и направляющих частей из органических материалов. Измерение производится поочередно для каждой фазы при двух других заземленных. Значение сопротивления изоляции не должно быть меньше 1000 МОм у ВМ на 3 – 10 кВ и 3000 МОм у ВМ на 15 – 150 кВ. Рекомендуется также проверить сопротивление контактного разрыва в каждой фазе.

Измерение производится при подключении мегаомметра одним зажимом к токоведущей части траверсы, другим – к любой заземленной части ВМ. У многофазных выключателей выполнить такую операцию непосредственно возможно либо до заливки масла, либо при опущенных баках, когда траверса доступна для измерений. В ином случае измеряют сопротивление  $R_{\text{МВ}}$  изоляции выключателя во включенном положении, а если измеренное значение окажется ниже допустимого, дополнительно измеряют сопротивление изоляции  $R_{\text{от}}$  отключенного ВМ. Во включенном положении аппарата сопротивление между фазными выводами и корпусом  $R_{\text{МВ}}$  представляется как параллельное соединение сопротивлений изоляции подвижных частей  $R_{\text{ПЧ}}$  и сопротивления  $R_{\text{от}}$ , то есть

$$R_{\text{МВ}} = \frac{R_{\text{ПЧ}} R_{\text{от}}}{R_{\text{ПЧ}} + R_{\text{от}}},$$

откуда находится сопротивление изоляции подвижных частей

$$R_{\text{ПЧ}} = \frac{R_{\text{МВ}} R_{\text{от}}}{R_{\text{от}} - R_{\text{МВ}}}.$$

Если и это значение будет ниже нормы, следует проверить состояние изоляции ошиновки, а при ее исправности произвести ревизию ВМ, обращая особое внимание на штанги и траверсы из органических материалов.

При сравнении полученных результатов с нормами следует предусмотреть некоторый запас, имея в виду возможное снижение сопротивления изоляции из-за погодных условий, температуры и др.

б) *Вторичные цепи.* Испытывается каждое присоединение вторичных цепей и цепей питания приводов выключателей совместно со всеми присоединенными аппаратами (электромагниты включения и отключения аппаратов, контакторы, реле, изме-

рительные приборы и т.п.). Измерение производится мегаомметром на 500 – 1000 В, сопротивление изоляции должно быть не ниже 1 МОм.

#### 4.3.3. Испытание вводов.

Производится до установки на выключатель в соответствии с 4.13.2.

#### 4.3.4. Оценка состояния внутрибаковой изоляции и изоляции дугогасительных устройств.

Производится у баковых масляных выключателей на напряжение 35 кВ в том случае, если при измерении  $\text{tg } \delta$  вводов на полностью собранном выключателе получены повышенные значения по сравнению с нормами в табл.4.1. Чтобы исключить влияние внутрибаковой изоляции и изоляции дугогасительных устройств, сливают масло, опускают баки, шунтируют дугогасительные камеры. Если повторное измерение покажет, что значение  $\text{tg } \delta$  вводов снизилось более чем на 4%, то эта изоляция подлежит сушке. Если и при высушенной изоляции  $\text{tg } \delta$  превышает норму, такой ввод следует заменить.

#### 4.3.5. Испытание изоляции повышенным напряжением промышленной частоты:

а) изоляции выключателей относительно корпуса или опорной изоляции. Производится для выключателей напряжением до 35 кВ в соответствии с нормами табл. 4.1 в продолжение 1 мин. Аналогично испытывается изоляция межконтактных разрывов выключателей 6 – 10 кВ.

Таблица 4.1

Испытательное напряжение промышленной частоты для внешней изоляции аппаратов

Класс напряжения, кВ	Испытательное напряжение, кВ, для аппаратов с изоляцией			
	нормальной керамической	нормальной органической	облегченной керамической	облегченной органической
3	24	21,6	13	11,7
6	32	28,8	21	18,9
10	42	37,8	32	28,8
15	55	49,5	48	43,2
20	65	58,5	-	-
35	95	85,5	-	-

Примеры схем испытания изоляции масляных выключателей приведены на рис. 4.1.

б) изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов включения и отключения. Значение испытательного напряжения 1 кВ, продолжительность приложения 1 мин. Перед началом испытания необходимо:

- убедиться в отсутствии напряжения на испытываемых цепях;
- отсоединить аппаратуру и зашунтировать элементы схем, которые не допускают приложения повышенного напряжения;
- принять меры, исключающие попадание повышенного напряжения на другие схемы;

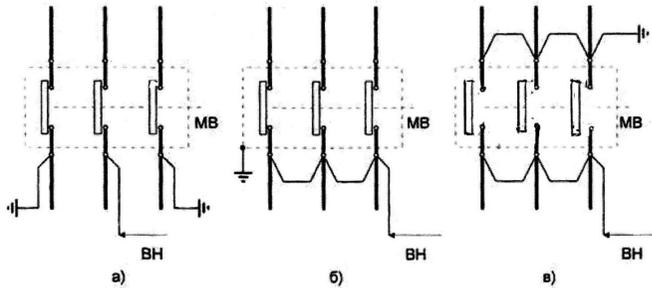


Рис. 4.1. Схемы испытания изоляции масляных выключателей повышенным напряжением: а – междуфазовой изоляции; б – главной изоляции; в – изоляции межконтактного разрыва

- при подъеме напряжения и во время испытания наблюдать за отсутствием искрения, потрескиваний и т.п.

До и после испытания следует измерить сопротивление изоляции испытуемых элементов – мегаомметром на 2500 В по п. «а» и на 500 – 1000 В по п. «б». За время испытания значение сопротивления не должно снизиться.

#### 4.3.6. Измерение сопротивления постоянному току.

а) контактов ВМ. Измеряется сопротивление токопроводящей системы полюса выключателя и отдельных его элементов. Так, если выключатель содержит по две пары главных контактов на фазу и дугогасительные контакты, то измеряют сопротивление каждой фазы рабочих (главных) контактов и отдельно дугогасительных контактов. В последнем случае между рабочими контактами вставляют изолирующие прокладки. Измерения выполняют микроомметром, двойным мостом по четырехзажимной схеме или методом амперметра – милливольтметра в соответствии с рис. 1.8 (рис. 4.2а).

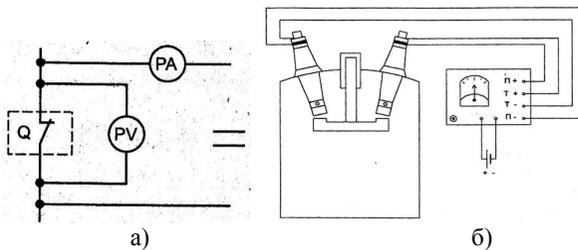


Рис.4.2. Измерение сопротивления контактов масляного выключателя постоянному току: а – принципиальная схема измерения методом амперметра – милливольтметра; б – измерение микроомметром по четырехзажимной схеме; Q – выключатель (контакт); PA и PV – амперметр и милливольтметр соответственно

Перед измерением рекомендуется произвести 5 – 7 раз включение и отключение ВМ, в результате чего контакты самоочищаются и их переходное сопротивление уменьшается. Значение сопротивления контактов постоянному току должно соответствовать данным завода – изготовителя. Последние приведены в табл.4.2 для наиболее распространенных в России типов выключателей.

Таблица 4.2

Предельные значения сопротивления постоянному току контактов масляных выключателей

Тип выключателя	Номинальный ток, А	Сопротивление контактов фазы, мкОм	
		всей контактной системы	дугогасительных контактов
ВПМ-10	630	78	
	1000	72	
МГ-10	5000	10	300
МГГ-10	3150	18	240
	4000	14	240
	5000	12	240
ВМ-14, ВМ-16	200	350	
	600	150	
	1000, 1250	100	
ВМ-22, ВМ-23	600	150	
	1000, 1500	100	
ВМГ-10	630	75	
	1000	70	
ВМП-10	630	78	
	1000	72	
ВМПЭ-10	630	50	
	1000	40	
	1600	30	
ВМПП-10	630	55	
	1000	45	
	1600	32	
ВМП-10П	600	55	
	1000	40	
	1500	30	
ВММ-10	630	85	
С-35	630	310	9
	3200	60	14
МКП-35	1000	250	
МГ-35	600	400	
ВМ-35, ВМД-35, ВБ-35	600	410	
МКП-110Б	630	1300	
	1000	800	
У-110-20-40(50)	2000	320(365)	

б) шунтирующих резисторов дугогасительных устройств. Измеренное значение сопротивления не должно отличаться от заводских данных более чем на 3%;

в) обмоток электромагнитов включения и отключения, значения сопротивления которых должны соответствовать указаниям заводов – изготовителей. Такие данные для широко распространенных приводов ВМ приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Сопротивление постоянному току, Ом, обмоток электромагнитов управления масляных выключателей при 20 °С

Тип привода	Постоянный ток, В				Переменный ток, В			
	Электромагнит включения		Электромагнит отключения		Электромагнит включения		Электромагнит отключения	
	110	220	110	220	100	220	100	220
ППМ-10	37	156	86	314	3,8	10	7,4	49
ПП-67	78	295	63	250	11,3	58	8,3	39
ВМП-10П	87,5	311	87,5	311	7,3	51	7,3	51
ВМПП-10	80	200	80	200	20	68	20	88
ПЭ-11	0,95	3,8	44	176	-	-	-	-
ШПЭ-11Б (12)	0,54	2,2	22	88	-	-	-	-
ШПЭ-33	0,23	0,9	11	44	-	-	-	-
ШПЭ-31	0,65	2,6	11	44	-	-	-	-
ШПЭ-42 (44)	0,23	0,9	11	44	-	-	-	-
ПС-10 (10М)	0,56	2,26	22	88	-	-	-	-
ШПС-30	0,3	1,2	13,4	53,6	-	-	-	-
ПС-30 (31)	0,33	1,3	22	88	-	-	-	-
ВМПЭ-10-630-20	0,61	2,44	22	88	-	-	-	-
(-1000- 20, -1600-20)								
ВМПЭ-10-630-31,5	0,55	2,2	22	88	-	-	-	-
(-1600-31,5)								
ВМПЭ-10-3200-31,5	0,27	1,06	22	88	-	-	-	-

### 4.3.7. Измерение временных характеристик выключателей.

Измеряются скорости движения подвижных контактов ВМ и время их включения и отключения при полностью залитом маслом выключателе и номинальном оперативном напряжении на выводах электромагнитов управления. Эти показатели характеризуют качество регулировки механизмов выключателя и привода. Большая скорость может вызвать чрезмерные ударные механические нагрузки, малая может привести к вибрации контактов и снижению отключающей способности аппарата. Отклонение скорости движения от установленных производителем норм свидетельствует об ослаблении или, наоборот, перетяжке пружин и требует дополнительной регулировки ВМ.

#### *4.3.7.1. Измерение скорости движения контактов (контактной траверсы) при включении и отключении ВМ (скоростные характеристики).*

Традиционно такие измерения производятся с помощью вибрационного отметчика времени – вибрографа. Он содержит вибратор – электромагнит переменного тока, на якоре которого закреплен пишущий узел (графитовый стержень), и рейку с бумажной лентой, которую крепят на подвижной части выключателя. Вибратор устанавливают таким образом, чтобы колебания стержня совершались в плоскости, перпендикулярной направлению движения ленты. В результате при включении (отключении) ВМ на ленте вычерчивается волнообразная кривая, называемая виброграммой (рис.4.3). Обмотка электромагнита подключается на напряжение частотой 50 Гц, так что стержень будет совершать 100 колебаний за 1 с, и измеряется расстояние между вершинами любой пары соседних волн виброграммы, которое траверса пройдет за одно и то же время 0,01 с. Если измеренное расстояние выразить в сантиметрах, то полученное значение будет численно равно средней скорости движения на данном отрезке пути, выраженной в метрах в секунду. Наиболее «растянутая» часть виброграммы соответствует максимальной скорости  $V_{\text{макс}}$ , другими характерными точками являются значения ее в моменты замыкания и размыкания контактов ВМ ( $V_{\text{з.к}}$ ,  $V_{\text{р.к}}$ ). Вертикальные линии в начале и конце виброграммы соответствуют неподвижному (включенному или отключенному) положению ВМ. Ход подвижных частей определяется непосредственным измерением длины участков виброграммы; полная ее длина равна полному ходу траверсы.

Время прохождения любого участка пути, полного хода траверсы при включении и отключении ( $t_{\text{вкл}}$ ,  $t_{\text{откл}}$ ), время движения в контактах и пр. подсчитывается по числу волн на выбранном участке. По 6 – 8 значениям скорости, среди которых обязательно должна быть скорость в характерных точках (на рис. 4.3 они отмечены вертикальными линиями), можно построить непрерывную кривую изменения скорости движения в функции пути при включении и отключении ВМ (рис.4.4).

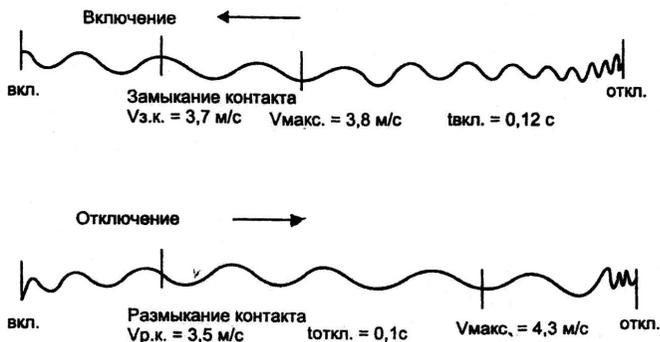


Рис. 4.3. Виброграмма выключателя (тип ВМП-10);  $V_{з.к.}$ ,  $V_{р.к.}$  – скорость замыкания (размыкания) контактов;  $V_{макс.}$  – максимальная скорость;  $t_{вкл.}$ ,  $t_{откл.}$  – полное время включения (выключения) ВМ

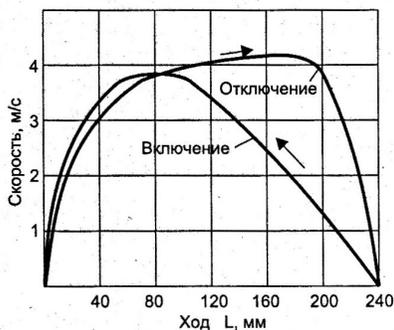


Рис.4.4. Скоростные характеристики масляного выключателя (ВМП-10) при включении и отключении, построенные по виброграммам

Если при анализе виброграммы или скоростной характеристики выявляются провалы скорости (местное замедление), то это свидетельствует о наличии заедания, загибания в механизме и требует ремонта. Измерение скорости включения и отключения следует производить для выключателей 35 кВ и выше, когда это требуется инструкцией завода – изготовителя. Измеренные характеристики должны соответствовать его указаниям (табл.4.4). Принимается, что при температуре от 10 до 20 °С различие должно составлять не больше 10%.

Таблица 4.4

## Скоростные и временные характеристики масляных выключателей

Тип выключателя	Скорость движения контактов, м/с				Собственное время, с	
	На включение		На отключение		Включе- ния	отключе- ния
	макси- мальная	при замыкании	макси- мальная	при размыкании		
ВПМ-10	2,6	2,0 – 2,6	3,9	2,1 – 2,7	0,3	0,12
МГ-10	-	2,0 – 2,4	2,4	1,5 – 2,1	0,75	0,14
МГТ-10-45У3	2,6	2,0 – 2,6	3,6	2,3 – 2,7	0,4	0,12
МГТ-10-5000-63У3	3,6	2,7 – 3,3	3,6	2,3 – 2,7	0,4	0,11
ВМ-14, ВМ-16	1,8	1,65	1,24	1,22	0,24	0,12
ВМ-35	1,7	-	2,45	-	0,23	0,06
ВМГ-10	2,6	2,0 – 2,6	3,9	2,1 – 2,7	0,30	0,12
ВПМП-10	3,2	2,4 – 2,8	3,2	1,9 – 2,5	0,30	0,12
ВМПЭ-10-630 (1000, 1600)	5,7	4,7 – 5,0	5,0	3,0 – 3,3	0,30	0,07
ВМПЭ-10-3150	5,7	4,0 – 4,4	4,5	3,1 – 3,4	0,30	0,09
ВМП-10	5,0	4,0 – 5,0	5,0	3,0 – 3,8	0,30	0,10
ВМП-10П	6,0	4,1 – 4,9	5,0	3,2 – 3,8	0,20	0,10
ВМПП-10-20	-	4,2 – 4,6	-	2,5 – 2,7	0,20	0,10
-10-31,5	-	4,5 – 4,9	-	2,8 – 3,0	0,20	0,10
С-35-630 с приводом ШПЭ-12	3,0	2,4 – 3,0	1,8	0,8 – 1,2	0,34	0,05
ПП-67	3,0	2,4 – 3,0	1,8	0,8 – 1,7	0,40	0,12
С-35-3200-50 (привод ШПЭ-38)	3,2	2,3 – 2,5	2,4	1,5 - 1,7	0,64	0,06
МКП-35	3,2	1,7 – 1,9	3,6	1,6 – 1,8	0,40	0,05
ВТ-35	2,4	1,5 – 2,1	2,9	0,9 – 1,3	0,35	0,12
ВТД-35	2,7	1,9 – 2,5	3,4	0,9 – 1,3	0,35	0,12
МКП-110	3,8	1,7 – 1,9	2,9	1,3 – 1,5	0,60	0,05
У-110-2000-40 с при- водом ШПВ (ШПЭ)	3,3	1,7 – 1,9	3,7	1,3 – 1,5	0,30	-
ВМТ-110	-	2,7 – 3,3	-	2,3 – 2,9	0,13	0,03

Для снятия виброграммы лента закрепляется либо непосредственно на траверсе с контактами, либо на промежуточной подвижной детали, жестко связанной с контактной системой. Если измерения проводились на траверсе баковых выключателей при опущенных баках, то полученные значения скорости будут выше, чем при движении траверсы в масле, на 15...20% у однобаковых и на 8...15% у трехбаковых выключателей (при одном опущенном баке). Надо еще учитывать, что в процессе эксплуатации скорость движения контактов несколько уменьшается из-за возрастания сил трения, появления перекосов и люфтов в механизме и пр. Поэтому значения скорости, измеренные при вводе выключателя в эксплуатацию и после среднего ремонта, должны быть по крайней мере на 10% выше минимально допустимых по нормам.

Следует отметить, что описанный способ получения скоростных характеристик с помощью вибрографа имеет существенные недостатки: непригодность устройства при недоступности прямолинейно движущихся деталей выключателя; трудоемкость снятия и обработки виброграмм; возможность ошибок и больших погрешностей; ненадежность пишущего узла. В настоящее время наиболее целесообразно применение специализированных электронных цифровых приборов. Разработаны измерители скорости, принцип действия которых основан на подсчете числа импульсов от бесконтактного датчика движения штанги выключателя. Приборы типа ПКВ/М5 (модификации М6Н, М7, У3 и др.) разработки и изготовления СКБ Электротехнического приборостроения (г. Иркутск) снабжены резистивными цифровыми датчиками линейного и углового перемещения. В случае, когда контактная система выключателя непосредственно недоступна и датчик закрепляется на промежуточной подвижной детали, процессор пересчитывает значения скорости и хода контактов в соответствии с кинематической схемой выключателя, хранящейся в постоянной памяти прибора. Полученные характеристики распечатываются в табличном или графическом виде, хранятся в энергонезависимой памяти и могут передаваться в компьютер через порт USB.

Современный многофункциональный прибор для проверки выключателей PME-500-TR предлагает фирма EuroSMC (Испания). Тестер поставляется с программным обеспечением, совместимым с WINDOWS. Модуль для измерения характеристик хода, скорости и ускорения контактов выключателя PME –TCE подсоединяется к тестеру через порт PME-BUS, результаты могут быть переданы на любой компьютер через порт USB.

#### ***4.3.7.2. Измерение собственного времени включения и отключения выключателя.***

Собственное время включения – время от момента подачи команды на включение до момента замыкания контактов аппарата, собственное время отключения – время от подачи команды на отключение до размыкания контактов. Тогда как скоростные характеристики дают информацию только о времени движении контактных частей, собственное время зависит также и от работы аппаратуры управления ВМ (инерционность электромагнитов включения и отключения, исполнительного двигателя и др.).

Для измерения собственного времени применяются электромеханические секундомеры (например, типов ПВ-53Л, П14-2М) и миллисекундомеры (например, ЭМС-54), а также электронные (например, Ф-738). Миллисекундомеры применяются в тех случаях, когда погрешность секундомера (до 0,05 с) оказывается неприемлемой.

Секундомер ПВ-53Л содержит электровибратор на основе поляризованного реле, последовательно с обмоткой которого включены ограничивающие резисторы. Запуск осуществляется подачей напряжения на обмотку, останов – снятием напряжения или шунтированием обмотки. В секундомере П14-2М вместо вибратора применен электродвигатель, запуск или останов которого осуществляются соответственно подачей или снятием напряжения. Схема измерения собственного времени срабатывания выключателя показана на рис.4.5.

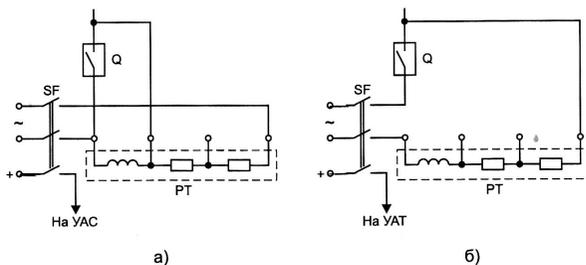


Рис.4.5. Схема измерения собственного времени включения (а) и отключения (б) выключателя: Q – масляный выключатель (контакт); SF –выключатель оперативного тока; PT – электросекундомер (тип ПВ-53Л); УАС – электромагнит включения; УАТ – электромагнит отключения

Измеренные значения не должны отличаться от указанных в документах завода – изготовителя и в табл.4.4 более чем на  $\pm 10\%$ , в противном случае следует произвести ревизию выключателя и повторить измерения. При отсутствии таких данных можно ориентироваться на результаты испытаний аналогичных выключателей.

### 4.3.8. Проверка характеристик приводов выключателей.

#### 4.3.8.1. Проверка и регулировка приводов.

Проверка привода производится после ревизии и механической регулировки его монтажным персоналом и имеет свои особенности в зависимости от типа привода.

Среди *ручных* приводов широко распространены типы ПРАМ-10 (привод ручной с автоматическим отключением) и ПРБА (привод ручной блинкерный с автоматическим отключением). Чтобы предотвратить возможность травмирования работников при случайном отключении выключателя во время регулировки и проверки этих приводов, рекомендуется установить стопорные приспособления между собачкой и корпусом привода.

Некоторые типы ручных приводов снабжены электромагнитами отключения. Если привод имеет реле минимального напряжения, то при регулировке необходимо принудительно удерживать боек реле в отключенном положении, так как в противном случае нельзя будет включить выключатель.

*Пружинные (грузовые)* приводы применяются для выключателей почти всех типов напряжением до 35 кВ. Наиболее широкое распространение получили приводы типов ППМ-10, ПП-67 и встроенные пружинные приводы. Пружинные приводы типов КППМ, ППК-63 имеют кинематическую схему, аналогичную ППМ-10.

В пружинно-грузовых приводах имеются электромагниты дистанционного включения и отключения, которые надо тщательно осмотреть. Загрязнения необходимо удалить, а затем слегка отшлифовать шкуркой части, которые не имеют защитного покрытия; сердечники и контрполюса с поврежденными защитными покрытиями подлежат замене. Боек сердечника должен быть надежно закреплен и не иметь искривлений. Проверяются легкость хода сердечника в латунной гильзе (от руки) и плотность установки гильзы.

*Электромагнитные (соленоидные) приводы.* Наиболее широко распространены приводы ПЭ и ПС; конструкция их различна, но регулировка рычажной системы в основном одинакова. В схеме управления приводом предусмотрена электрическая блокировка от «прыгания» – самопроизвольного многократного включения выключателя на устойчивое короткое замыкание. В релейно-контактном исполнении эта цель достигается с помощью специальных вспомогательных контактов, связанных с сердечником электромагнита отключения: по сигналу максимальной токовой защиты электромагнит срабатывает и при наличии команды на включение самоудерживается. В более совершенной схеме функцию самоудерживания выполняет промежуточное двухмоточное реле. Для проверки действия блокировки собирается цепь отключения выключателя и подается команда на включение. Выключатель начнет включаться, но после замыкания блокировочного контакта отключится и останется в отключенном положении. В микропроцессорных устройствах защиты типа «Сириус» (ОАО «РАДИУС-Автоматика»), «Орион» (компания «TESLA») и др. необходимые блокировки осуществляются бесконтактным путем.

Механизмы некоторых приводов выполнены таким образом, что необходимость в применении блокировки от прыгания исключается.

#### **4.3.8.2. Проверка и регулировка элементов схем управления выключателями.**

*Вспомогательные контакты приводов выключателей.* В схемах управления используются блок-контакты типов КСА, КСУ и аварийные КСА, механически связанные с подвижными частями выключателями. Блок-контакты типа КСУ имеют специальный ускоритель, с помощью которого они размыкаются в самом конце операции включения; это позволяет предупредить срыв операции из-за недостаточной продолжительности импульса на включение. Контакт КСУ в цепи отключения должен разомкнуть свои контакты в начале процесса отключения, чтобы предотвратить подгорание контактов выходных реле защиты, и замкнуть их в начале процесса включения, чтобы в случае включения выключателя на короткое замыкание была подготовлена цепь на его отключение.

Регулировку контактов производят, медленно включая и отключая ВМ. В крайних его положениях должно быть строго фиксированы замыкание и размыкание контактов КСА и КСУ. Подрегулировку контактов производят изменением длины специальных тяг, а также перестановкой шайб КСА на нужный угол грани вала. Следует помнить при этом, что контакты, работающие на включение и отключение, должны быть сдвинуты на угол  $90^\circ$ . Угол между передаточным рычагом комплекта КСА и направлением тяги должен быть не менее  $30^\circ$ . Зазор между контактами КСА должен быть не менее 3...5 мм, КСУ – 4...5 мм.

При использовании проскальзывающего контакта подключают параллельно с ним размыкающий контакт КСУ. Увеличить время замкнутого состояния контактов можно путем параллельного включения контактных шайб, повернутых на некоторый угол. Окончательная проверка регулировки вспомогательных контактов производится в собранной схеме при многократном опробовании выключателя.

*Ключи управления и сигнальная аппаратура.* Универсальные ключи управления проверяют на отсутствие механических повреждений и перекосов при повороте ключа. Кроме того, проверяют самовозврат рукоятки ключа в среднее положение, фикс-

сацию рукоятки в различных положениях ключа, отсутствие заеданий в промежуточных положениях.

При наличии встроенной лампы в ключе или отдельной сигнальной арматуры следует убедиться в том, что внутренние контактные штыри не западают, установлены лампы надлежащего типа и напряжения, сопротивление и мощность добавочного резистора соответствует мощности лампы и напряжению сети оперативного тока. Проверяется также соответствие диаграмм включения всех ключей в составе проектной схемы.

*Релейная аппаратура.* В объем проверки входит измерение и регулировка напряжения трогания и возврата, времени отпускания реле, измерение сопротивления обмотки. Проверка напряжения трогания и возврата производится с помощью потенциометра, сопротивление которого выбирается обычно из расчета 1 Ом на 1 В напряжения питания.

Слишком высокое напряжение трогания может привести к отказу реле при пониженном напряжении оперативного тока. Напряжение возврата реле не нормируется, но возврат должен быть четким во избежание ложной работы схемы. При регулировке полезно иметь в виду, что:

- уменьшение начального воздушного зазора между якорем и сердечником реле приводит к уменьшению напряжения трогания, а уменьшение конечного зазора – к уменьшению напряжения возврата;
- ослабление возвратной пружины ведет к уменьшению напряжения трогания.

Реле времени проверяются с помощью электросекундомера при номинальном напряжении на обмотке реле. Время трогания промежуточных реле постоянного тока с демпфирующими кольцами регулируют изменением их количества, время возврата – изменением зазора между якорем и магнитопроводом реле.

#### **4.3.8.3. Проверка минимального напряжения срабатывания приводов выключателей.**

Производится (без тока в главной цепи) для определения фактического значения напряжения на зажимах электромагнитов приводов, при котором выключатели сохраняют свою работоспособность, то есть выполняют операции включения и отключения до конца. Проверка осуществляется путем постепенного снижения напряжения, начиная с нормированного минимального значения до отказа выключателя в операциях включения и отключения. Минимальное напряжение срабатывания должно соответствовать нормам, установленным заводами–изготовителями выключателей. Фактическое напряжение срабатывания электромагнитов управления и контакторов должно быть на 15...20% меньше нижнего предела рабочего напряжения. При этом временные и скоростные характеристики выключателя могут не соответствовать нормам.

При проверке известную сложность представляет испытание соленоидов включения в связи с большими значениями тока втягивания, порядка десятков и даже сотен ампер (постоянного тока). В этом случае в качестве источника питания можно использовать регулируемые, например тиристорные, выпрямители, желателно трехфазные для сглаживания и повышения выпрямленного напряжения.

Для получения пониженного напряжения можно включить последовательно с обмоткой соленоида добавочный резистор. Пусть, например, требуется рассчитать со-

противление  $R_d$  добавочного резистора к включающему электромагниту привода ПЭ-11 (номинальное напряжение обмотки  $U_{\text{ном}} = 220$  В, сопротивление 3,86 Ом) для получения на его зажимах напряжения  $0,8U_{\text{ном}} = 176$  В. При этом напряжении ток потребления обмотки составит  $176 : 3,86 = 45,7$  А. Внутреннее сопротивление источника питания и подводящей сети должно быть известно или предварительно измерено. Если для определенности принять его равным 0,2 Ом, то падение напряжения на нем составит  $45,7 \times 0,2 = 9,1$  В, а напряжение питания будет при этом  $220 - 9,1 = 210,9$  В. Остается «погасить» напряжение  $210,9 - 176 = 34,9$  В, для чего потребуется сопротивление  $R_d = 34,9 : 45,7 = 0,76$  Ом. В качестве такого резистора может служить, например, нихромовая проволока диаметром 2 мм и длиной около 2 м, которую кратковременно включают последовательно с обмоткой электромагнита.

Проверка минимального напряжения срабатывания производится пополюсно у выключателей с пополюсными приводами.

#### **4.3.9. Испытание выключателя многократными опробованиями.**

Многократные опробования – выполнение операций включения (В) и отключения (О) и сложных циклов (ВО без выдержки времени для всех выключателей; ОВ и ОВО – для выключателей, предназначенных для работы в режиме АПВ) должны производиться при номинальном напряжении на выводах электромагнитов. Число операций и сложных циклов должно составлять:

- 3 – 5 операций включения и отключения;
- 2 – 3 цикла каждого вида.

Следует иметь в виду, что включение ВМ с помощью электромагнитных приводов допускается не более 10 раз подряд, после чего необходим перерыв для охлаждения обмоток электромагнитов, так как они рассчитаны лишь на кратковременное протекание тока.

#### **4.3.10. Испытание встроенных трансформаторов тока.**

Отличительной особенностью встроенных трансформаторов тока является отсутствие отдельной первичной обмотки. Испытание их производится в соответствии с п.4.7.

### **4.4. Воздушные выключатели (ВВ).**

#### **4.4.1. Краткие сведения.**

В воздушном выключателе все основные операции (гашение дуги, создание изоляции межконтактных разрывов) осуществляются сжатым воздухом. Их преимущества: быстроедействие, большая отключающая способность, незначительное обгорание контактов, отсутствие дорогих и недостаточно надежных вводов, пожаробезопасность, меньшая масса по сравнению с масляными выключателями. Недостатки: наличие громоздкого воздушного хозяйства, взрывоопасность, отсутствие встроенных трансформаторов тока, сложность устройства и эксплуатации. По этим причинам к настоящему времени воздушные выключатели уступают свое место на подстанциях потребителей до 110 кВ вакуумным и элегазовым выключателям, оставив за собой область высоких и сверхвысоких напряжений.

На напряжении 110 кВ распространены воздушные выключатели серии ВВБ. Они имеют баковую конструкцию, опорную изоляцию колонкового типа и пневматиче-

скую систему управления. Напряжение подводится с помощью эпоксидных вводов, снаружи находятся конденсаторы для выравнивания напряжения по двум дугогасительным разрывам. Для ограничения перенапряжений и выравнивания распределения напряжения по разрывам выключателя применяются также шунтирующие резисторы и варисторы. Отличительной особенностью современных ВВ на напряжение 110 кВ и выше является модульный принцип построения серий. Выключатели крупномодульной серии ВВБК рассчитаны на большие номинальные токи и номинальные токи отключения.

Управление ВВ осуществляется дистанционно подачей командных импульсов на электромагниты, которые, в свою очередь, воздействуют на воздушные клапаны выключателя. В среднем для срабатывания электромагнита требуется около 20 мс, для открытия каждого клапана и наполнения связанных с ним полостей – несколько миллисекунд, для движения воздуха по воздухопроводу – более 10 мс. Полное время отключения выключателей серий ВВБ и ВВБК, в частности, составляет 60 мс.

ВВ на напряжение 110 кВ и выше применяются с воздухонаполненным или открытым (ножевым) отделителем. Рядом с дугогасительной камерой устанавливаются резисторный делитель напряжения, а рядом с отделителем – емкостный делитель напряжения. При операции отключения ВВ контакты дугогасительной камеры разрывают ток, затем размыкаются соединенные последовательно с ними контакты отделителя, отключая при этом ток омического делителя напряжения, после чего контакты камеры вновь замыкаются. Включение ВВ осуществляется только замыканием контактов отделителя.

#### 4.4.2. Измерение сопротивления изоляции:

а) опорных изоляторов, изоляторов гасительных камер и отделителей и изолирующих штанг. Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ.

В сырую погоду измерения следует производить с установкой охранных колец в виде нескольких витков медного жгута на внешней поверхности.

Значения сопротивления изоляции должны быть не ниже приведенных в табл.4.5.

Таблица 4.5

Наименьшее допустимое сопротивление опорной изоляции и изоляции подвижных частей воздушных выключателей

Испытуемый объект	Сопротивление изоляции, МОм, при номинальном напряжении выключателя, кВ	
	До 10	15 – 150
Опорный изолятор, воздухопровод и тяга (каждое в отдельности), изготовленные из фарфора	1000	3000

Измерения для изолирующих штанг выполняются после установки их на выключатель. Сопротивление изоляции чехлов камер и отделителей измеряется до установки в них механизма, после гидравлических и механических испытаний изоляторов, промывки и подсушки. Если изолятор имеет жесткую армировку, напряжение подается прямо на армировку, а при ее отсутствии – на электроды из фольги, прижатые к торцам;

б) вторичных цепей, обмоток электромагнитов управления. Производится мегаомметром на напряжение 500 – 1000 В; наименьшее допустимое значение сопротивление изоляции 1 МОм. Измерение производится со всеми присоединенными аппаратами. При этом должны быть приняты меры для предотвращения повреждения элементов слаботочных цепей, в частности микроэлектроники.

#### 4.4.3. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты.

а) изоляции выключателей. Обязательно для выключателей до 35 кВ.

Опорную фарфоровую изоляцию следует испытывать в соответствии с указаниями табл.4.1 для нормальной керамической изоляции. Продолжительность приложения нормированного испытательного напряжения 1 мин. Испытание проводится после окончания монтажа выключателя. При понижении температуры воздуха внутренние полости фарфоровых изоляторов могут увлажняться. В этом случае за 3...6 час до испытания выключатель ставят на просушку;

б) изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления (см.4.4.2,б).

#### 4.4.4. Измерение сопротивления постоянному току:

а) контактов ВВ всех классов напряжения. Измерению подлежит сопротивление контактов каждого элемента гасительной камеры, отделителя в отдельности. Наибольшие допустимые значения этих величин указаны в табл.4.6.

Измерения выполняют после наладки выключателя. Измерения самых малых значений сопротивления методом амперметра-вольтметра рекомендуется производить при токе порядка 100 А. Токовые провода большого сечения следует подсоединять к аппаратным зажимам ВВ, чтобы учесть сопротивление перехода от фланца к контакту. В качестве таких проводников можно использовать участки ошиновки РУ.

Таблица 4.6

Предельные значения сопротивления постоянному току контактных систем воздушных выключателей

Тип выключателя	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Сопротивление, мкОм			
			всего контура полюса	камеры	одного разрыва камеры	ножа отделителя
ВВН-35/600	35	600	100	-	-	-
ВВН-35/1000	35	1000	60	-	-	-
ВВН-35/2000	35	2000	60	-	-	-
ВВН-110/800/4000	110	800	200	150	75	50
ВВН-110/2000/4000	110	2000	150	100	50	50
ВВБ-110, ВВБМ-110Б, ВВБК-110Б	110		80	-	-	-
ВВ-4001-110/600	110	600	500	200	100	250
ВВН-110У/800-4000	110	800	200	150	-	50
ВВН-110-6, ВВШ-110	110	2000	140	40	-	40

Примечание. Предельные значения сопротивления одного элемента (разрыва) гасительной камеры и отделителя и одного дугогасительного устройства модуля выключателя: серии ВВН – 20 мкОм; ВВБ, ВВБК – 80 мкОм.

б) обмоток электромагнитов включения и отключения. Устанавливается для каждого типа выключателей согласно данным завода – изготовителя (табл.4.7).

Таблица 4.7

Сопротивление постоянному току обмоток электромагнитов воздушных выключателей

Тип выключателя	Соединение электромагнитов трех фаз	Напряжение, В	Сопротивление обмотки, Ом
ВВН-35, ВВ-2503, ВВ-4001, ВВН-110, ВВУ-35, ВВБ-110, ВВБМ-110, ВВУ-11	Раздельное или параллельное. Электромагниты с форсировкой	220	1-я – $10^{+1,5}$ 2-я – $45^{+2,0}$ обе – $55^{+3,5}$
		110	1-я – $2,4^{+0,05}$ 2-я – $11,3^{+0,55}$ обе – $13,7^{+0,55}$
ВВ-2503, ВВ-4001, ВВ-4001У, ВВН-11, ВВ-2503, ВВ-4001	Раздельное или параллельное	220	$64^{+3\%}$ –8%
ВВ-4001У, ВВН-11, ВВ-35, ВВН-35	Последовательное	220	$8,3^{+3\%}$ –8%
ВВН-35, ВВН-110	Раздельное или параллельное	110	$16,3^{+3\%}$ –8%
ВВ-2503, ВВ-4001	Раздельное или параллельное	110	$31,3^{+2}$
ВВН-110	Последовательное	110	$1,68^{+3\%}$ –8%

При измерениях погрешность должна быть не более 3%. Измеряется как сопротивление рабочей обмотки, так и общее вместе с токоограничивающей обмоткой;

в) делителей напряжения и шунтирующих резисторов выключателя. Значения элементов сопротивления делителей сопротивления и шунтирующих резисторов должны соответствовать заводским нормам, приведенным в табл.4.8 для отдельных типов выключателей до 110 кВ.

Таблица 4.8

Предельные значения сопротивления постоянному току делителей напряжения и шунтирующих резисторов воздушных выключателей

Тип выключателя	Предельные значения сопротивления, Ом
ВВУ-35	4,6 -0,25
ВВУ-110	$100 \pm 2$
ВВБ-110-6	$150 \pm 5$
ВВБМ-110Б	$50 \pm 1$
ВВН-110-6	$150 \pm 5$
ВВШ-110-6	$150 \cdot 2^{-4}$

Измерения рекомендуется производить при напряжении 110 -220 В, так как при более низком напряжении возникают значительные погрешности из-за наличия

большого числа контактов между отдельными блоками резисторов. Требуемая точность измерений – не менее 1%. Если колонка собрана из нескольких элементов, напряжение подают к верхнему и нижнему фланцам.

#### **4.4.5. Проверка характеристик выключателя.**

Характеристики выключателя, снятые при номинальном, минимальном и максимальном значениях рабочего давления при простых операциях и сложных циклах, должны соответствовать данным завода-изготовителя. Временные характеристики рекомендуется проверять с помощью многоканального (светолучевого, цифрового или компьютерного) осциллографа. При использовании светолучевым осциллографом скорость движения бумаги выбирается в пределах 0,5...2,5 м/с. Поскольку высокочувствительные вибраторы подвержены наводкам от находящихся вблизи токоведущих частей и имеют низкую частоту колебаний, из-за чего запись может получиться нечеткой, используют преимущественно вибраторы низкой чувствительности.

Для уменьшения наводок применяют следующие методы:

- сокращение количества подсоединенных к выключателю элементов, на которых может наводиться напряжение (перемычки, емкостные делители, шлейфы и т.п.);
- наложение заземления на один из выводов выключателя;
- использование многожильного экранированного кабеля.

Желательно использовать отдельный источник питания для каждого гальванометра, так как при общем источнике возможно влияние параллельных цепей.

Когда число каналов осциллографа недостаточно для записи работы всех контактов ВВ на одной осциллограмме, ведут запись на двух или трех осциллографах одновременно. Ток электромагнита следует фиксировать на каждой осциллограмме: момент подачи командного импульса на обмотку служит началом отсчета времени. Возможно поочередное осциллографирование работы контактов камер и отделителей.

Следует иметь в виду, что при работе ВВ на него действуют большие ударные нагрузки, вызывающие вибрацию выключателя. В связи с этим все контактные соединения на аппарате должны выполняться с повышенной надежностью, болтовыми. При наличии ненадежного контакта вибрация может привести к искажению полезных сигналов и к появлению ложных сигналов на осциллограмме.

Для связи осциллографа с камерой и отделителем наиболее пригоден телефонный кабель на 10 пар с жилами диаметром 0,35...0,50 мм; для большей надежности жилы каждой пары целесообразно соединить параллельно. Чтобы жилы не изламывались выхлопом воздуха при отключении ВВ, их наращивают со стороны выключателя гибким изолированным проводом длиной 8...10 м сечением 0,5...1,5 мм<sup>2</sup>, а место соединения закрепляют биндом. Провода, присоединяемые к камере и отделителю, снабжаются напаянными наконечниками. Кроме телефонного, можно использовать шланговый кабель, контрольный кабель со снятой броней (для облегчения коммутации) или пучок гибких проводов, свитых в жгут.

Скоростные характеристики снимаются методами, описанными в п.4.3.7.1.

#### **4.4.6. Проверка минимального напряжения срабатывания выключателя.**

Электромагниты управления должны срабатывать при напряжении не более 70% при питании от источника постоянного тока и не более 65% номинального при пита-

нии от сети переменного тока через выпрямительные устройства и наибо́льшем рабочем давлении сжатого воздуха. Напряжение должно подаваться толчком.

#### 4.4.7. Испытание выключателя многократным включением и отключением.

Количество операций и сложных циклов устанавливается согласно табл.4.9.

Таблица 4.9

Условия и число опробований выключателей при наладке

Операция или цикл	Давление при опробовании	Напряжение на выводах	Число операций и циклов
1. Включение	Наименьшее срабатывания	Номинальное	3
2. Отключение	То же	То же	3
3. В – О	«	«	2
4. Включение	Наименьшее рабочее	«	3
5. Отключение	То же	«	3
6. В – О	«	«	2
7. Включение	Номинальное	«	3
8. Отключение	То же	«	3
9. О – В	«	«	2
10. Включение	Наибольшее рабочее	0,7 номинального	2
11. Отключение	То же	То же	2
12. В – О	«	Номинальное	2
13. О – В – О	«	То же	2
14. О – В – О	Наименьшее для АПВ	«	2

*Примечание.* При выполнении операций и сложных циклов (пп. 4-9 и 12-14) должны быть сняты зачетные осциллограммы.

#### 4.4.8. Испытание конденсаторов делителей напряжения.

Производится в соответствии с п.4.9.

#### 4.4.9. Проверка хода якоря электромагнита управления.

Ход якоря электромагнитов с форсировкой должен быть равен 8(-1) мм.

#### 4.4.10. Специальные меры безопасности при наладке и опробовании воздушных выключателей.

Помимо общих правил техники безопасности для РУ выше 1000 В, специфика конструкции и работы воздушных выключателей требует соблюдения особых мер безопасности при их наладке, к числу которых относятся следующие:

- управление выключателем должно осуществляться из укрытия, удаленного от крайнего полюса выключателя не менее чем на 10...15 м;
- опасная зона в радиусе 60 м от выключателя ограждается канатом, на котором вывешиваются предупредительные плакаты; из этой зоны должны быть удалены люди. До подачи воздуха в выключатель с него и из опасной зоны убираются все посторонние предметы и проверяется надежность крепления всех болтов, гаек, шпилек, штуцеров;
- не следует находиться без производственной необходимости вблизи отключенного выключателя. Подъем на отключенный ВВ с воздушнонаполненным отделителем

категорически воспрещается. При подъеме на выключатель с открытым отделителем не следует находиться под отключенным ножом отделителя или становиться на включенный нож;

- перед проведением работ на выключателе (присоединение и отсоединение проводов для осциллографирования, регулировка дутья и др.) необходимо принять меры, полностью исключая возможность срабатывания ВВ: снять оперативный ток со щита управления, вставить изоляционные прокладки между ножами и губками рубильников, заклинить электромагниты приводов, закрыть кнопки пневматического управления или отсоединить от них трубки, идущие к выключателю. ВВ с воздушно-наполненным отделителем должен быть предварительно включен;

- первые операции по включению и отключению ВВ следует производить при пониженном давлении, постепенно повышая его в процессе работы. В случае перерыва наладочных работ и по окончании рабочего дня ВВ с наполненным отделителем нужно оставлять во включенном положении;

- нельзя оставлять на выключателе, в шкафах управления полюсами какие-либо незакрепленные детали, инструменты, а также оперировать выключателем, узлы которого надежно не закреплены.

## **4.5. Электромагнитные, элегазовые и вакуумные выключатели.**

### **4.5.1. Электромагнитные выключатели.**

В электромагнитных выключателях дуга гасится в результате ее растягивания при перемещении в узкой щели между стенками изоляционной камеры. Перемещение дуги происходит под действием электромагнитного поля (магнитного дутья), создаваемого отключающим током. Такие выключатели не требуют масла или сжатого воздуха для гашения дуги, обеспечивают низкий уровень коммутационных перенапряжений, обладают высоким быстродействием, надежностью и большим сроком службы и широко применяются при большой частоте операций. Вместе с тем узкие щели дугогасительного устройства нагреваются до очень высоких температур и начинают пропускать ток. Поэтому номинальное напряжение электромагнитных выключателей ограничивается классом 10 кВ, а для предотвращения выброса продуктов горения дуги на соседние токоведущие части устанавливаются изоляционные теплостойкие экраны.

Требования, предъявляемые к электромагнитным выключателям, и методы их проверки те же, что и для масляных выключателей. Нормируемые параметры устанавливаются заводом-изготовителем и для выключателей распространенного типа ВЭМ, в частности, приведены в табл.4.10.

Таблица 4.10

Нормы характеристик электромагнитных выключателей типа ВЭМ

Характеристика	Тип выключателя		
	ВЭМ-6-2000-38,5-100	ВЭМ-6-3200-40-125	ВЭМ-6-2000-40-125
Собственное время отключения, с, не более	0,06	0,06	0,06
Собственное время включения, с, не более	0,30	0,30	0,35
Скорость движения дугогасительных контактов, м/с			
в момент размыкания	3,2 – 3,7	3,4 – 4,0	3,4 – 4,0
в момент замыкания	2,8 – 3,3	4,4 – 4,7	4,0 – 4,5
Сопротивление постоянному току токоведущего контура полюса, мкОм, не более	45	45	45
Наименьшее напряжение включения привода, не более	0,85 $U_{ном}$		
Наименьшее напряжение срабатывания электромагнита отключения, не более	0,65 $U_{ном}$		
Число операций включения и отключения, подлежащих выполнению при наладке, в зависимости от напряжения на зажимах электромагнита управления:			
при $U_{ном}$	15	15	15
при пониженном напряжении	3	3	3
при повышенном напряжении	3	3	3

## 4.5.2. Элегазовые выключатели.

### 4.5.2.1. Краткие сведения.

В выключателях этого типа изолирующей и дугогасящей средой является элегаз.

*Элегаз («электрический газ»)* – это химическое соединение SF<sub>6</sub>, шестифтористая сера. Оно было получено и описано в 1900 году, но исследовано и предложено в качестве диэлектрика в конце 30-х годов в Ленинградском Физико-техническом институте Академии наук СССР. Электрическая прочность элегаза в 2...4 раза (в зависимости от давления) выше, чем у воздуха, которого он в 5 раз тяжелее. Теплоемкость элегаза в 4 раза выше, чем у воздуха, что позволяет увеличить нагрузку токоведущих частей и уменьшить массу меди в выключателе. Инертный газ, он не вступает в реакцию с кислородом и водородом, не взрывоопасен и не горюч. В смеси с воздухом элегаз безвреден, но под действием электрического разряда образует вредные вещества. Недостатком элегаза является высокая температура сжижения, что вынуждает применять его либо с подогревающим устройством, либо при низком давлении. С целью создания достаточно высокой скорости струи газа для эффективного гашения дуги чаще всего применяется автопневматическое дутье, при котором необходимый перепад давления создается за счет энергии привода.

### 4.5.2.2. Измерение сопротивления изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления.

Измерение выполняется согласно п.4.4.2,б.

#### **4.5.2.3. Испытание изоляции выключателя.**

Испытание должно выполняться напряжением промышленной частоты согласно табл.4.1. Допускается не производить испытание выключателей, заполненных элегазом на заводе-изготовителе и не подлежащих вскрытию в течение всего срока службы.

Испытание изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления.

Вторичные цепи схем защиты, управления, сигнализации и измерения со всеми присоединенными аппаратами (автоматические выключатели, магнитные пускатели, контакторы, реле, приборы и т.п.) испытываются повышенным напряжением промышленной частоты 1 кВ в продолжение 1 мин.

#### **4.5.2.4. Измерение сопротивления постоянному току.**

Измеряется сопротивление главной цепи, как в целом всего токоведущего контура полюса, так и отдельного каждого разрыва дугогасительного устройства. Измерения не производятся у выключателей, заполненных элегазом на заводе – изготовителе и не подлежащих вскрытию в течение всего срока службы.

Измеряются сопротивления обмоток электромагнитов управления и добавочных резисторов в их цепи.

Измеренные значения сопротивлений должны соответствовать нормам завода – изготовителя.

#### **4.5.2.5. Проверка минимального напряжения срабатывания приводов.**

Выключатели должны срабатывать при напряжении не более  $0,85U_{ном}$  при питании привода от источника постоянного тока;  $0,7U_{ном}$  при питании привода от сети переменного тока при номинальном давлении элегаза в полостях выключателя и наибольшем рабочем давлении в резервуарах привода. Напряжение на электромагниты должно подаваться толчком.

#### **4.5.2.6. Испытание конденсаторов делителей напряжения.**

Выполняется по п. 4.15. Значение измеренной емкости должно соответствовать заводской норме.

#### **4.5.2.7. Проверка характеристик выключателя.**

Определяются характеристики, предписанные заводскими инструкциями. Результаты проверок и измерений должны соответствовать паспортным данным.

#### **4.5.2.8. Испытание выключателя многократными опробованиями.**

Производится при различных значениях давления сжатого воздуха в приводе и напряжения на выводах электромагнитов управления согласно табл.4.9. Выполняются операции и сложные циклы (В – О без выдержки времени между операциями – для всех выключателей; О – В и О – В – О для выключателей, предназначенных для работы в режиме АПВ), число которых должно составлять 3 – 5 операций В и О; 2 – 3 цикла каждого вида.

#### **4.5.2.9. Испытание встроенных трансформаторов тока.**

Производится согласно п.4.12.

### 4.5.3. Вакуумные выключатели.

#### 4.5.3.1. Краткие сведения.

Основным элементом выключателя является вакуумная дугогасительная камера. На напряжения 6, 10 и 35 кВ выключатели komponуются с одним разрывом на полюс, на 110 кВ и выше используется большее количество камер.

Гашение электрической дуги в камере происходит в глубоком вакууме (в среднем  $10^{-4}$  Па). Электрическая прочность вакуумной изоляции чрезвычайно велика, что позволяет значительно уменьшить межконтактный промежуток и габариты дугогасительного устройства по сравнению с масляными и воздушными выключателями. Токоведущая система рассчитана на длительное протекание номинального тока и кратковременное (до 3 с) протекание тока КЗ. Свободное перемещение подвижного контакта без нарушения герметичности камеры обеспечивается сифоном.

Дуга, возникающая при размыкании контактов выключателя, горит в парах металла, генерируемых самими контактами. При уменьшении тока и подходе его к нулевому значению выделение пара резко уменьшается и дуга гаснет до достижения током нулевого значения. В результате происходит так наз. *срез* (обрыв) тока, вызывающий перенапряжения в коммутируемой цепи, опасные для отключаемого оборудования.

Малая масса и малый ход подвижных контактов обусловили высокое быстродействие вакуумных выключателей. В современных вакуумных выключателях скорость включения контактов в момент их соприкосновения составляет 0,5...0,8 м/с, скорость размыкания 1,6...2,5 м/с. Допустимый износ контактов 3...4 мм, коммутационный ресурс – до 50 000 отключений номинального тока и до 200 – номинального тока отключения. Поэтому вакуумные выключатели могут работать с минимальным техническим обслуживанием в течение нескольких десятков лет, что определяет перспективность их широкого применения, особенно при отключении больших токов.

#### 4.5.3.2. Измерение сопротивления изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления.

Производится согласно п.4.4.2,б.

#### 4.5.3.3. Испытание изоляции повышенным напряжением промышленной частоты.

Испытание изоляции выключателя. Значения испытательного напряжения принимаются согласно табл. 4.1, испытания проводятся по схемам рис.4.1.

Испытание изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления. Испытываются вторичные цепи схем защиты, управления, измерения и сигнализации со всеми присоединенными аппаратами (автоматические выключатели, магнитные пускатели, контакторы, реле, приборы и т.п.) напряжением 1 кВ в продолжение 1 мин.

Необходимо иметь в виду, что пробой вакуумного промежутка сопровождается повышенным рентгеновским излучением. Поэтому при испытаниях выключателя вне КРУ на расстоянии 0,5 м от аппарата должен устанавливаться защитный экран из стального листа толщиной не менее 2 мм или из стекла марки ТФ-5 толщиной не менее 12,5 мм. Когда испытания проводятся внутри КРУ, защитным экраном служит его фасадная перегородка.

С целью тренировки дугогасительных камер напряжение на разомкнутых контактах постепенно повышается от нуля до нормированного испытательного значения.

Повышение производится до 40% испытательного толчком и далее плавно со скоростью 1 кВ в секунду. Испытательное напряжение прикладывается в течение 1 мин, после чего за время не менее 5с плавно понижается до 25% и снимается.

Испытание изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления. Выполняется согласно 4.5.2.3.

#### 4.5.3.4. Измерение сопротивления постоянному току.

Измерение производится, если это требуется инструкцией завода-изготовителя. Ниже приводятся данные для наиболее распространенных типов вакуумных выключателей.

**Токоведущий контур.** Сопротивление токопровода (между токоведущими стержнями, без розеточных контактов) выключателей ВВЭ-10 Минусинского завода должно быть не более, мкОм:

ВВЭ-10-20/630 .....60;

ВВЭ-10-20/1000 .....55;

ВВЭ-10 -20/1600.....38.

Сопротивления токоведущего полюса выключателя типа ВВВ-10-2/320 должно быть не более 300 мкОм, типа ВВ/TEL-10(6) – не более 50 мкОм.

Предельные значения сопротивления каждого полюса выключателей Ровенского завода приведены в табл. 4.11.

Таблица 4.11

Предельные значения сопротивления постоянному току токоведущего контура выключателей ВВЭ-10

Тип выключателя	Сопротивление каждого полюса, мкОм, не более	
	между подвижными контактами главных цепей КРУ	между выводами без розеточных контактов
ВВЭ-10-20/630	65	45
ВВЭ-10-31,5/630	65	40
ВВЭ-10-20/1000	60	40
ВВЭ-10-31,5/1000	60	40
ВВЭ-10-20/1600	45	25
ВВЭ-10-31,5/1600	45	25
ВВЭ-10-31,5/2000	20	15
ВВЭ-10-31,5/3150	20	15

**Электромагниты управления.** Значения сопротивления обмоток электромагнитов управления для выключателей Минусинского завода, ПО «Полярон» и фирмы «Таврида-электрик» должны быть не выше указанных на табличке электромагнитов, для выключателей Ровенского завода должны соответствовать нормам табл. 4.12.

Таблица 4.12

Нормы на сопротивление постоянному току обмоток электромагнитов управления у выключателей ВВЭ-10 Ровенского завода

Номинальное напряжение обмотки, В	Номинальный ток выключателя, А	Сопротивление, Ом
Электромагнит включения		
110	630 – 1600	0,72 ± 0,03

	2000, 3150	0,54 ± 0,03
220	630 – 1600	2,50 ± 0,12
	2000, 3150	1,92 ± 0,03
Электромагнит отключения		
110	630 – 3150	23,5 ± 1,2
220	630 – 3150	97,0 ± 0,14

#### 4.5.3.5. Проверка минимального напряжения срабатывания выключателя.

Электромагниты управления должны срабатывать при напряжении не более:

электромагниты включения ..... 0,85  $U_{ном}$ ;

электромагниты отключения ..... 0,70  $U_{ном}$ .

#### 4.5.3.6. Измерение временных характеристик.

Отдельные нормы временных характеристик приведены в табл. 4.13.

Таблица 4.13

Нормы временных характеристик вакуумных выключателей

Характеристика	ВВЭ-10		ВВВ-10- 2/320	ВВ/TEL-10, ВВ/TEL-6
	М	Р		
Собственное время отключения, с, не более	0,03	0,055	0,08	0,01
Собственное время включения, с, не более	0,20	0,30	–	0,07
Бестоковая пауза АПВ минимальная, с, не более	0,30	0,30	0,40	0,30

Примечание. М – выключатели Минусинского завода, Р – Рижского завода.

#### 4.5.3.7. Измерения по пп. 4.4.5.4 и 4.4.5.6, а также измерение хода подвижных частей и одновременности замыкания контактов производятся, если это требуется инструкцией завода – изготовителя.

#### 4.5.3.8. Испытание выключателей многократными опробованиями.

Число операций и сложных циклов, подлежащих выполнению при номинальном напряжении на выводах электромагнитов, должно составлять:

3 – 5 операций включения и отключения;

2 – 3 цикла В – О без выдержки времени между операциями.

### 4.6. Выключатели нагрузки, разъединители, отделители и короткозамыкатели.

#### 4.6.1. Выключатели нагрузки (ВН).

##### 4.6.1.1. Измерение сопротивления изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления.

Производится в соответствии с 4.4.2,б.

##### 4.6.1.2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты:

а) изоляции выключателя. Производится в соответствии с табл. 4.1.

б) изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления.

Производится в соответствии с 4.5.2.3.

#### **4.6.1.3. Измерение сопротивления постоянному току:**

а) контактов выключателя. Измеряется сопротивление токоведущей системы полюса и каждой пары рабочих контактов. Значение сопротивления должно соответствовать данным завода – изготовителя. В первом случае измерение производится на токоведущих шинах до и после ВН, во втором – непосредственно на подвижном и неподвижном контактах каждого полюса. У выключателя серии ВНТ (ОАО ПО «Эл-техника»), например, полное сопротивление токоведущей цепи полюса не должно превышать 200 мкОм.

б) обмоток электромагнитов управления. Значение сопротивления должно соответствовать данным завода-изготовителя.

#### **4.6.1.4. Проверка срабатывания привода при пониженном напряжении.**

Производится в соответствии с 4.3.8.3.

#### **4.6.1.5. Испытание ВН многократным опробованием.**

Производится в соответствии с 4.3.9.

### **4.7. Разъединители, отделители и короткозамыкатели.**

#### **4.7.1.Измерение сопротивления изоляции:**

а) поводков и тяг, выполненных из органических материалов. Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ. Сопротивление изоляции должно быть не ниже значений, приведенных в 4.3.2;

б) многоэлементных изоляторов. Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ только при положительной температуре наружного воздуха. Сопротивление каждого элемента должно быть не менее 300 МОм;

в) вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления. Производится в соответствии с 4.4.2,б.

#### **4.7.2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты:**

а) изоляции аппаратов. Производится в соответствии с табл. 4.1;

б) изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления. Производится в соответствии с 4.3.2,б.

#### **4.7.3. Измерение сопротивления постоянному току:**

а) контактной системы между точками «контактный вывод – контактный вывод».

Результаты измерения сопротивления должны соответствовать заводским нормам, а при их отсутствии – предельным значениям, мкОм, приводимым ниже для разъединителей на напряжение до 110 кВ.

Разъединители типов РЛН и РЛТН,	
номинальный ток 600 А .....	220
Разъединители других типов,	
номинальный ток 600 А .....	175
1000 А .....	120
1500 – 2000 А.....	50

б) обмоток электромагнитов управления. Значения сопротивления обмоток должны соответствовать данным завода – изготовителя.

#### 4.7.4. Проверка работы аппаратов.

Проверка производится путем выполнения 5 операций включения и 5 операций отключения. Аппараты с дистанционным управлением проверяются при номинальном напряжении на выводах электромагнитов и двигателей управления.

#### 4.7.5. Определение временных характеристик.

Производится у короткозамыкателей при включении и у отделителей при отключении. Измеренные значения должны соответствовать данным завода-изготовителя, а при их отсутствии – данным, приведенным в табл.4.14.

Таблица 4.14

Наибольшее допустимое время отключения отделителей и включения короткозамыкателей

Тип аппарата	Время отключения, с, не более	Тип аппарата	Время включения, с, не более
Отделители		Короткозамыкатели	
ОД-35	0,5	КЗ-35	0,4
ОД-110	0,7... 0,9	КЗ-110	0,4
ОД-110М	0,5	КЗ-110М	0,35

#### 4.8. Электронные и контактно – электронные коммутационные аппараты.

Разработаны и внедряются высоковольтные коммутационные аппараты на основе силовых полупроводниковых приборов. Реализация таких аппаратов стала возможной благодаря тому, что промышленностью освоен выпуск мощных тиристоров и диодов с высокими номинальными параметрами -порядка нескольких тысяч вольт (ампер). Достоинства электронных аппаратов: бездуговая коммутация; отсутствие подвижных частей; высокое быстродействие; постоянная готовность к срабатыванию; практически не ограниченный ресурс, высокий срок службы, надежность; взрыво- и пожаробезопасность. Кроме того, может быть реализована функция регулирования мощности, подводимой к электроприемнику.

Вместе с тем бесконтактные полупроводниковые аппараты имеют принципиальный и существенный недостаток – отсутствие полного разрыва электрической цепи: даже при запертых вентилях сквозной ток утечки может составлять десятки миллиампер и более, намного превышая порог электробезопасности. Этому недостатка лишены комбинированные аппараты, в которых полупроводниковые вентили соединены последовательно с контактными устройствами. Еще одним недостатком является необходимость неоднократного дублирования однотипных вентилях при их параллельном или последовательном соединении. Первое диктуется требованием выдерживать известное время ток короткого замыкания, второе – стремлением обеспечить достаточный запас по напряжению, учитывающий как возможные перенапряжения на вентиле, так и то обстоятельство, что класс вентиля номинируется по амплитудному значению напряжения, а класс напряжения сети – по его действующему значению. Наличие большого количества мощных вентилях требует установки сложной и

громоздкой системы искусственного охлаждения, а управление ими – сложных вспомогательных цепей. Разумеется, значение этого недостатка будет уменьшаться по мере повышения единичных параметров полупроводниковых приборов.

В итоге стоимость и массо-габаритные показатели таких аппаратов пока сравнительно высоки и применение их в настоящее время целесообразно в тех случаях, когда электромеханические аппараты не способны удовлетворить требования по быстродействию, коммутационному ресурсу, надежности и т.п. Они могут применяться, например, в качестве выключателей нагрузки для переключения секций силовых трансформаторов и реакторов, в системах бесперебойного питания, АВР и АПВ, где они могут обеспечить высокое быстродействие (до 2 мс). Область напряжений – до 10 кВ для электронных и до 35 кВ – для комбинированных контактно-электронных аппаратов.

Наиболее распространенным звеном электронных коммутационных аппаратов является цепочка из встречно-параллельно включенных тиристоров (рис.4.6, а). В ней тиристоры выбираются как по напряжению переключения, так и по обратному напряжению. Соединение вентилей по схеме рис.4.6,б позволяет снизить обратное напряжение на тиристоре, а реактор в схеме рис.4.6,в ограничивает амплитуду тока КЗ.

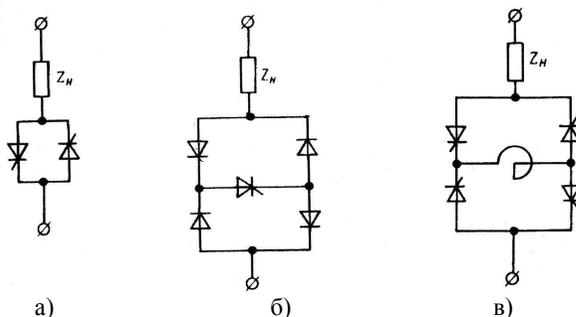


Рис.4.6. Основные варианты схем включения вентилей в электронных выключателях

На рис. 4.7 представлена принципиальная схема комбинированного контактно-тиристорного аппарата, в которую введены дугогасительные контакты S1 и контакты отделителя S2, служащего для обеспечения полного разрыва цепи нагрузки. Во включенном положении аппарата контакты S1 и S2 замкнуты и шунтированная контактами S1 тиристорная цепь обесточена. Моменты коммутации контактов и тиристоров в этой схеме четко синхронизированы. При отключении аппарата контакты S1 размыкаются в начале положительного полупериода тока через один из тиристоров VS1, VS2, который переходит в проводящее состояние. Ток в контактной цепи начинает уменьшаться, а в электронной – нарастать. Сокращение времени переходного процесса достигается интенсивным гашением дуги. После естественного перехода тока через нулевое значение контакты S2 размыкаются.

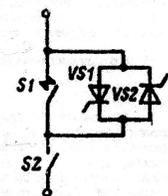


Рис. 4.7. Принципиальная схема контактно-тиристорного аппарата

При включении в первую очередь поступает команда на срабатывание привода контактов, затем отпирается тиристор, для которого напряжение в данный полупериод является прямым. После соприкосновения контактов S1 тиристорная ветвь шунтируется и обесточивается. Таким образом, протекание тока через тиристор ограничено промежутком времени между отпиранием тиристора и полным замыканием контактов S1. В этом интервале, длительность которого не превышает 10 мс, большинство тиристорov допускает перегрузку одиночным импульсом тока с амплитудой, в 8...10 раз превышающей номинальное среднее значение, что в ряде случаев дает возможность исключить необходимость параллельного соединения тиристорov и их искусственного охлаждения.

Преимущества синхронизированного выключателя:

Малая длительность горения дуги и, как следствие, уменьшение износа контактов.

Уменьшается максимальное значение тока в дуге и выделение энергии в ней, что позволяет увеличить номинальный ток отключения.

Короткий импульс тока через тиристоры, упрощение и удешевление установки.

Малое время отключения КЗ.

Увеличивается скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка.

Недостаток – сложность обеспечения жесткой синхронизации системы управления тиристорами с приводным механизмом контактов.

Конструктивно все элементы силовой части электронных аппаратов размещаются в шкафах, баках или на несущих каркасах. Элементы цепей управления и измерения располагаются на печатных платах в кассетах или блоках в силовой части или в отдельных шкафах. Эти цепи необходимо экранировать и подводить к аппарату отдельно от силовых цепей.

При вводе выключателя в эксплуатацию измеряют сначала сопротивление изоляции и сопротивление заземления, затем проверяют функционирование цепей управления и сигнализации. Первое включение аппарата проводят в режиме холостого хода. С этой целью его замыкают на такое сопротивление, при котором обеспечивается протекание небольшого тока, достаточного лишь для удержания тиристорov во включенном состоянии. В этом режиме контролируют распределение напряжений по последовательно включенным и токов по параллельно соединенным тиристорам, коммутационные перенапряжения, токи утечки вентиляей и другие параметры, которые впоследствии могут служить исходными данными для оценки состояния аппарата в период эксплуатации.

Далее проверяют характеристики аппарата при токе и напряжении до номинальных значений включительно. При этом контролируют температуру силовых полупроводниковых приборов, а также температуру охлаждающего воздуха (жидкости). Если аппарат осуществляет регулирование мощности нагрузки посредством ключевых элементов с фазовым управлением (тиристоров, симисторов), измеряют значения высших гармонических составляющих напряжения в заданном диапазоне регулирования. Установлено, что в сетях промышленных предприятий амплитуды 3-й, 5-й и 7-й гармоник не должны превышать 3% амплитуды первой гармоники, а коэффициент искажения формы кривой напряжения – 4%.

## 4.9. Реакторы.

### 4.9.1. Общие сведения.

В сетях до 35 кВ наиболее широко используются *сухие реакторы*. Они выполняются в виде катушки из изолированного провода, закрепленной на бетонных колоннах. Монтируются бетонные реакторы с вертикальным, горизонтальным или ступенчатым расположением фаз, в отдельных камерах закрытого распределительного устройства (ЗРУ). Бетонные реакторы очень дешевы, просты и получили наибольшее распространение. Недостатком их являются невысокие изоляционные свойства бетона, большие габариты и масса. В сетях напряжением выше 35 кВ и в ОРУ применяются реакторы с *масляной* изоляцией, с каркасом из изоляционного материала и стальным баком. Ферромагнитные магнитопроводы в реакторах практически не нашли применения в связи с тем, что при больших токах происходит насыщение стали и, как следствие, уменьшение индуктивности и токоограничивающего эффекта реактора.

По месту включения различают реакторы линейные, групповые и секционные. Линейные реакторы включаются в отдельные линии электропередач (обычно после линейных выключателей), групповые – на группу линий. Секционные реакторы предназначены для ограничения токов КЗ на сборных шинах самого РУ. Различают также реакторы с линейной или нелинейной характеристикой (линейной зависимостью падения напряжения от тока нагрузки), управляемые и неуправляемые. Сухие бетонные реакторы относятся к неуправляемым реакторам с линейной характеристикой.

Одним из основных параметров реактора является его индуктивное сопротивление  $X_p$ , точнее – относительное индуктивное сопротивление  $X_{отн,p}$ , равное отношению падения напряжения на реакторе  $\Delta U_p$  при номинальном токе линии  $I_{ном}$  к номинальному фазному напряжению линии  $U_{ф,ном}$ :

$$X_{отн,p} = \Delta U_p / U_{ф,ном} = I_{ном} X_p \sqrt{3} / U_{ном}.$$

Часто это отношение выражается в процентах; обычно  $X_{p\%} < 10\%$ . Когда  $X_{p\%} > 3\%$ , при расчетах режима короткого замыкания за реактором можно пренебречь сопротивлением источника питания и ошиновки и считать, что ток через реактор будет  $I_k = 100 I_{ном} / X_{p\%}$ .

Чтобы уменьшить потери напряжения на реакторе, а также габариты аппарата, применяют сдвоенные реакторы. В них реакторы соседних линий сближены так, что

между обмотками создается сильная магнитная связь. В номинальном режиме магнитные поля реакторов направлены встречно, вследствие чего индуктивное сопротивление обеих ветвей реактора снижается и падение напряжения на них уменьшается. При КЗ на одной из ветвей падение напряжения на реакторе определяется преимущественно ее сопротивлением  $X_p$ , так как влияние другой ветви, по которой протекает номинальный ток, будет незначительно.

Основными электрическими параметрами реакторов являются:

номинальное напряжение реактора  $U_{p,ном}$ , номинальный ток  $I_{p,ном}$ , ток короткого замыкания  $I_{к.з.р}$  и индуктивность  $L_p$  (или индуктивное сопротивление  $X_p$ ). Протекающий по обмотке реактора ток вызывает потери мощности на его нагрев. В номинальном режиме мощность, выделяемая в виде тепла в небольших реакторах, составляет несколько киловатт, достигает нескольких десятков киловатт в реакторах на большие токи и составляет в среднем 0,2 ... 0,3% установленной мощности аппарата. При КЗ температура реактора резко повышается, поэтому в качестве основного параметра вводится еще значение тока термической стойкости  $I_T$  в интервале времени  $t_T$  или произведение  $I_T \sqrt{t_T}$ , где  $t_T$  – время, за которое при КЗ температура обмотки реактора не превысит допустимую (для меди принимается обычно 200...220, для алюминия 180...200 °С).

В трехфазном комплекте наибольшему нагреву подвергается верхний реактор. Кроме того, при больших токах возникают опасные динамические усилия, которые могут разрушить изоляторы и обмотку, причем в наиболее тяжелых условиях оказывается верхний изолятор. Для снижения этих усилий изменяют полярность обмотки среднего реактора на обратную относительно обмоток крайних реакторов. В этой связи реакторы, предназначенные для вертикальной установки в комплектах, снабжены маркировкой В (верхний), С (средний) и Н (нижний), на что следует обратить внимание при монтаже и наладке. При больших токах КЗ электродинамические силы настолько велики, что обеспечить механическую стойкость элементов вертикальной конструкции не удастся, и тогда прибегают к горизонтальному расположению реакторов.

Масляные реакторы и заземляющие дугогасительные реакторы (дугогасящие катушки) испытываются по нормам для силовых трансформаторов. Сухие токоограничивающие реакторы испытываются в объеме, указанном ниже.

#### **4.9.2. Измерение сопротивления изоляции относительно болтов крепления.**

Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ. Сопротивление изоляции должно быть не менее 0,5 МОм.

#### **4.9.3. Испытание опорной изоляции реакторов повышенным напряжением промышленной частоты.**

Испытательное напряжение опорной изоляции полностью собранного реактора устанавливается согласно табл. 4.28. Продолжительность приложения нормированного испытательного напряжения 1 мин.

Испытание опорной изоляции сухих реакторов может производиться совместно с изоляторами ошиновки ячейки. Перед испытанием следует убедиться в отсутствии трещин в бетоне и его лаковом покрове, целости и чистоте изоляторов, проверить состояние витков катушки реактора. При появлении шума, дребезжания, тресков и пр.,

свидетельствующих о неисправном состоянии реактора, испытание следует прекратить.

#### **4.10. Разрядники и ограничители перенапряжений.**

##### **4.10.1. Общие сведения.**

Наибольшую опасность представляют грозовые перенапряжения, которые могут быть в 6...8 раз больше номинального напряжения электроустановки. Для защиты от них первоначально использовались *искровые (защитные) промежутки*, которые включаются между фазным проводом и землей, параллельно изоляции защищаемого оборудования, и должны пробиваться раньше. Электрическая прочность изоляции зависит от формы и амплитуды импульса и его длительности воздействия. Графически эту связь отражает *вольт-секундная характеристика* – зависимость максимального напряжения воздействующего импульса от предразрядного времени. На графике такая характеристика защитного устройства должна лежать ниже вольт-секундной характеристики защищаемой изоляции.

После пробоя защитного промежутка линия замыкается на землю через сопротивление заземления, падение напряжения на котором определяет *остающееся напряжение* на искровом промежутке. Чем меньше это напряжение, тем выше защитные свойства разрядника. После прохождения импульса тока ионизированный промежуток пробивается фазным напряжением и на землю начинает протекать ток промышленной частоты, называемый *сопровождающим*.

Избежать отключения линии релейной защитой позволяют *трубчатые разрядники*, обеспечивающие не только ограничение перенапряжений, но и прерывание сопровождающего тока путем искусственного гашения дуги. Такой аппарат состоит из двух последовательно включенных искровых промежутков: первый (внешний) выполняет функцию ограничения грозовых перенапряжений, второй (внутренний), расположенный в трубке из газогенерирующего материала, служит для гашения электрической дуги. Под действием высокой температуры дуги с внутренней поверхности трубки выделяется большое количество газа, под действием которого дуга гаснет при первом же переходе тока через нулевое значение. Этот момент сопровождается выхлопом газа и сильным звуковым эффектом, что делает трубчатые разрядники непригодными для использования в РУ подстанций. Обычно с их помощью защищают воздушные ЛЭП и линейные подходы к подстанциям.

Более совершенный способ гашения дуги сопровождающего тока реализован в *вентильных разрядниках*. Здесь длинный искровой промежуток заменен блоком последовательно включенных коротких искровых промежутков длиной 0,5...1,0 мм, в которых дуга разбивается на ряд нестабильных коротких дуг. Последовательно с ними включается нелинейный резистор (карборундовые нелинейные резисторы – вилитовые кольца), сопротивление которого резко возрастает при уменьшении напряжения на разряднике. Благодаря многократно возросшему сопротивлению цепи сопровождающий ток соответственно уменьшается и прерывается искровыми промежутками при первом переходе тока через нуль. Для обеспечения равномерной нагрузки при промышленной частоте искровые промежутки шунтируются нелинейными резисторами.

Вследствие малой термической стойкости вилит непригоден для ограничения внутренних перенапряжений, средняя длительность которых превышает 1 с, тогда как длительность грозового импульса тока составляет в среднем 20 мкс. Поэтому в комбинированных разрядниках, предназначенных для защиты как от внутренних (коммутационных), так и от внешних (атмосферных) перенапряжений, вместо вилита используется материал тервит, изготовляемый тоже из карбида кремния (SiC), но по другой технологии.

Вентильные разрядники работают бесшумно. Число срабатываний фиксируется специальным регистратором, который включается между нижним выводом разрядника и землей. Наиболее надежны электромагнитные регистраторы.

Основной недостаток карбундовых вентильных разрядников состоит в низкой нелинейности резисторов. Значительно более высокую нелинейность имеет вольт-амперная характеристика резисторов на основе оксида цинка ZnO, применяемых в *ограничителях перенапряжений* (ОПН) на 110 кВ и более. В них при номинальном фазном напряжении  $U_{\phi}$  протекает незначительный ток порядка 1 мА, но уже при  $2U_{\phi}$  он возрастает до 1 кА. Малые значения сопровождающего тока (миллиамперы) и мощности, выделяемой в высоконелинейных резисторах (варисторах), дают возможность отказаться от использования искровых промежутков и снизить перенапряжения до  $2 U_{\phi}$  и менее. Габаритные размеры и масса ОПН намного меньше, чем у вентильных разрядников.

#### 4.10.2. Предварительная проверка .

Проверка трубчатого разрядника ограничивается осмотром его поверхности перед установкой на опору и измерением внешнего искрового промежутка на опоре установки разрядника. На поверхности аппарата не должно быть трещин и отслоений, а размеры искрового промежутка не должны отличаться от указанных в документах или в табл.4.15.

Таблица 4.15  
Размеры внешнего искрового промежутка трубчатых разрядников

Тип разрядника	РТФ-6	РТВ-6	РТФ-10	РТВ-10	РТФ-35	РТВ-35	РТВ-110
Внешний искровой промежуток, мм	20	10	25	15	130	100	450

Вентильные разрядники до испытания тщательно проверяются на отсутствие трещин в армировочных швах и фарфоровых покрывках, а также видимых нарушений герметичности разрядника. Армировочный шов должен иметь надежное защитное покрытие, при осторожном проворачивании разрядника не должны наблюдаться шумы, потрескивания или перемещение элементов. Испытания вентильных разрядников производят при температуре наружного воздуха не ниже +10 °С, при более низких температурах разрядник прогревают в теплом помещении или с помощью воздуходувки.

#### 4.10.3. Измерение сопротивления разрядников и ограничителей перенапряжения.

Производится на разрядниках и ОПН с номинальным напряжением менее 3 кВ мегаомметром на напряжение 1000 В, на разрядниках и ОПН с номинальным напряжением 3 кВ и выше – мегаомметром на напряжение 2500 В. Сопротивление разрядников типа РВО (разрядник вентильный облегченный для защиты оборудования подстанций напряжением до 35 кВ), РВН, РВП, CZ должно быть не менее 1000 МОм. Сопротивление элементов разрядников РВС должно соответствовать заводской инструкции.

Разрядник РВМ-35 состоит из двух основных элементов с сопротивлением 600 – 2000 МОм, разрядник РВМГ на 110 кВ – из трех элементов с сопротивлением 400 – 2500 МОм каждый. Сопротивление разрядников РВМ напряжением ниже 35 кВ должно соответствовать значениям, указанным в табл.4.16.

Таблица 4.16

Сопротивление вентильных разрядников типа РВМ

Номинальное напряжение, кВ	Сопротивление, МОм	
	не менее	не более
3	15	40
6	100	250
10	170	450
15	600	2000
20	1000	10 000

Сопротивление ограничителей перенапряжений с номинальным напряжением 110 кВ и выше должно быть не менее 3000 МОм и не должно отличаться более чем на  $\pm 30\%$  от паспортных данных. Сопротивление ОПН с номинальным напряжением до 3 кВ должно быть не менее 1000 МОм, от 3 до 35 кВ должно соответствовать требованиям инструкций заводов – изготовителей.

Сопротивление изоляции изолирующих оснований разрядников с регистраторами срабатывания измеряется мегаомметром на 2500 В и должно быть не менее 1 МОм.

#### 4.10.4. Измерение тока проводимости вентильных разрядников при вынужденном напряжении.

Измерение тока проводимости (тока утечки) позволяет выявить увлажнение внутренних деталей разрядника, ухудшение характеристик нелинейных резисторов из-за нарушения герметичности или по другим причинам.

Для более равномерного распределения напряжения между разрядниками каждой фазы рекомендуется комплектовать их так, чтобы значения токов проводимости элементов в одной фазе не различались более чем на 30...35%.

Измерение токов проводится у разрядников с шунтирующими сопротивлениями. При отсутствии указаний заводов-изготовителей токи проводимости должны соответствовать приведенным в табл.4.17.

Допустимые токи проводимости вентиляных разрядников  
при выпрямленном напряжении и температуре 20 °С

Тип разрядника	Испытательное на- пряжение, кВ	Ток проводимости, мкА	
		не менее	не более
PBC-15	16	200	340
PBC-20	20	200	340
PBC-33	32	450	620
PBC-35	32	200	340
PBM-3	4	380	450
PBM-3	6	120	220
PBM-10	10	200	280
PBM-15	18	500	700
PBM-20	28	500	700
PВЭ-25М	28	400	650
PBMЭ-25	32	450	600
PВРД-3	3	30	85
PВРД-6	6	30	85
PВРД-10	10	30	85

Элемент разрядника PBMГ-110М испытывается напряжением 30 кВ, нормированное значение тока проводимости 1000...1300 мкА. У разрядников типа PBC, не имеющих шунтирующих резисторов, нормируется верхний предел тока утечки 10 мкА.

Для приведения тока проводимости разрядников к температуре +20 °С следует внести поправку 3% на каждые 10 °С отклонения (при температуре больше 20 °С поправка отрицательная). Повышенное значение тока проводимости свидетельствует, как правило, о нарушении герметичности и проникновении влаги внутрь реактора, пониженное – о нарушении контакта в цепи шунтирующих резисторов или их повреждении. Измерение производится по схеме рис.4.8.

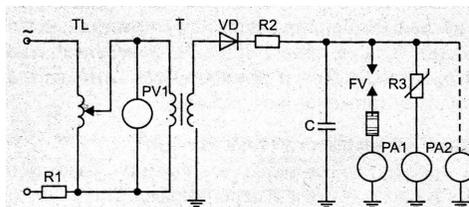


Рис.4.8. Схема измерения тока проводимости вентиляного разрядника

Для измерения тока используют магнитоэлектрические приборы с пределом 1,5 мА класса точности 0,5. Выпрямленное напряжение измеряется киловольтметрами электростатической системы (С96, С100) или микроамперметрами класса точности 0,5 с добавочным резистором. Можно использовать также вольтметр в первичной цепи, предварительно проградуировав его по выпрямленному напряжению. Производить соответствующий пересчет по коэффициенту трансформации нежелательно,

так как при этом трудно учесть искажение формы кривой напряжения, а также падение напряжения в защитных резисторах и выпрямителе. Достаточно точное измерение выпрямленного напряжения требуется в связи с тем, что изменение его на 1 кВ может привести к изменению тока проводимости на 100...120 мкА. Сопротивление токоограничивающего резистора, кОм, должно быть не менее  $U_{исп}/0,1$ , где  $U_{исп}$  – испытательное напряжение, кВ.

#### 4.10.5. Измерение тока проводимости ограничителей перенапряжения .

Производится на фазном напряжении, непосредственно миллиамперметром переменного тока. Надо только учесть, что ввиду несинусоидальности кривой тока следует использовать либо стрелочные приборы электромагнитной или электродинамической систем, либо цифровые мультиметры класса True RMS, обеспечивающие достоверное («true») измерение среднеквадратичного значения периодического сигнала произвольной формы. Кроме того, следует принимать во внимание, что подобные кривые содержат высшие гармоники, которые могут повлиять на результат измерения. В энергетике гармоники выше 13-й обычно не рассматриваются, поэтому частотный диапазон приборов для измерения тока проводимости ОПН должен включать значения частоты по крайней мере до  $50 \times 13 = 650$  Гц. Предельные значения тока проводимости указываются в инструкции завода-изготовителя, например, 1,5 мА для ОПН-110.

#### 4.11. Измерительные трансформаторы напряжения (электромагнитные).

##### 4.11.1. Общие сведения.

Измерительные трансформаторы напряжения (ТН, TV) служат для преобразования высокого напряжения сети в более низкое напряжение стандартного значения, удобное для измерения и обеспечения безопасности персонала. Номинальное вторичное напряжение принимается равным 100 или  $100/\sqrt{3}$  В, что позволяет применять одни и те же измерительные приборы и реле защиты в цепях низшего напряжения (НН) независимо от номинального напряжения сети на стороне высшего напряжения (ВН). Один конец вторичной обмотки ТН обязательно заземляется. В нормальных условиях ТН работает в режиме, близком к холостому ходу.

*Номинальное напряжение* обмоток указывается на щитке ТН. За номинальное напряжение аппарата принимается номинальное напряжение первичной обмотки. Отношение номинального первичного напряжения  $U_{1ном}$  к номинальному вторичному напряжению  $U_{2ном}$  называется *коэффициентом трансформации*:

$$k_{ном} = U_{1ном} / U_{2ном}.$$

Из-за наличия тока холостого хода и падения напряжения в обмотках ТН возникает *погрешность по напряжению*

$$\Delta U = \frac{U_2 k_{ном} - U_1}{U_1} 100\%,$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – измеренные значения на первичной и вторичной обмотках соответственно. При  $U_1/U_2 = k_{ном}$  погрешность  $\Delta U = 0$ . При номинальных условиях допустимая погрешность ТН по напряжению численно равна классу точности (0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0 у ТН, предназначенных для измерения; у дополнительных обмоток устанавливается класс 3). Несовпадение по фазе векторов  $U_1$  и  $U_2$  вызывает *угловую погрешность*, с которой приходится считаться при измерении активной мощности и энергии

и проверке релейной защиты. Угловую погрешность уменьшают с помощью специальных компенсирующих обмоток.

*Номинальная мощность* ТН определяется как значение вторичной мощности, указанное на паспортной табличке, которую он отдает во вторичную цепь с сохранением соответствующих классов точности. У трансформаторов, предназначенных для измерения, класс точности сохраняется при изменении отдаваемой мощности в диапазоне 0,16...1,44 номинальной, для защиты – в значительно более широком диапазоне. Следует отметить, что ТН может быть значительно перегружен сверх номинальной мощности без перегрева его частей: *предельная (максимальная) мощность* допускается длительно, кратковременно – и более высокое ее значение, но в этих случаях класс точности не нормируется.

Выпускаются однофазные и трехфазные трансформаторы напряжения. В трехфазную сеть могут быть включены либо два однофазных трансформатора, вторичные обмотки которых собраны по схеме неполной звезды, либо три однофазных ТН по схеме звезда – звезда. Трехфазные трансформаторы выполняются трехстержневыми или пятистержневыми. Пятистержневые ТН, основные вторичные обмотки которых соединяются обычно в звезду, снабжены дополнительной обмоткой, соединенной в разомкнутый треугольник и служащей фильтром напряжения нулевой последовательности. Номинальное напряжение этой обмотки выбрано так, чтобы максимальное значение фазного напряжения нулевой последовательности  $U_0$  составляло  $100/3$  В. В нормальном режиме работы сети и при симметричном КЗ на стороне ВН напряжение на зажимах дополнительной обмотки близко к нулю (напряжение небаланса составляет обычно 0,5...2 В), а при замыкании на землю равно  $3U_0$ . В сетях с изолированной нейтралью это напряжение подается в схему сигнализации, в сетях с глухозаземленной нейтралью действует на срабатывание релейной защиты.

При напряжении выше 35 кВ габариты ТН с одним магнитопроводом резко возрастают. Поэтому ТН на 110 кВ выполняют двухкаскадными, с магнитопроводом в каждом каскаде. В режиме холостого хода приложенное напряжение разделяется поровну между обмотками ВН обоих каскадов, но ток нагрузки размагничивает один из магнитопроводов, воздействуя таким образом на уменьшение реактивного сопротивления его обмотки. Для выравнивания распределения напряжения между ступенями ВН вводятся связующие обмотки. Помимо электромагнитных ТН, для понижения напряжения используются также емкостные делители напряжения.

Условные обозначения: Н – трансформатор напряжения; З – один вывод заземлен; О – однофазный; Т – трехфазный; К – каскадный или с компенсационной обмоткой; Ф – с фарфоровой наружной изоляцией; М – масляный; С – сухой (с воздушно-бумажной изоляцией); И – с дополнительными обмотками для контроля изоляции; ДЕ – с емкостным делителем. Например, ЗНОЛ – однофазный ТН, с литой изоляцией, один вывод первичной обмотки заземлен; НТМИ – трехфазный ТН с масляным охлаждением, с обмоткой для контроля изоляции сети и др.

Выводы первичной обмотки (ВН) имеют обозначения  $A, X$  для однофазных и  $A, B, C, N$  для трехфазных трансформаторов. Выводы основной вторичной обмотки (НН) имеют соответственно обозначения  $a, x$  и  $a, b, c, N$ , выводы дополнительной обмотки –  $a_d, x_d$ . Начала первичных и вторичных обмоток присоединяются соответственно к выводам  $A, B, C$ ;  $a, b, c$ ;  $a_d$ .

#### 4.11.2. Измерение сопротивления изоляции обмоток.

Измерение сопротивления изоляции обмотки ВН производится мегаомметром на напряжение 2500 В, вторичных обмоток, а также связующих обмоток каскадных трансформаторов – мегаомметром на напряжение 1000 Ом. Измеренные значения сопротивления изоляции должны быть не менее приведенных в табл. 4.18.

Таблица 4.18

Сопротивление изоляции трансформаторов напряжения

Класс напряжения, кВ	Допустимое сопротивление изоляции, МОм, не менее		
	Основная изоляция	Вторичные обмотки*	Связующие обмотки
3 – 35	100	50(1)	1
110	300	50(1)	1

\* Значения сопротивления изоляции приведены: без скобок – при отключенных вторичных цепях; в скобках – с подключенными вторичными цепями.

При измерении сопротивления изоляции первичной обмотки ТН она должна быть отсоединена от земли, а выводы вторичных обмоток и корпус (цоколь) объединены и заземлены (рис. 4.9). Измерение сопротивления изоляции вторичных обмоток производится на каждой обмотке по отношению к корпусу и присоединенным к нему остальным обмоткам.

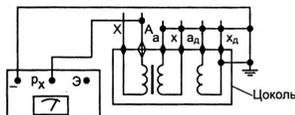


Рис.4.9. Схема измерения сопротивления изоляции первичных обмоток трансформатора напряжения

#### 4.11.3. Испытание повышенным напряжением частоты 50 Гц.

Испытание обмотки ВН проводится для ТН с изоляцией всех выводов обмотки ВН этих трансформаторов на номинальное напряжение. Значения испытательного напряжения основной изоляции приведены в табл. 4.19, продолжительность – 1 мин. Измерение допускается производить как на стороне ВН посредством киловольтметра, так и на стороне НН испытательного трансформатора с пересчетом по коэффициенту трансформации.

Значения испытательного напряжения для основной изоляции измерительных трансформаторов

Исполнение изоляции измерительного трансформатора	Испытательное напряжение (кВ) при номинальном напряжении трансформатора, кВ					
	3	6	10	15	20	35
Нормальная органическая	21,6	28,8	37,8	49,5	58,5	85,5
Нормальная керамическая	24	32	42	55	65	95

Значение испытательного напряжения для изоляции вторичных обмоток вместе с присоединенными к ним цепями принимается равным 1 кВ, продолжительность приложения напряжения – 1 мин. Заземление вторичных обмоток (как глухое, так и через пробивные предохранители) на время испытания отсоединяется. Вторичные цепи, содержащие электронные элементы, при этом рекомендуется отключить.

#### 4.11.4. Измерение сопротивления обмоток постоянному току.

Производится у связующих обмоток каскадных трансформаторов напряжения.

Отклонение измеренного сопротивления от паспортного значения или от измеренного на других фазах не должно превышать 2%. При сравнении с паспортными данными измеренное значение должно приводиться к температуре заводских испытаний, при сравнении с другими фазами измерения на всех фазах следует проводить при одной и той же температуре.

#### 4.11.5. Проверка полярности выводов и группы соединения обмоток.

Производится в случае, если есть сомнение в достоверности паспортных данных или они отсутствуют. Проверку производят путем подачи импульсов постоянного тока на обмотку ВН трансформатора; к обмотке НН подключается стрелочный милливольтметр с нулем посередине шкалы или цифровой прибор с индикацией полярности (см. 3.3.3).

Проверка полярности обмоток трехфазных ТН импульсным методом производится по схемам рис. 4.10.

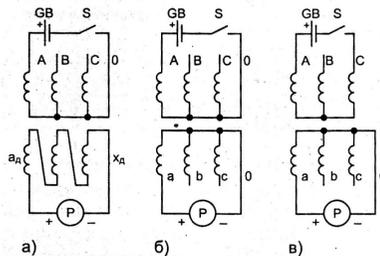


Рис.4.10. Схемы проверки полярности выводов трехфазных трансформаторов напряжения с соединением обмоток: а) звезда с нулем – разомкнутый треугольник; б)

звезда – звезда с выведенными нулевыми точками; в) звезда – звезда с выведенной нулевой точкой вторичной обмотки

По схеме рис. 4.10,а прибор Р подсоединяется к выводам *a* и *x*, а положительный полюс «+» источника тока GB поочередно подключается к выводам *A*, *B* и *C*; при замыкании ключа *S* стрелка прибора должна отклониться вправо. В схеме рис.4.10,б в момент замыкания ключа стрелка отклонится вправо, если зажимы «+» источника и прибора подключены к зажимам *A* и *a*, влево – если «плюс» прибора соединен с выводами *b* или *c*. Согласно рис.4.10,в «минус» прибора постоянно подсоединен к нейтрали, а «плюс» поочередно подключается к выводам *a*, *b* и *c* вторичной обмотки ТН. Источник питания при этом поочередно подключают к выводам *AB*, *BC* и *CA* первичной обмотки трансформатора так, что «плюс» его соединяется с выводами *A*, *B* и *C*, а «минус» – с выводами *B*, *C* и *A* соответственно. Тогда при правильной полярности выводов обмоток стрелка прибора в момент замыкания цепи отклонится: вправо, если прибор подсоединен «плюсом» к выводу *a*, влево – к выводу *c*, и не отклонится или отклонится незначительно при подключении «плюса» прибора к выводу *b*.

#### 4.11.6. Проверка вторичных цепей ТН.

##### 4.11.6.1. Определение нагрузки.

Погрешность ТН зависит от нагрузки его вторичной цепи. Погрешность по напряжению отрицательна и линейно возрастает с увеличением тока нагрузки и вторичной (выходной) мощности, а также с уменьшением коэффициента мощности  $\cos \varphi_2$ . Угловая погрешность при холостом ходе положительна, а при возрастании мощности нагрузки с преобладанием активной составляющей становится отрицательной и также растет.

Предварительно нагрузка может быть определена расчетным путем, в смонтированной схеме – непосредственным измерением фазных напряжений и токов. Основные данные ТН распространенных типов приведены в табл. 4.20.

Таблица 4.20

Технические данные измерительных трансформаторов напряжения

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная мощность, В·А, для классов точности				Максимальная мощность, В·А	Напряжение КЗ, $u_{кз},\%$
		0,2	0,5	1	3		
НОМ-10	10	-	75	150	300	640	6,4
НОМ-35	35	-	150	250	600	1200	3,87
НОЛ 08-10	10	50	75	150	300	640	4,95
НТМК-10	10	-	120	200	500	960	3,07
НТМИ-10	10	-	120	200	500	960	5,0
ЗНОЛ 09-10	$10/\sqrt{3}$	50	75	150	300	640	4,8
(06-10)							
ЗНОМ-15-2	$10/\sqrt{3}$	-	75	150	300	640	4,63
ЗНОМ35-65	$35/\sqrt{3}$	-	150	250	600	1200	6,0

НКФ-110-57	$110/\sqrt{3}$	-	400	600	1200	2000	4,05
------------	----------------	---	-----	-----	------	------	------

#### **4.11.6.2. Определение полного сопротивления вторичной обмотки ТН и соединительных проводов.**

Сопротивление обмоток ТН измеряется на переменном токе. Напряжение  $U_1$  на первичной стороне ТН плавно увеличивают до тех пор, пока ток  $I_2$  во вторичной обмотке, замкнутой на амперметр, не достигнет номинального (для данного класса точности) значения; тогда сопротивление

$$Z_k = U_1 / I_2 k_n,$$

где  $k_n$  – коэффициент трансформации по напряжению.

У однофазных ТН и трехфазных с выведенной нулевой точкой измерения производятся на фазных обмотках. При изолированной нейтрали напряжение подается на выводы двух фаз первичной обмотки, а одноименные выводы вторичной обмотки замыкаются на амперметр. В этом случае сопротивление одной фазы равно половине рассчитанного значения. Измерения проводятся на фазах  $AB - ab$ ,  $BC - bc$  и  $CA - ca$  поочередно и среднее из трех значений принимается за расчетное.

Когда осуществить питание трансформатора со стороны ВН не представляется возможным, напряжение подают на вторичную обмотку, а первичную закорачивают. Чтобы определить таким образом сопротивление одной фазы дополнительной обмотки, соединенной по схеме разомкнутого треугольника, следует результат измерения поделить на три. При испытании необходимо учитывать особую опасность, которая может возникнуть в случае разрыва первичной цепи.

Измерение сопротивления соединительных проводов и жил кабеля может производиться омметром любого типа.

#### **4.11.6.3. Проверка схем включения ТН.**

Проверка выполняется под рабочим напряжением.

На ближайшей к трансформатору клеммной сборке измеряется напряжение на всех выводах вторичной обмотки ТН попарно и относительно земли. Если фазные и междуфазные напряжения симметричны, а на выводах разомкнутого треугольника действует только напряжение небаланса, т.е.  $3U_0 \leq 2 \dots 3 \text{ В}$ , то все обмотки включены правильно.

Для проверки маркировки фазных обмоток ТН отключают пофазно напряжение на стороне ВН трансформатора или используют фазоуказатель. В первом случае напряжение на отключенной фазе вторичной обмотки должно исчезнуть или резко понизиться. При проверке фазоуказателем одна из фаз (обычно фаза  $b$ ) должна быть заземлена. Если на стороне ВН отсутствуют предохранители или однофазные разъединители, можно отключать пофазно вторичные цепи непосредственно на выводах НН трансформатора, но при этом повышается вероятность ошибок.

Правильность сборки схемы разомкнутого треугольника проверяют с помощью векторной диаграммы напряжений, по которой определяется положение вектора напряжения нулевой последовательности  $3U_0$  относительно векторов напряжения основной вторичной обмотки (звезды). Напряжение  $3U_0$  создается путем исключения

напряжения одной из фаз дополнительной обмотки. Вектор  $3U_0$  должен находиться в противофазе с вектором напряжения этой фазы.

Проверка производится следующим образом (рис.4.11). На одной из фаз трансформатора, обычно фазе  $a$ , отсоединяют жилу кабеля от вывода  $x_d$  дополнительной обмотки и подключают ее к выводу  $a_d$  той же обмотки (рис.4.11,б). Тем самым исключается напряжение фазы  $A$  и имитируется режим короткого замыкания в ней. Вольтметром поочередно измеряется напряжение между выводом  $a_d$  дополнительной обмотки и выводами  $a, b, c$  и нейтралю звезды.

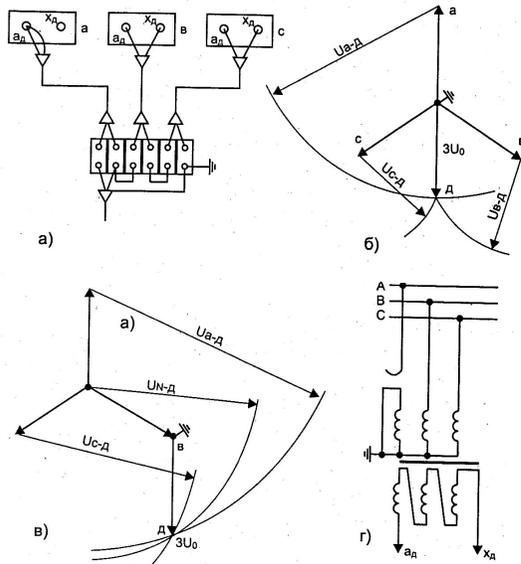


Рис. 4.11. Определение положения вектора  $3U_0$

Графически эти напряжения можно представить как разность векторов напряжений фаз и нейтрали звезды и напряжения нулевой последовательности (относительно земли):

$$U_{\phi-d} = U_{\phi} - 3U_0; U_{N-d} = U_{N-d} - 3U_0.$$

Для определения положения вектора  $3U_0$  строится звезда фазных напряжений; заземленные точки звезды и разомкнутого треугольника совмещаются. Из концов векторов напряжений звезды проводятся дуги окружностей, радиус каждой из которых равен длине соответствующего вектора  $U_{\phi-d}$  ( $U_{N-d}$ ). Точка пересечения трех дуг является концом вектора  $3U_0$ , начало которого находится в заземленной точке: в нейтрали звезды (рис.4.11,б) или в конце вектора напряжения фазы  $b$  (рис.4.11,в).

Для трехфазных пятистержневых ТН можно имитировать однополюсное КЗ и создать напряжение  $3U_0$ , отключив одну из фаз первичной обмотки от сети и заземлив ее отключенный вывод.

Верхний предел измерения вольтметра должен быть выбран на двойное линейное напряжение. Инструментально положение вектора  $3U_0$  можно определить с помощью фазометра.

#### **4.11.6.4. Фазировка ТН.**

При наличии на подстанции двух и более трансформаторов напряжения предусматривается переключение цепей защиты, автоматики и измерений с одного ТН на другой. Фазировка позволяет убедиться в том, что при таком переключении к реле и измерительным приборам подводятся напряжения одной и той же фазы. Проверка производится аналогично описанной в 2.2.

Соединение вторичных обмоток трансформаторов в одной точке осуществляется обычно путем заземления одноименных выводов обмоток. Вольтметром измеряется напряжение между выводом одного ТН и всеми выводами другого. Для одноименных фаз это напряжение должно быть равно нулю, для разных – линейному напряжению.

Подобные измерения выполняют на всех реле – повторителях, рубильниках, вспомогательных контактах и прочих переключающих элементах в цепях напряжения.

#### **4.11.7. Проверка заземления ТН.**

Заземляемые выводы обмоток ВН трансформаторов должны соединяться непосредственно с контуром заземления; баки заземляются отдельно.

Заземление вторичных обмоток ТН (глухое или через пробивной предохранитель) должно устанавливаться на ближайшей клеммной сборке или на зажимах трансформатора. Соединительный провод выбирают сечением не менее 4 (медь) или 6 мм<sup>2</sup> (алюминий), так же как и соединение фазы *b* отдельных ТН с заземленной общей шинкой. Для надежности заземление ее должно быть выполнено на трех – пяти соседних панелях.

Вторичные обмотки, питающие оперативные цепи, заземляются через пробивные предохранители на напряжение пробоя 700...1000 В. Исправность предохранителей проверяется мегаомметром на напряжение 500 В.

### **4.12. Измерительные трансформаторы тока.**

#### **4.12.1. Общие сведения.**

##### **4.12.1.1. Основные характеристики.**

Трансформатор тока (ТТ, ТА) служит для преобразования измеряемого тока первичной силовой цепи до значения, удобного для использования во вторичных цепях измерительных приборов и релейной защиты, а также для изоляции вторичных цепей от высокого напряжения сети. Наиболее распространенным видом ТТ являются *электромагнитные* трансформаторы переменного тока, имеющие замкнутый магнитопровод с одной первичной и одной или несколькими вторичными обмотками. Первичная обмотка изолирована от вторичной в соответствии с классом изоляции аппарата. Один вывод вторичной обмотки обязательно заземляется, так что при повреждении изоляции приборы и реле остаются под потенциалом земли.

Первичная обмотка ТТ включается последовательно в цепь измеряемого тока, вторичная замыкается на низкоомную нагрузку (токовые цепи измерительных приборов, реле и др.). По выполнению первичной обмотки различают одновитковые и многовитковые ТТ. Одновитковые ТТ имеют две разновидности: с собственной первичной обмоткой или без нее; последние могут быть встроенными, шинными или разъемными. У встроенного ТТ роль первичной обмотки выполняет токоведущий стержень проходного изолятора, в шинном ТТ – шины РУ. Магнитопровод разъемного ТТ состоит из двух частей, которые могут размыкаться или смыкаться вокруг проводника с измеряемым током. Многовитковые ТТ изготавливаются с катушечной первичной обмоткой, надеваемой на магнитопровод. Первичной обмотке присваивается индекс 1, вторичной – индекс 2. В каскадных ТТ осуществляется ступенчатая трансформация тока; в двухступенчатом каскадном ТТ вторичная обмотка верхней ступени служит первичной обмоткой нижней ступени. Номинальными параметрами ТТ являются следующие.

*Номинальное напряжение* – линейное напряжение сети ВН, которое определяет класс изоляции между первичной и вторичной обмотками.

*Номинальный ток* – это то значение тока, которое аппарат может длительно пропускать. Шкала первичных номинальных токов содержит значения от 1 до 40 000 А, вторичный номинальный ток принимается равным 5 А, реже – 1 А, когда присоединяемые к трансформатору приборы и реле удалены от него на значительное расстояние и сопротивление вторичной цепи достаточно велико.

*Номинальный коэффициент трансформации* – отношение номинального первичного тока  $I_{1ном}$  к номинальному вторичному току  $I_{2ном}$ :

$$k_{ном} = I_{1ном} / I_{2ном}.$$

Действительный коэффициент трансформации  $I_1 / I_2$  не равен номинальному: из-за влияния потерь и тока намагничивания вторичный ток оказывается меньше расчетного значения  $I_1/k_{ном}$ .

*Номинальная нагрузка* ТТ – полное сопротивление его внешней вторичной цепи  $Z_{2ном}$  (при коэффициенте мощности  $\cos \varphi = 0,8$ ), при котором погрешность не превышает установленного значения. Употребляется также понятие *номинальной мощности*, В·А:

$$S = I_{2ном}^2 Z_{2ном}.$$

*Номинальная предельная кратность* первичного тока по отношению к номинальному соответствует тому значению первичного тока, при котором погрешность достигает 5 или 10% (нагрузка номинальная).

К номинальным параметрам относятся также динамическая и термическая стойкость (кратность).

Как правило, трансформаторы тока работают в режиме, близком к короткому замыканию. При протекании первичного тока в магнитопроводе создается магнитный поток  $\Phi_1$ , вторичный ток создает поток  $\Phi_2$ . Угол между этими векторами близок к  $180^\circ$ , и в результате магнитопровод намагничивается сравнительно небольшим магнитным потоком  $\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_2$ ; обычно при номинальной нагрузке  $\Phi_0 = (1 \dots 3\%)\Phi_1$  и

индукция составляет около 0,1 Т. Но если по какой-либо причине цепь тока нагрузки разрывается, весь первичный поток  $\Phi_1$  становится намагничивающим, индукция возрастает до 1,5...1,8 Т и скачок напряжения на вторичной обмотке может достигнуть нескольких сотен и даже тысяч вольт при номинальном первичном токе. Этот режим является чрезвычайно опасным в связи с возможностью электропоражения людей, а также повреждения изоляции и пожара на трансформаторе из-за перегрева сердечника вихревыми токами. Трансформаторы, напряжение на разомкнутой вторичной обмотке которых при номинальном первичном токе превышает 350 В, должны иметь предупреждающую надпись.

#### **4.12.1.2. Классификация и обозначения.**

Трансформаторы тока классифицируются по следующим основным признакам:

- род установки – наружные, для работы на открытом воздухе, и внутренние, для закрытых и комплектных распределительных устройств;
- конструкция – втулочные, встроенные, проходные, опорные, шинные, разъемные;
- число ступеней трансформатора – одноступенчатые, каскадные;
- число вторичных обмоток – одна или несколько;
- назначение вторичных обмоток – для измерения или защиты, для измерения и защиты.

Условное обозначение ТТ состоит из букв и цифр. Цифры указывают номинальное напряжение, буква Т («трансформатор тока») всегда является начальной, а обозначение опорного ТТ опускается; эти трансформаторы применяются в наружных электроустановках. Приняты следующие буквенные обозначения ТТ (по конструкции первичной обмотки, роду изоляции, назначению):

П – проходной;

О – одновитковый стержневой;

Ш – одновитковый шинный;

К – каскадный, с конденсаторной изоляцией или катушечный;

В – с воздушной изоляцией, водяным охлаждением или встроенный;

Л – с литой изоляцией;

М – маслонеполненный, малогабаритный или модернизированный;

Ф – с фарфоровой изоляцией (покрышкой);

Н – наружной установки;

Д – для дифференциальной защиты;

Р – для релейной защиты;

З – для защиты от замыканий на землю.

Так, например, ТПОЛ – 10 означает: трансформатор тока с главной изоляцией на напряжение 10 кВ, по способу установки – проходной, по конструкции первичной обмотки – одновитковый, особенность конструкции – с литой изоляцией.

#### **4.12.1.3. Погрешность.**

*Токовая погрешность* в процентах выражается отношением

$$f = \frac{k_{ном} I_2 - I_1}{I_1} 100\%,$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – текущие значения первичного и вторичного токов, или

$$f = \frac{I_2 - I_{2ном}}{I_{2ном}} 100\%.$$

При отсутствии компенсации токовая погрешность всегда имеет отрицательный знак, ее абсолютное значение уменьшается с ростом тока до 100...120% номинального, а при большей кратности тока возрастает (рис. 4.12).

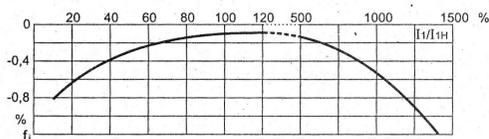


Рис.4.12. Зависимость токовой погрешности ( $f$ ) трансформатора тока от кратности первичного тока ( $I_1/I_{ном}$ )

Эта погрешность возрастает также с увеличением сопротивления и уменьшением мощности нагрузки. Предельная токовая погрешность при первичном токе, равном 100...120% номинального, определяет *класс точности* ТТ: 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 10 и Р (для релейной защиты). Отрицательную токовую погрешность компенсируют чаще всего уменьшением числа витков вторичной обмотки.

Фазный сдвиг между векторами первичного и вторичного токов отличается от  $180^\circ$  на небольшой угол  $\delta$ , измеряемый в минутах и называемый *угловой погрешностью*. Если вторичный ток опережает по фазе первичный, погрешность считается положительной. Угловую погрешность следует учитывать при измерении активной мощности и энергии, а также в отдельных видах релейных защит. Зависимость угловой погрешности от первичного тока при отсутствии компенсации аналогична токовой, но она имеет положительный знак. Для уменьшения угловой погрешности на магнитопроводе устанавливают короткозамкнутый виток.

Различают также *полную погрешность*  $\varepsilon$ , которая характеризует относительное значение намагничивающего тока:

$$\varepsilon = \frac{I_{нам}}{I_1} 100\%,$$

причем ток  $I_{нам}$  рассчитывается как среднеквадратичное (действующее) значение разности

$$k_{ном} i_2 - i_1,$$

где  $i_1$  и  $i_2$  – мгновенные значения токов. Иначе говоря, при определении полной погрешности производится геометрическое (векторное), а токовой погрешности – алгебраическое суммирование первичного и вторичного токов, причем  $\varepsilon \geq f$ .

Для оценки точности работы ТТ в схемах релейной защиты в основном используется показатель  $\varepsilon$ , так как он непосредственно отражает значение намагничивающего тока (для токовых дифференциальных, нулевой последовательности и некоторых других защит). Вместе с тем для таких защит, как, например, дистанционные и максимальные токовые, важен учет погрешности  $f$ . Полезно иметь в виду, что при удовлетворительных значениях  $\varepsilon$  требования к показателю  $f$  тем более удовлетворяются. Технические данные ТТ наиболее часто встречающихся серий приведены в табл. 4.21

Таблица 4.21

Технические данные трансформаторов тока на напряжение 10, 35 и 110 кВ

Тип трансформатора	Класс точности	Номинальный первичный ток, А	Номинальная нагрузка, В·А, вторичной обмотки		Предельная кратность тока обмотки для защит
			для измерения	для защит	
ТПЛ-10	0,5; 10; 10Р	30...400	10	15	13
ТПЛУ-10	0,5; 10Р	30...100	10	15	13
ТПОЛ-10	0,5; 10Р	600...1600	10	15	19...25
ТЛ-10	0,5; 10Р	50...1000 1000...3000	10 20	15 30	15(17) 15(20)
ТЛМ-10	0,5; 10Р	200...1500	10	15	15
ТОЛ-10	0,5; 10; 10Р	50...1500	10	15	10
ТПЛК-10	0,5; 10Р	10...800	10	15	12...20
ТПОЛ-35	0,5; 1; 10Р	400...1500	20	15...50	13...26
ТШЛ-10	0,5; 10Р	2000...5000	20	30	25
ТВ-10	0,5	6000	20	-	3
ТФМ-35-П-У1	0,5; 5Р; 10Р	15...3000	3 0	20	
ТВ-110	0,5; 1; 10Р	200...2000	10...50	10...60	5...50
ТВТ-110	1; 10Р	300...2000	30...50	10...50	12...24

В отличие от измерений, выполняемых в нормальном режиме при токах, близких к номинальным значениям, для релейной защиты необходимая точность работы ТТ должна быть обеспечена в аварийных режимах при токах, во много раз превышающих номинальные. В этих режимах резко возрастает погрешность из-за роста намагничивающего тока, насыщения магнитопровода и потерь в нем. Когда ТТ работает у точки перегиба характеристики намагничивания, даже небольшое увеличение значения первичного тока может вызвать резкое нарастание намагничивающего тока и погрешности ТТ. Необходимо, кроме того, учитывать, что при глубоком насыщении стали искажается форма кривой вторичного тока, что может привести к вибрации контактов электромеханических реле и неправильной работе статических реле. Для большинства защит допускается погрешность по току не более 10% и по углу до 7°. Считается, что в пределах допустимой токовой погрешности форма кривой также удовлетворяет нормам. Соответствие ТТ этому критерию проверяется обычно с по-

мощью кривых зависимости предельной кратности первичного тока по отношению к номинальному  $I_1/I_{ном}$ , при которой полная погрешность не превосходит 10%. Эти кривые строятся для каждой обмотки данного типа ТТ в зависимости от расчетного сопротивления вторичной цепи  $Z_n$  при  $\cos \varphi = 0,8$  (рис. 4.13).

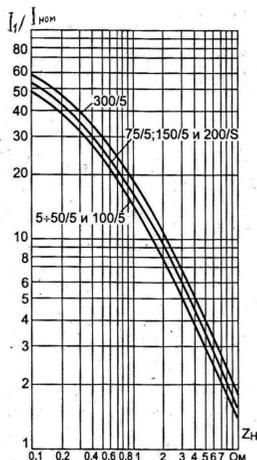


Рис.4.13. Кривые 10%-ной погрешности трансформатора тока типа ТПФ

При возрастании первичного тока сверх предельной кратности погрешность быстро увеличивается и может вызвать нарушение нормальной работы защиты. Поэтому номинальная предельная кратность должна быть выше отношения тока КЗ к номинальному. Увеличить предельную кратность можно за счет уменьшения сопротивления нагрузки. Впрочем, столь критичны к погрешности ТТ только реле старых типов: ЭТ-520, РБМ и др., тогда как выпускаемые в настоящее время электромеханические и полупроводниковые реле рассчитаны на надежную работу при погрешности до 50%.

Когда мощности одного ТТ недостаточно, используют два трансформатора, вторичные обмотки которых соединяют согласно параллельно или последовательно. Если коэффициенты трансформации обоих ТТ равны, то (без учета погрешностей) сопротивление нагрузки для каждого из них составит  $Z_n = 2Z$  при параллельном соединении обмоток и  $Z_n = 0,5Z$  при последовательном соединении, где  $Z$  – общая нагрузка для обеих обмоток. В первом случае результирующий коэффициент трансформации уменьшается в два раза, во втором остается без изменений. Последовательное соединение позволяет допустить почти вдвое большее сопротивление нагрузки при данной кратности тока 10% – ной погрешности, параллельное – увеличить ток в нагрузке. Последовательное включение вторичных обмоток ТТ с разными коэффициентами трансформации не допускается, так как при этом нагрузка распределится между обмотками неодинаково.

#### 4.12.1.4. Другие виды измерительных преобразователей тока.

Обычные электромагнитные ТТ имеют известные недостатки (высокая стоимость, большая масса, инерционность), побудившие конструкторов искать иные способы преобразования тока.

Стоимость электромагнитных ТТ с литой (до 35 кВ) и масляной (35 кВ и выше) изоляцией обусловлена в основном классом изоляции, возрастающей примерно пропорционально квадрату напряжения. Так называемые *магнитные трансформаторы* тока не требуют высокого уровня изоляции: датчик тока в них, представляющий собой разомкнутый магнитопровод с вторичными обмотками на нем, удален от провода с измеряемым током на значительное расстояние. Однако по той же причине такие ТТ подвержены влиянию токов соседних фаз, мощность и точность их очень невелики, в связи с чем они находят применение преимущественно для простейших защит, а также могут служить для определения поврежденного участка в разветвленных воздушных сетях 6 и 10 кВ. Магнитные ТТ являются по существу первичными трансреакторами.

В *трансреакторах* информация об измеряемом токе представлена вторичным напряжением, а не током, как в традиционных электромагнитных ТТ. Сопrotивление нагрузки выбирается настолько большим, что режим работы трансреактора близок к холостому ходу.

*Опτικο* – *электронные* устройства осуществляют преобразование входного электрического сигнала на потенциале провода линии в световой, передачу последнего по опτικο – волоконным световодам на потенциал земли и обратное преобразование его в электрический сигнал. Преобразователи этого типа обладают наименьшей инерционностью и практически не искажают передаваемый по оптическому каналу сигнал. Мощность его недостаточна для функционирования релейно – контактных аппаратов защиты и автоматики, зато такие устройства удачно сочетаются с современными электронными и микропроцессорными элементами.

Описанные выше преобразователи тока достаточно просты, недороги, имеют сравнительно малые габариты и массу, обеспечивают гальваническую развязку высоковольтной и измерительной цепей. Небольшая выходная мощность не препятствует применению их для релейной защиты на полупроводниковых элементах. Испытания этих аппаратов регламентируются документами предприятий – изготовителей.

В цепях постоянного тока, преимущественно сильноточных (например, в электролизном производстве), находят применение *трансформаторы постоянного тока*. Как и у ТТ переменного тока, первичная обмотка их включается в цепь измеряемого тока, вторичные же обмотки подключаются к источнику синусоидального напряжения последовательно с нагрузкой. Ток вторичной цепи будет пропорционален первичному, если сопротивление нагрузки намного меньше индуктивного сопротивления обмоток.

#### 4.12.2. Измерение сопротивления изоляции:

а) первичных обмоток. Производится мегаомметром на 2500 В. Сопротивление изоляции классов 3...35 кВ должно быть не менее 1000 МОм, 110 кВ – не менее 3000 МОм. При измерении выводы вторичных обмоток и цоколь ТТ должны быть объединены и заземлены (рис.4.14).

б) вторичных обмоток. Производится мегаомметром на 1000 В. Сопротивление изоляции обмоток относительно корпуса вместе с подключенными к ним цепями должно быть не менее 1 МОм, а при отключенных вторичных цепях – не менее 50 МОм.

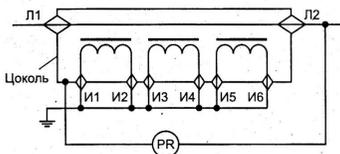


Рис.4.14. Измерение сопротивления основной изоляции трансформаторов тока

#### 4.12.3.4. Измерение $\text{tg } \delta$ изоляции.

Производится при напряжении 10 кВ у ТТ с бумажно-масляной изоляцией. Измеренные значения  $\text{tg } \delta$ , приведенные к температуре 20 °С, должны быть не более указанных в табл. 4.22.

Таблица 4.22

Предельные значения  $\text{tg } \delta$  основной изоляции трансформаторов тока

Тип изоляции	Значение $\text{tg } \delta$ %, изоляции на номинальное напряжение, кВ		
	3-15	20-35	110
Бумажно – бакелитовая	3,0	2,5	2,0
Основная бумажно- масляная	-	2,5	2,0

#### 4.12.4. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты:

а) изоляция первичных обмоток. Испытание является обязательным для ТТ с номинальным напряжением до 35 кВ. Значения испытательного напряжения см. в табл. 4.1, продолжительность приложения напряжения – 1 мин. Допускается проведение испытаний ТТ совместно с ошиновкой;

б) изоляция вторичных обмоток. Значения испытательного напряжения для изоляции вторичных обмоток вместе с присоединенными к ним цепями принимается равным 1 кВ, продолжительность приложения напряжения – 1 мин.

#### 4.12.5. Снятие характеристик намагничивания.

*Характеристика намагничивания* представляет собой зависимость максимальных значений индукции в магнитопроводе ТТ от действующего значения напряженности магнитного поля или, иначе говоря, зависимость ЭДС вторичной обмотки  $E_2$  от тока намагничивания  $I_{\text{нам.}}$ . Снятая характеристика сопоставляется с типовой или с характеристиками намагничивания однотипных исправных ТТ с одинаковым коэффициентом трансформации. При наличии ответвлений обмоток характеристики следует снимать на рабочем ответвлении.

Обычно снимают зависимость напряжения  $U_2$  на зажимах одной из вторичных обмоток ТТ от тока  $I_2$  в ней, называемую *вольт-амперной характеристикой* (ВАХ), при разомкнутой первичной обмотке и замкнутых остальных вторичных обмотках. Со-

гласно ПУЭ, ВАХ снимают повышением напряжения на обмотке до начала насыщения магнитопровода, но не выше 1800 В. На практике выше 1000 В напряжение не поднимают, а в большинстве случаев ограничиваются напряжением 380 В. При подаче напряжения на ответвление обмотки напряжение на всей обмотке не должно превышать 1800 В. Желательно провести снятие ВАХ до достижения номинального тока или, если это требуется для расчета погрешности при КЗ, до значения

$$I_2 = 0,1 I_{\text{КЗ макс}} / k_T,$$

где  $I_{\text{КЗ макс}}$  – расчетное значение максимального тока КЗ в первичной цепи ТТ;  $k_T$  – коэффициент трансформации ТТ.

Связь между величинами  $U_2$  и  $E_2$  определяется выражением

$$E_2 = U_2 - I_2 Z_2,$$

где  $Z_2$  – полное сопротивление вторичной обмотки.

Если сопротивление  $Z_2$  неизвестно, то при расчетах можно принимать следующие значения:  $Z_2 = R_2$  для ТТ с кольцевым сердечником и равномерно распределенной вторичной обмоткой и  $Z_2 = 1,25 R_2$  для ТТ других исполнений, где  $R_2$  – сопротивление обмотки постоянному току. Однако при наладке пересчет от  $U_2$  к  $E_2$  производят редко, так как в рабочем режиме они различаются несущественно, тем более, что ВАХ снимается преимущественно в целях сравнения. Например, у трансформатора тока типа ТПФ, класс 1, падение напряжения на обмотке с сопротивлением  $Z_2 = 0,3$  Ом при токе 1,1 А составляет всего 0,33 В и можно считать  $E_2 \approx U_2 = 65$  В (рис.4.15). В области насыщения различие становится заметным.

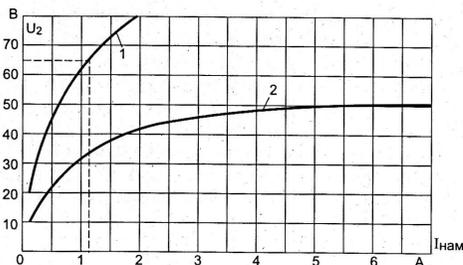


Рис.4.15. Вольт-амперные характеристики трансформатора тока типа ТПФ, 200/5: 1 – сердечник первого класса; 2 – сердечник третьего класса

По вольт-амперным характеристикам можно судить об исправности ТТ, соответствии класса сердечника его обозначению, а также о возможности использования ТТ в различных схемах релейной защиты. В частности, при сравнении ВАХ выявляется наиболее распространенная и опасная неисправность – короткое замыкание витков вторичной обмотки, даже одного из них: при витковом замыкании характеристика проходит значительно ниже типовой (рис.4.16). Если снижение превышает 20%, включать такой ТТ в эксплуатацию без дополнительной проверки не рекомендуется.

Дополнительную проверку можно осуществить, включив во вторичную цепь резистор сопротивлением  $(10...30) Z_{2ном}$  и подавая в первичную цепь ток  $I_1$ : резкое уменьшение тока  $I_2$  против ожидаемого значения  $I_1/k$ , будет свидетельствовать о витковом замыкании. Если снятая ВАХ располагается ниже типовых на 40...50% и более, трансформатор безусловно бракуется. ВАХ желательно строить по 8...10 точкам; допускается снятие только трех контрольных точек.

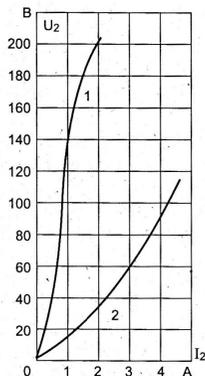


Рис.4.16. Вольт-амперные характеристики ТТ: 1- исправного; 2 – неисправного

Как известно, цепи со сталью нелинейны, и при синусоидальном напряжении питания искажается форма кривой тока в цепи, а при синусоидальном токе – форма кривой напряжения. Чтобы можно было сравнивать снятые характеристики с типовыми, напряжение, подаваемое на испытываемую обмотку ТТ, должно иметь синусоидальную форму. Поэтому для питания схемы используют линейное напряжение сети, не содержащее высших гармонических, а измерения производят приборами, реагирующими на среднее значение напряжения и действующее значение тока. Переход от среднего значения синусоидального сигнала к действующему осуществляется умножением на коэффициент  $1,11$ . Применительно к аналоговым (стрелочным) приборам это означает, что для измерения напряжения следует использовать приборы выпрямительной (детекторной) системы, для измерения тока – приборы электромагнитной или электродинамической системы. При этом следует учитывать, что стрелочные вольтметры имеют значительное собственное потребление, в связи с чем при малых токах нагрузки их следует включать до амперметра. Так, например, у мощных ТТ высокого класса точности, с большим объемом сердечника и особенно с номинальным вторичным током 1 А ток намагничивания может составлять всего несколько десятков миллиампер, тогда как у маломощных ТТ невысокого класса точности он достигает нескольких ампер, и в этом последнем случае потребление вольтметра особого значения не имеет. Надо еще помнить, что ряд приборов, реагирующих на среднее значение измеряемой величины, градуируются тем не менее на ее действующее значение, и тогда умножение на  $1,11$  не требуется.

Для регулирования напряжения применяют обычно схемы с одним или двумя автотрансформаторами (типа ЛАТР), практически не искажающими кривую напряже-

ния (рис. 4.17). Схема с одним ЛАТРОм обеспечивает регулирование напряжения в пределах от 0 до 250 В, с двумя – до 450 В. Схемы с добавочными реостатами или потенциометрами применять не рекомендуется.

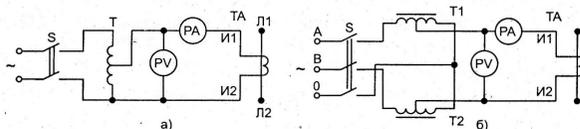


Рис.4.17. Снятие характеристики намагничивания при помощи одного (а) и двух (б) автотрансформаторов

Получить большие значения напряжения можно с помощью повышающих трансформаторов, например, типа НОМ. Если такой трансформатор отсутствует или его применение почему-либо затруднено, можно снять ВАХ, подавая ток от нагрузочного трансформатора в первичную обмотку и измеряя напряжение на вторичной обмотке ТТ. Это особенно удобно у ТТ с вторичным током 1 А, для которых при снятии ВАХ на вторичную обмотку требуется подавать напряжение свыше 1000 В.

Некоторые фирмы вместо кривой намагничивания приводят значения тока и напряжения только в одной контрольной точке, как, например, данные в табл. 4.23, дающие представление о возможном диапазоне этих значений.

Таблица 4.23

Контрольные точки вольт-амперной характеристики встроенных (ТВТ) и выносных (ТФЗМ) трансформаторов тока

Тип трансформатора	Напряжение, В	Ток намагничивания, мА, не более
ТВТ10-1-5000/5	126	32
ТВТ10-1-12000/5	800	18
ТВТ35-1-300/5	50	10900
ТВТ35-1-3000/1	1113	11
ТВТ110-1-300/5	126	2240
ТВТ110-1-1000/1	1035	38
ТФЗМ-35А-15-600/5	183	1953
ТФЗМ-35Б-11-3000/1	1054	206
ТФЗМ-110Б-50-600/5	156	2267

У литых трансформаторов типа ТОЛ-10 измерение тока намагничивания производят при следующих значениях напряжения (если иное не оговорено в фирменных документах): 35 В при номинальном токе ТТ от 5 до 300 А; 37, 40, 42 и 47 В при токах соответственно 400...600, 800, 1000 и 1500 А. Значение тока намагничивания в указанных точках должно быть не более 4 А, фактически оно бывает гораздо меньше.

#### 4.12.6. Проверка полярности выводов трансформатора тока.

Производится при монтаже, если отсутствуют паспортные данные, четкая маркировка выводов ТТ или возникают сомнения в ее достоверности. Полярность обмоток ТТ должна соответствовать выполненной маркировке. Однополярными у ТТ являются выводы Л1 и И1 («начало»), Л2 и И2 («конец»); это означает, что при направлении тока в первичной цепи от Л1 к Л2 вторичный ток должен проходить по внешней цепи от И1 к И2. Методика проверки аналогична описанной выше (4.11.5) и иллюстрируется рис.4.18. Дополнительный резистор R введен здесь для ограничения разрядного тока батареи GB. Если чувствительность прибора PG окажется слишком высокой, ее можно уменьшить, зашунтировав прибор отрезком провода. Следует иметь в виду, что при размыкании контакта SF на зажимах вторичных обмоток мощных ТТ, особенно на номинальный ток 1 А, может возникнуть ЭДС, достигающая опасных значений.

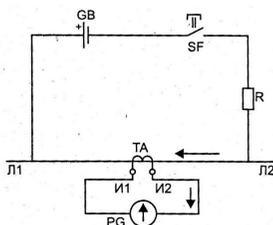


Рис.4.18. Принципиальная схема проверки полярности обмоток трансформатора тока

У встроенных ТТ вывод Л1 должен располагаться со стороны, обозначаемой как «верх» (рис.4.19). Эта особенность требует обязательной проверки в связи с тем, что ТТ, не имеющие маркировки, могут быть произвольно установлены при монтаже, а на вводах выключателя располагаться в обратном порядке. Для определения выводов Л1 («верх») и Л2 («низ») встроенного ТТ через окно его продевается провод, используемый в качестве первичной обмотки, Источник тока GB подключается к нему зажимом «+» со стороны «верх» ТТ, зажимом «-» – с противоположной стороны, прибор PG зажимом «+» к выводу И1, зажимом «-» – к рабочему ответвлению И2, И3 и др. Если маркировка ТТ выполнена правильно, то при нажатии кнопки SF стрелка прибора отклонится вправо (или высветится положительное число на табло цифрового прибора); большему числу витков ответвления будет соответствовать большее отклонение стрелки. Необходимо проявлять осторожность при отпускании кнопки, когда может возникнуть опасный бросок напряжения на выводах ТТ, особенно с номинальным вторичным током 1 А.

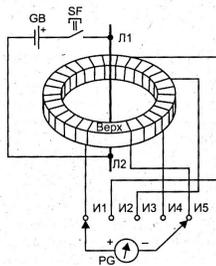


Рис.4.19. Схема проверки полярности обмоток встроенного трансформатора тока

При установке ТТ на выключатель для определения сторон «верх» и «низ» ориентируются на расположение заводской таблицы параметров. После окончания монтажа проверяют правильность установки ТТ и коммутации токовых цепей от выводов вторичной обмотки ТТ до клеммной сборки. С этой целью «+» батареи подключают поочередно к вводам выключателя снаружи, а «-» к неподвижному контакту данного ввода внутри бака; прибор подключается к выводам вторичных обмоток на клеммной сборке. При проверке ТТ, установленных на вводах силовых трансформаторов, первичной обмоткой может служить проводящий стержень, который опускают в окно ТТ до упора в дно корпуса; «+» батареи подключают к верхнему концу стержня, «-» – к корпусу ТТ.

#### 4.12.7. Измерение коэффициента трансформации.

Отклонение измеренного значения коэффициента от паспортного или от известного для однотипного трансформатора не должно превышать 2%. Проверку производят с помощью нагрузочного устройства (рис.4.20), по возможности совмещая ее для экономии времени с прогрузкой токовых защит.

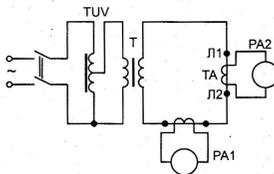


Рис. 4.20. Схема измерения коэффициента трансформации: ТТ – проверяемый трансформатор тока; TUV – автотрансформатор; Т – нагрузочный трансформатор; PA1, PA2 – амперметры

Значение первичного тока принимают обычно в пределах  $(0,1 \dots 0,25) I_{ном}$ . В качестве автотрансформатора применяют ЛАТР. Мощность нагрузочного трансформатора до 1 кВ·А в большинстве случаев бывает достаточной; при первичном токе до 100...200 А может быть использован широко распространенный малогабаритный «котельный» трансформатор с номинальным вторичным напряжением 12 В. Для измерения первичного тока удобно использовать токоизмерительные клещи. При проверке встроенных ТТ можно воспользоваться металлическим стержнем, пропущен-

ным через верхнее окно. Если ТТ имеет несколько вторичных обмоток, каждая из них должна быть замкнута.

Коэффициент трансформации ТТ с первичной обмоткой на магнитопроводе может быть проверен также путем измерения не токов, а напряжений. Для этого на вторичную обмотку подают напряжение  $U_2$ , измеряют напряжение на первичной обмотке  $U_1$  и определяют коэффициент трансформации как отношение  $U_2/U_1$ . Поскольку напряжение  $U_2$  обычно выбирают не выше 220 В, напряжение  $U_1$  мало и должно измеряться вольтметром, обеспечивающим достаточную точность на нижних пределах.

При проверке ответвлений вторичной обмотки, обозначения которых отсутствуют, напряжение подается на любые два вывода и определяется та пара выводов, напряжение на которой будет наибольшим, то есть конечные выводы И1 – И5. Далее напряжение подается на эти выводы и измеряется напряжение на других ответвлениях с тем, чтобы убедиться, что большего напряжения нет. Если из паспорта известно максимальное число витков обмотки, то на конечные выводы удобно подать напряжение, значение которого пропорционально или равно этому числу, например, 1 В на 1 виток. Затем измеряют напряжение между каждым конечным выводом и другими выводами: наименьшее значение напряжения соответствует наименьшему коэффициенту трансформации по току. При производстве испытаний первичная обмотка должна быть разомкнута.

Следует иметь в виду, что с целью компенсации токовой погрешности реальное число витков вторичной обмотки ТТ может быть меньше, чем рассчитанное по номинальному коэффициенту трансформации. В качестве примера на рис.4.21 приведены обмоточные данные, а в табл.4.24 – результаты измерения напряжения на разных ответвлениях ТТ при подаче на зажимы И1 – И5 напряжения, равного числу витков всей обмотки.



Рис.4.21. Обмоточные данные встроенного ТТ с коэффициентом трансформации (наибольшим) 600/5

Таблица 4.24

Измерение напряжения на ответвлениях обмотки встроенного трансформатора тока

Выводы обмотки	Число витков	Измеренное напряжение, В	Коэффициент трансформации
И1 – И2	36	36	200/5
И1 – И3	57	57	300/5
И1 – И4	78	78	400/5
И1 – И5	119	120	600/5
И4 – И5	41	42	–

#### 4.12.8. Измерение сопротивления вторичных обмоток постоянному току.

Является обязательным для ТТ на напряжение 110 кВ и выше. Отклонение измеренного сопротивления от паспортного или сопротивления обмоток других фаз не должно превышать 2% при одной и той же температуре.

Используются приборы класса 0,5; измерение сопротивления до 1 Ом производится по схеме двойного моста.

### 4.13. Изоляторы.

#### 4.13.1. Общие сведения.

Конструктивно и по назначению изоляторы подразделяются на штыревые, подвесные, опорные и проходные. Для фарфоровых изоляторов наружной установки ГОСТ нормирует необходимую длину пути утечки применительно к степени загрязнения (от I до IV): удельная длина пути утечки внешней изоляции должна составлять не менее чем 1,6 для I и 3,1 см/кВ для IV степени.

*Штыревые* изоляторы состоят из одного или двух фарфоровых элементов и армируются на металлических штырях, закрепляемых в траверсах опор. Все штыревые изоляторы обеспечивают жесткое крепление проводов на опорах.

*Линейные подвесные* изоляторы обеспечивают нежесткую связь проводов с опорами ЛЭП. Тарельчатые подвесные изоляторы соединяются в гирлянды. Кроме тарельчатых, находят применение стержневые линейные изоляторы, позволяющие повысить электрическую прочность благодаря тому, что они не подвержены пробою.

*Опорные* изоляторы служат для поддержания шин и контактных деталей РУ и электрических аппаратов. Опорно – штыревые изоляторы состоят из одного, двух или трех фарфоровых элементов, жестко соединенных друг с другом и закрепленных на чугунном штыре. Применяются в качестве изоляционных опор в ОРУ, в связи с чем имеют выступающие крылья для защиты от атмосферных осадков. Опорно-стержневые изоляторы тоже предназначены для работы в наружных установках. Такой изолятор представляет собой сплошной фарфоровый стержень с выступающими крыльями, на торцевых частях которого закреплены чугунные колпаки для соединения изоляторов в колонки и для крепления их на отдельных аппаратах и в РУ.

*Проходные* изоляторы применяются для вывода проводников ВН из баков трансформаторов, масляных и воздушных выключателей, а также для изоляции проводов, проходящих сквозь стены и перекрытия зданий. Изолятор состоит из фарфорового элемента, через внутреннюю полость которого проходит токоведущий металлический стержень или группа шин.

Разновидностью проходных изоляторов являются *вводы*. Токоведущей частью ввода служит медная труба; основная внутренняя изоляция – керамическая, жидкая или бумажно-масляная, из бакелита и других твердых материалов. Основу ввода с бумажно – масляной изоляцией составляет остов из кабельной бумаги, намотанной на токоведущую трубу; у вводов с конденсаторной изоляцией бумага чередуется с несколькими слоями металлической фольги. Вводы с твердой изоляцией для силовых трансформаторов 110 кВ содержат намотанную на трубу лакированную бумагу со слоевыми графитовыми прокладками. Две фарфоровые крышки, верхняя и нижняя, герметично соединены между собой с помощью металлического фланца (втулки).

Для отбора напряжения и контроля изоляции ввода предусмотрены специальные измерительные выводы. Отдельные конструкции вводов оборудуются потенциометрическим устройством и изолированными выводами для подключения прибора измерения напряжения (ПИН), наличие которого указывается в условном обозначении ввода буквой П. ПИН подключается к конденсаторной обкладке, нанесенной на предпоследний цилиндр изоляционного остова (вывод ПИН). Вывод ПИН называют еще «тангенсным», так как он используется и для измерения  $\text{tg } \delta$  основной изоляции ввода.

Эквивалентная электрическая схема изоляционной конструкции ввода может быть представлена в виде нескольких последовательно соединенных конденсаторов (рис. 4.22). Емкость  $C_1$  между токоведущим стержнем (ВН) и измерительным выводом соответствует основной изоляции остова ввода, емкость  $C_2$  – зоне изоляции между соединительной втулкой – фланцем и измерительным выводом (ИВ) (предпоследней обкладкой), а емкость  $C_3$  между последней обкладкой остова и соединительной втулкой (СВ) – наружным слоям изоляции. При этом рассматриваются лишь зоны изоляции, которые снабжены выводами (ВН, СВ, ИВ).

Отношение значений  $C_2/C_1$  нормируется в зависимости от класса изоляции ввода и для 110 кВ, например, равно 16. Ориентировочно значение основной емкости  $C_1$  у трансформаторных вводов на 110 кВ с бумажно-масляной изоляцией составляет 200...400 пФ, у вводов для масляных выключателей 340...500 пФ. Значения емкости  $C_3$  не нормируются и могут колебаться в широких пределах от нескольких сотен до нескольких тысяч пикофард.

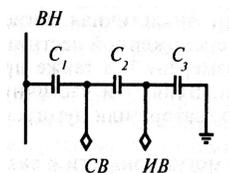


Рис. 4.22. Эквивалентная электрическая схема замещения изоляции ввода

### 4.13.2. Испытание вводов и проходных изоляторов.

#### 4.13.2.1. Внешний осмотр.

При внешнем осмотре проверяются:

- армировочные швы – на отсутствие трещин и выкрашиваний, через которые может проникнуть наружу заливочная масса ввода;
- нижняя часть конденсаторной втулки – на отсутствие царапин и повреждений лакового покрова;
- фарфоровая крышка – на отсутствие трещин и сколов.

#### 4.13.2.2. Измерение сопротивления изоляции.

Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ у вводов с бумажно-масляной изоляцией. Измеряется сопротивление изоляции измерительной и последней обкла-

док вводов относительно соединительной втулки. Сопротивление изоляции должно быть не менее 1000 МОм.

#### 4.13.2.3. Измерение $\text{tg } \delta$ и емкости изоляции.

Измеряются  $\text{tg } \delta$  и емкость изоляции:

- основной изоляции вводов при напряжении 10 кВ;
- изоляции измерительного конденсатора ПИН ( $C_2$ ) и/или последних слоев изоляции ( $C_3$ ) при напряжении 5 кВ.

Предельные значения  $\text{tg } \delta$  приведены в табл. 4.25.

Предельное увеличение емкости основной изоляции составляет 5% относительно измеренной на заводе – изготовителе.

Нормируются значения  $\text{tg } \delta$ , приведенные к температуре 20 °С в соответствии с инструкцией по эксплуатации ввода.

Испытание производится в вертикальном положении ввода. Соединительная втулка заземляется, а измерительный вывод от нее отсоединяется. Перед измерениями поверхность ввода и измерительный вывод тщательно очищаются и насухо вытираются.

Таблица 4.25

Предельные значения  $\text{tg } \delta$  для вводов, %

Тип и зона изоляции ввода	Номинальное напряжение ввода, кВ	
	35	110
Бумажно-масляная изоляция: основная изоляция ( $C_1$ ) и изоляция конденсатора ПИН ( $C_2$ ); последние слои изоляции ввода ( $C_3$ )	- -	0,7/1,5 1,2/3,0
Твердая изоляция ввода с масляным заполнением, основная изоляция ( $C_1$ )	1,0/1,5	1,0/1,5
Бумажно-бакелитовая изоляция ввода с мастичным заполнением: основная изоляция ( $C_1$ )	3,0/9,0	–

*Примечание:* В числителе дроби указаны значения  $\text{tg } \delta$  для вновь сооружаемых электроустановок (ПУЭ), в знаменателе – для действующих (ПТЭЭП)

#### 4.13.2.4. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты.

Испытание является обязательным для вводов и проходных изоляторов на напряжение до 35 кВ.

Испытательное напряжение для вводов и проходных изоляторов, испытываемых отдельно или после установки в РУ, принимается согласно табл. 4.26, продолжительность приложения напряжения 1 мин.

Испытание вводов, установленных на силовых трансформаторах, производится совместно с испытанием обмоток по нормам табл. 3.5.

Ввод считается выдержавшим испытание, если при этом не наблюдалось пробоя, перекрытия, скользящих разрядов и частичных разрядов в масле, выделения газа или местного перегрева изоляции.

Таблица 4.26

Испытательное напряжение промышленной частоты вводов и проходных изоляторов

Номинальное напряжение, кВ	Испытательное напряжение, кВ		
	керамические изоляторы, испытываемые отдельно	аппаратные вводы и проходные изоляторы с основной керамической или жидкой изоляцией	аппаратные вводы и проходные изоляторы с основной бакелитовой изоляцией
3	25	24	21,6
6	32	32	28,8
10	42	42	37,8
15	57	55	49,5
20	68	65	58,5
35	100	95	85,5

#### 4.13.3 Подвесные и опорные изоляторы.

Для опорно-стержневых изоляторов испытание повышенным напряжением не обязательно. Контроль состояния стеклянных подвесных изоляторов осуществляется путем внешнего осмотра.

##### 4.13.3.1. Измерение сопротивления изоляции подвесных и многоэлементных изоляторов.

Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ только при положительных температурах окружающего воздуха, непосредственно перед установкой изоляторов в РУ и на ЛЭП. Сопротивление изоляции каждого подвесного фарфорового изолятора или каждого элемента штыревого изолятора должно быть не менее 300 МОм.

##### 4.13.3.2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты:

- опорных одноэлементных изоляторов (табл. 4.27);
- опорных многоэлементных и подвесных изоляторов. Вновь устанавливаемые штыревые и подвесные изоляторы следует испытывать напряжением 50 кВ, приложенным к каждому элементу в течение 1 мин. Допускается не производить испытания подвесных изоляторов.

Таблица 4.27

Испытательное напряжение опорных одноэлементных изоляторов

Испытуемые изоляторы	Испытательное напряжение, кВ, при номинальном напряжении электроустановки, кВ					
	3	6	10	15	20	35
Изоляторы, испытываемые отдельно	25	32	42	57	68	100
Изоляторы, установленные в цепях шин и аппаратов	24	32	42	55	65	95

#### 4.14. Шины и токопроводы.

##### 4.14.1. Сборные и соединительные шины.

###### 4.14.1.1. Испытание изоляции повышенным напряжением промышленной частоты.

Испытание производится по нормам табл. 4.28 в продолжение 1 мин.

Таблица 4.28

Испытательное напряжение промышленной частоты изоляции токопроводов

Класс напряжения, кВ	Испытательное напряжение, кВ, токопроводов с изоляцией	
	фарфоровой	смешанной (керамической и из твердых органических материалов)
6	32	28,8
10	42	37,8
15	55	49,5
35	95	85,5

###### 4.14.1.2. Проверка качества выполнения контактных соединений.

Измеряется переходное сопротивление выборочно на 2...3% *болтовых* контактных соединений. Соединения на ток свыше 1000 А рекомендуется проверять в полном объеме. При измерении падения напряжения в качестве источника тока можно использовать нагрузочный или сварочный трансформатор, сопротивление постоянному току измеряют двойным мостом, микроомметром.

Падение напряжения или сопротивление на участке шины (0,7...0,8 м) в месте контактного соединения не должно превышать падения напряжения или сопротивления такого же участка без соединения более чем в 1,2 раза.

Выборочно проверяется переходное сопротивление 3...5% *опрессованных* контактных соединений. Падение напряжения или сопротивление участка с соединением не должно превышать падения напряжения или сопротивления на таком же участке провода более чем в 2 раза. Участок непрерывного проводника рекомендуется выбирать на расстоянии не менее 1 м от места соединения.

Качество *сварных* контактных соединений оценивается визуально.

##### 4.14.2. Комплектные токопроводы.

###### 4.14.2.1. Общие сведения.

*Токопроводом* называется устройство, предназначенное для передачи и распределения электроэнергии, состоящее из изолированных или неизолированных проводников и относящегося к ним оборудования. В зависимости от вида проводников токопроводы подразделяются на гибкие (при использовании проводов) и жесткие (при использовании жестких шин).

В электроустановках потребителей широко распространены токопроводы на напряжение 6-10 кВ и номинальный ток до 3200 А. Условные обозначения токопровода отражают особенности его конструкции, например: ТКЗР – токопровод закрытый, с общим круглым кожухом с разделительными перегородками; ТЗМЭП – с многоугольным кожухом, пофазно экранированный; ТЭН – токопровод экранированный непрерывный.

Заземление оболочки токопроводов с непрерывными экранами производится в одной точке, как правило, со стороны источника питания. Станины (опоры) токопровода изолируются от несущих металлоконструкций посредством изоляционных прокладок, перемежающихся металлическими. Используются также токопроводы (например, серии КЭТ), оболочка которых состоит из ряда отдельных секций, изолированных друг от друга резиновыми прокладками. Чтобы избежать образования короткозамкнутых контуров, которые могут привести к местным перегревам и даже авариям, каждая изолированная секция заземляется только в одной точке. Для проверки изоляционных конструкций необходимо предварительно отсоединить секции от контура заземления. Путем осмотра следует убедиться в отсутствии металлической связи между оболочкой и корпусом питающего трансформатора.

#### ***4.14.2.2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты.***

Испытание токопровода с общим для всех трех фаз кожухом производится пофазно при двух других заземленных фазах. На токопроводах из отдельных экранированных фаз испытание можно проводить одновременно для всех фаз относительно кожуха, если это позволяет мощность испытательной установки. Объем и нормы испытаний оборудования, присоединенного к токопроводу, приведены выше в соответствующих разделах. Испытательное напряжение токопровода при отсоединенных обмотках силовых и измерительных трансформаторов напряжения устанавливается согласно табл. 4.28. На случай пробоя или перекрытия изоляции должно быть обеспечено автоматическое отключение испытательной установки без выдержки времени.

Необходимая мощность испытательного трансформатора может быть подсчитана согласно п.2.4.5.2. Емкость комплектных токопроводов значительна, она определяется протяженностью и удельной емкостью токопровода, которая, в свою очередь, зависит от его типа и номинального тока. Во всяком случае для испытания токопроводов в РУ 6-10 кВ при номинальном токе до 3150 А и длине до 100 м мощность трансформатора 5 кВ·А можно считать достаточной.

Место подключения испытательной установки к токопроводу выбирается исходя из удобства сборки схемы. Если изоляционные расстояния в местах подсоединения токопроводов к трансформаторам малы, между выводами трансформатора и шинами токопровода устанавливают изолирующие прокладки.

При вводе в эксплуатацию новых токопроводов наиболее трудоемкой операцией является обнаружение дефектных изоляторов. Целесообразно выполнить ее путем разряда предварительно заряженного конденсатора через искровой разрядник на изоляцию токопровода. Дефектный изолятор при этом разрушается. Емкость конденсатора (батареи конденсаторов) выбирают не менее 5 мкФ, пробивное напряжение разрядника – на 5 кВ ниже напряжения заряда конденсатора (до 30 кВ).

#### **4.14.2.3. Проверка состояния изоляции.**

Измерение сопротивления изоляции токопроводов всех исполнений проводится мегаомметром на 2,5 кВ для каждой фазы относительно двух других заземленных. При резком (в 2 ... 3 раза) отличии сопротивлений различных фаз следует выявить причины ухудшения изоляции и устранить их.

У токопроводов, оболочки которых изолированы от опорных металлоконструкций, проверяется состояние изоляционных прокладок. Проверка целостности последних осуществляется путем сравнительных измерений падения напряжения на изоляционных прокладках секции фазы или измерения тока, проходящего в металлоконструкциях между станинами секций.

### **4.15. Конденсаторы.**

#### **4.15.1. Общие сведения.**

Силовые *косинусные* конденсаторы применяются для повышения коэффициента мощности  $\cos \varphi$  электроустановок, а также для продольной компенсации реактивного сопротивления дальних ЛЭП. Конденсаторы *связи* обеспечивают высокочастотную связь по высоковольтным ЛЭП промышленной частоты. Они отделяют аппаратуру связи от высокого напряжения и подключаются одним выводом к проводам ЛЭП, другим – через высокочастотный автотрансформатор к земле. Конденсаторы *отбора мощности* служат для питания электрооборудования и измерительной аппаратуры на промышленной частоте. *Делительные* конденсаторы предназначены для выравнивания напряжения по разрывам дугогасительных камер высоковольтных выключателей. Конденсаторы для *защиты от перенапряжений* рассчитаны на высокие кратности грозовых и коммутационных перенапряжений; могут использоваться совместно с ОПН.

Силовые конденсаторы для повышения коэффициента мощности (косинусные) имеют буквенные обозначения: К – косинусные, М или С – с пропиткой минеральным маслом или синтетическими жидкостями (КМ или КС), в обозначении конденсаторов для установок продольной компенсации содержится буква П (например, КСП). Конденсаторы допускают работу при длительном повышении напряжения до 110% и перегрузках по току до 130% номинального значения. Секции конденсаторных батарей на 3,15 кВ снабжены плавкими предохранителями, включенными последовательно с каждой секцией. Защита конденсаторов 6 – 10 кВ осуществляется выносными предохранителями (типа ПК).

#### **4.15.2. Измерение сопротивления изоляции.**

Сопротивление изоляции бумажно – масляных конденсаторов (косинусных, связи, отбора мощности) измеряется относительно корпуса и между выводами конденсатора мегаомметром на 2,5 кВ. У трехфазных конденсаторов измерение производится поочередно между каждым выводом и двумя другими, соединенными с корпусом. У конденсаторов связи и отбора мощности измеряется сопротивление изоляции между фланцами конденсатора.

Отличительной особенностью конденсаторов, особенно косинусных, является длительное удержание заряда, создающее опасность электропоражения работающих.

Поэтому перед присоединением к мегаомметру проверяемый конденсатор необходимо предварительно **разрядить** путем соединения его выводов с землей.

### 4.15.3. Измерение емкости.

Производится при температуре 15...35 °С. Измеренное значение емкости должно соответствовать паспортным данным с учетом погрешности измерения и приведенных в табл.4.29 допусков.

Таблица 4.29

Допустимое отклонение емкости конденсаторов от паспортного значения

Наименование или назначение конденсатора	Допустимое отклонение, %
Конденсаторы для повышения коэффициента мощности и для защиты от перенапряжения	± 5
Конденсаторы продольной компенсации	+ 5
	- 10
Конденсаторы связи, отбора мощности и делительные	± 5

Измерение производят методом амперметра – вольтметра или с помощью двух вольтметров (рис. 4.23).

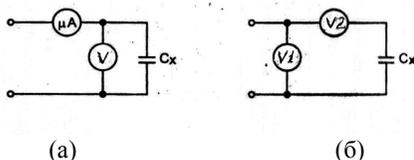


Рис.4.23. Схемы измерения емкости: *a* – методом амперметра-вольтметра; *б* – с помощью двух вольтметров

Расчет емкости производится по формулам:

при использовании метода амперметра-вольтметра (рис. 4.23 *a*)

$$C = 10^6 I / \omega U;$$

при помощи двух вольтметров (рис.4.23, *б*)

$$C = 10^6 / \omega R_2 \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $C$  – измеряемая емкость, мкФ;  $I$  – ток через конденсатор, А;  $\omega$  – угловая частота, 1/с;  $U$  – приложенное напряжение, В;  $R_2$  – эквивалентное сопротивление вольтметра  $V_2$  как элемента цепи, Ом;  $\varphi$  – фазный угол цепи  $R_2 - C$ .

Если пренебречь утечкой тока в конденсаторе, то можно воспользоваться показаниями вольтметров и записать

$$\cos \varphi = U_2 / U_1,$$

откуда нетрудно найти  $\operatorname{tg} \varphi$  по таблицам или вычислить

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} = \sqrt{(U_1 / U_2)^2 - 1}.$$

Измерения по схеме рис. 4.23 рекомендуется производить при напряжении 110...220 В промышленной частоты (номинальное значение  $\omega = 314$  1/с). Возможно также определение емкости косинусных конденсаторов мостами переменного тока и цифровыми мультиметрами.

#### 4.15.4. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь.

Измерение производится на конденсаторах связи, отбора мощности и делительных конденсаторах. Измеренные значения  $\operatorname{tg} \delta$  не должны превышать 0,3% (при температуре 20 °С).

До монтажа измерение рекомендуется производить по перевернутой схеме моста с целью уменьшения трудозатрат. То же относится и к измерению  $\operatorname{tg} \delta$  (и емкости) нижних и верхних элементов собранных конденсаторов связи и делителей напряжения (в этом случае не требуется демонтировать соединения с землей нижнего элемента и ошиновки на стороне ВН). Измерение  $\operatorname{tg} \delta$  (и емкости) средних элементов конденсаторов связи, делителей напряжения и конденсаторов отбора мощности рекомендуется производить по нормальной схеме моста.

#### 4.15.5. Испытание повышенным напряжением.

Испытывается изоляция относительно корпуса при закороченных выводах конденсатора. Значения и продолжительность приложения испытательного напряжения для различных конденсаторов регламентируются заводскими инструкциями, некоторые данные приводятся в табл. 4.30; конденсаторы связи, отбора мощности и делительные повышенным напряжением не испытываются.

Таблица 4.30

Испытательные напряжения промышленной частоты для конденсаторов

Назначение (тип) конденсаторов	Испытательное напряжение, кВ
Косинусные с номинальным напряжением, кВ	
1,05	4,3
3,15	15,8
6,3	22,3
10,5	30,0
Для защиты от перенапряжения	
СММ-20/3-0,107	22,5
КМ2-10,5-24	22,5 – 25,0

Испытания напряжением промышленной частоты могут быть заменены одноминутным испытанием выпрямленным напряжением удвоенного значения по отношению к действующим значениям испытательного напряжения, указанным в табл. 4.30.

#### **4.15.6. Испытание батареи конденсаторов трехкратным включением.**

Конденсаторы для повышения коэффициента мощности, для защиты от перенапряжений и конденсаторы продольной компенсации испытываются включением на номинальное напряжение с контролем токов по каждой фазе. Значения токов в различных фазах должны отличаться одно от другого не более чем на 5%.

#### **4.16. Комплектные распределительные устройства внутренней и наружной установки.**

##### **4.16.1. Общие сведения.**

Основой ячейки КРУ является стальной каркас, в котором крепится входящее в нее электрооборудование. Ячейка разбита на отсеки с тем, чтобы возможные повреждения в одном из них не нарушали работу других. Выпускаются КРУ с металлическими перегородками между отсеками, с диэлектрическими перегородками или без перегородок. Электрические аппараты КРУ выбираются и монтируются с учетом специфических условий их работы.

- В связи с ограниченными размерами ячейки и требованиями техники безопасности применяются маломасляные, электромагнитные, элегазовые и вакуумные выключатели, а также малогабаритные разрядники и предохранители.

- Используются измерительные трансформаторы с литой изоляцией.

- Разъединители механически связываются с выключателем, установленным на тележке, при выкатывании которой из КРУ контакты разъединителя размыкаются, а на концы выходного кабеля накладывается заземление; выкатывание тележки возможно только при отключенном выключателе.

Выкатная тележка может занимать три фиксированных положения. В рабочем положении разъединители включены, главные и вспомогательные цепи замкнуты; в контрольном – разъединители отключены, главные цепи разомкнуты, но цепи управления остаются включенными, и в ремонтном, когда тележка находится вне шкафа и все электрические цепи обесточены. При выкатывании тележки проемы к неподвижным разъемным контактам главной цепи автоматически закрываются защитными шторками. В контрольном положении можно проверять работу аппаратов КРУ под рабочим напряжением.

Наиболее существенные особенности КРУ определяются выбором высоковольтных выключателей и изоляции токоведущих элементов. Считают, что 40...60% выпускаемых КРУ должны оснащаться вакуумными выключателями, ресурс которых составляет  $10^4$  отключений номинального тока, а некоторые зарубежные фирмы полностью перешли на комплектацию КРУ этими выключателями.

В качестве электроизоляции токоведущих элементов применяются воздух и элегаз. Применение элегаза позволяет уменьшить ширину ячеек в 2...3 раза, а площадь, занимаемую КРУ, в 10 раз и более. В элегазовых КРУ (КРУЭ) основное оборудование заключено в герметичные оболочки, заполненные элегазом, который используется в них и как изолирующая, и как дугогасящая среда. Выпускаются также конструкции с полностью литыми изолированными блоками.

Токосоведущие части КРУ выполняются преимущественно шинами из алюминия или его сплавов, при больших токах допускается применение медных шин, а при номинальном токе до 200 А – стальных. Сборные шины соединяют отдельные камеры,

линейные размещаются внутри ячейки. Монтаж вторичной коммутации производится изолированным медным проводом сечением не менее  $1,5 \text{ мм}^2$  для вспомогательных цепей и  $2,5 \text{ мм}^2$  – для присоединений к счетчикам. Соединения, подвергающиеся изгибам и кручениям, выполняются многожильными проводами, а связь стационарной части КРУ с выдвигной – с помощью разъемных контактов и штепсельных разъемов.

При возникновении электрической дуги между шинами электродинамическая сила перемещает ее со скоростью сотни метров в секунду, что может вызвать серьезные разрушения в КРУ. Поэтому камеры оснащаются быстродействующими дуговыми защитами. Для контроля светового потока, создаваемого дугой, в них используются оптико – электронные датчики на основе фотодиодов, фототиристоров, фоторезисторов, волоконно-оптические элементы. Типовые реле защиты строятся на микроэлектронной и микропроцессорной базе с рабочим и тормозным фотодатчиками. Последние ориентированы в сторону смежной ячейки и при КЗ в ней предотвращают срабатывание фотодатчиков защищаемой ячейки. С целью повышения надежности осуществляется контроль не только светового потока, но и по крайней мере еще одного признака, характеризующего дуговое КЗ, – тока или напряжения. Эти защиты обладают высокой чувствительностью и селективностью, их быстродействие – единицы или десятки миллисекунд. Выходной сигнал дуговой защиты поступает на привод короткозамыкателя, срабатывание которого обеспечивает заземление сборных шин и резко ограничивает время горения дуги.

Горение дуги сопровождается повышением давления внутри ячейки. Поэтому в конструкциях КРУ предусматриваются предохранительные клапаны, которые открываются и ограничивают давление в случае его повышения.

#### **4.16.2. Испытания и измерения.**

##### ***4.16.2.1. Измерение сопротивления изоляции:***

Измерение сопротивления изоляции: а) первичных цепей. Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ. Сопротивление изоляции полностью собранных первичных цепей КРУ с установленными в них узлами и деталями, которые могут оказать влияние на результаты измерения, должно быть не менее 100 МОм.

При неудовлетворительных результатах измерение производится поэлементно, при этом сопротивление изоляции каждого элемента должно быть не менее 1000 МОм;

б) вторичных цепей. Производится мегаомметром на напряжение 0,5 – 1 кВ. Сопротивление изоляции каждого присоединения вторичных цепей вместе со всеми присоединенными аппаратами (реле, приборами, обмотками измерительных трансформаторов и т.п.) должно быть не менее 0,5 МОм.

##### ***4.16.2.2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты:***

а) изоляции первичных цепей ячеек КРУ и КРУН. Испытательное напряжение полностью смонтированных ячеек при вкаченных тележках и закрытых дверях указано в табл. 4.31, продолжительность приложения напряжения 1 мин.

б) изоляции вторичных цепей. Производится приложением напряжения 1 кВ в течение 1 мин.

Испытательное напряжение промышленной частоты изоляции  
ячеек КРУ и КРУН

Класс напряжения, кВ	Испытательное напряжение, кВ, ячейки с изоляцией		Класс напряжения, кВ	Испытательное напряжение, кВ, ячейки с изоляцией	
	керамической	из твердых органических материалов		керамической	из твердых органических материалов
3	24	21,6	15	55	49,5
6	32	28,8	20	65	58,5
10	42	37,8	35	95	85,5

Для того чтобы испытанию подверглась вся изоляция первичных цепей (в том числе выключатель, нижние проходные и опорные изоляторы), испытания следует производить до присоединения отходящих силовых кабелей. Выдвижные элементы должны находиться в рабочем положении, выключатель и разъединитель включены, предохранители установлены, а корпус шкафа заземлен. Испытания производят пофазно при заземленных двух других фазах.

При этом силовые трансформаторы, разрядники, трансформаторы напряжения отсоединяют, вторичные обмотки трансформаторов тока закорачивают и заземляют, заземляющие разъединители отключают. Если КРУ имеют изоляционные шторки или съемные плиты, напротив токопроводящих шин или контактов с наружной стороны этих шторок (плит) закрепляют электроды из фольги площадью 100 см<sup>2</sup>, соединяют их между собой и заземляют.

Испытания электрической изоляции вакуумных выключателей проводят на установке, максимальная токовая защита которой настроена на ток утечки не более 20 мА. Если ток утечки превышает это значение, производят осмотр выключателя и после устранения выявленных дефектов повторяют испытания. Если и после этого ток утечки остается выше 20 мА, испытывают отдельно дугогасительные камеры, и в случаях, когда ток утечки превышает 10 мА, камеры бракуются и подлежат замене.

В элегазовых КРУ повышенное напряжение прикладывают с помощью испытательных вводов и включенного последовательно защитного резистора сопротивлением 10 МОм. Испытание проводят одновременно для всей секции КРУ, поэтому все элементы его ячеек должны быть заполнены элегазом. Секционные ячейки и ячейки с двумя системами сборных шин испытываются одновременно для всех элементов обеих секций и двух систем шин. Трансформаторы напряжения при этом отключают.

Испытание изоляции между разомкнутыми контактами разъединителей и выключателей выполняют при положении полюсов электроаппаратов согласно табл. 4.32.

Таблица 4.32

Положение разомкнутых контактов полюсов электрических аппаратов элегазовых КРУ при испытаниях повышенным напряжением

Полюс электроаппарата	Положение полюса электроаппарата				
	заземлителя ввода	разъединителя ввода	выключателя	заземлителя сборных шин	разъединителя сборных шин
Полюс разъединителя ввода	Включен	Отключен	Отключен	Отключен	Отключен
Полюс выключателя	Включен	Отключен	Отключен	Отключен	Включен
Полюс разъединителей сборных шин	Включен	Отключен	Включен	Отключен	Отключен

После испытания повышенным напряжением проверяют течеискателем все элементы, заполненные элегазом, и пломбируют вентили и обратные клапаны.

#### 4.16.2.3. Измерение сопротивления постоянному току.

Сопротивление разъемных и болтовых соединений постоянному току должно быть не более значений, приведенных в табл. 4.33.

Измерение выполняется, если позволяет конструкция КРУ.

Таблица 4.33

Допустимые значения сопротивления постоянному току элементов КРУ

Измеряемый элемент	Допустимые значения сопротивления, не более
Втычные контакты первичной цепи	Если допустимые значения сопротивления не приведены в заводских инструкциях, то они должны быть, мкОм:
	для контактов на 400 А .....75
	630 А .....60
	1000 А ..... 50
	1600 А ..... 40
2000 А .....33	
Связь заземления выдвижного элемента с корпусом	0,1 Ом

Измерения производятся посредством двойного измерительного моста, методом амперметра – вольтметра или методом сравнения с эталонным сопротивлением. В качестве эталонного резистора используют шунты на номинальные токи 1500, 750 и 500 А. Сопротивление токоведущего контура измеряют при токе 100... 200 А, но не более 0,2 номинального тока шкафа КРУ при длительном пропуске измерительного тока. Сопротивление разборных контактных соединений измеряют один раз, разъемных – три раза, причем перед каждым измерением производят не менее трех включений и отключений и за окончательный результат измерения принимают среднее арифметическое значение. Если доступ к неподвижным контактам шкафа КРУ

затруднен, измерения производят на тележке с помощью вспомогательной медной пластины толщиной 8...9 мм или запасного неподвижного контакта. Точки, между которыми производят измерения, показаны на рис.4.24.

Переходное сопротивление металлической связи заземления выдвигного элемента с корпусом шкафа КРУ измеряют между ручками выдвигного элемента и местом приварки корпуса шкафа к закладным швеллерам. Измерения производят до трех раз, и при неудовлетворительном результате проверяют затяжку болтов заземления, соединения отдельных элементов и деталей каркаса шкафа.

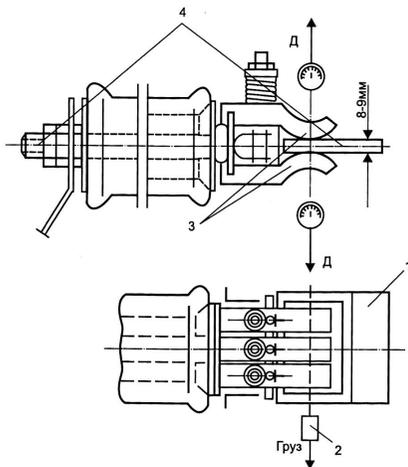


Рис.4.24. Измерение давления и переходного сопротивления контактов первичной цепи: 1 – пластина, соответствующая толщине неподвижного основания первичных контактов; 2 – грузик, подвешенный на вкладыше из тонкой бумаги; 3 – место крепления нитей динамометра Д; 4 – места присоединения шупов для измерения переходного сопротивления разъединяющего контакта первичной цепи

#### 4.16.2.4. Механические испытания.

Производятся в соответствии с инструкциями завода – изготовителя. К механическим испытаниям относятся:

а) вкатывание и выкатывание выдвигных элементов с проверкой взаимного вхождения разъединяющих контактов, а также работы шторок, блокировок, фиксаторов и т.п.;

б) проверка работы и состояния контактов заземляющего разъединителя.

При многократном вкатывании – выкатывании тележки проверяется работа механических блокировок, отсутствие перекосов и заеданий. Для проверки работы заземляющего контакта между корпусом шкафа и выдвигным элементом подключают электрическую лампу и вкатывают тележку: в зафиксированном рабочем и контрольном положениях сигнальная лампа должна гореть так же, как и при подключении ее непосредственно к сети. При выводе тележки из зафиксированного положения

предварительно включенный выключатель должен отключиться раньше, чем разомкнутся разъединяющие контакты главной цепи. Несоосность контактов не должна превышать 4...5 мм. Вертикальный люфт ламелей разъединяющих контактов выкатной тележки должен быть в пределах 8...14 мм. Вхождение подвижных контактов в неподвижные должно быть не менее 15 мм, запас хода – не менее 2 мм.

В ремонтном положении тележки КРУ выборочно производится измерение силы нажатия ламелей разъемных контактов главной цепи подвижных элементов и разъединителей (рис. 4.24). По линии нажатия на пластину 1 закладывают лист бумаги или шуп толщиной 0,1 мм и с помощью динамометра Д ламель оттягивают. Показание динамометра, при котором вкладыш выпадает или может быть вытянут с силой не более 0,5 Н, соответствует давлению на неподвижный контакт (нож). Измеренное значение должно быть в пределах, регламентируемых заводскими инструкциями, и для контактов главной цепи составляет обычно 100...150 Н (10...15 кгс).

При выкатывании тележки в ремонтное положение шторки должны под действием собственного веса закрыть окна, а при вкатывании – автоматически подниматься, открывая окна для прохода подвижных контактов главной цепи. В открытом положении верхний край нижней шторки должен совпадать с нижним краем верхнего проема, а в закрытом положении верхняя шторка должна полностью перекрывать проем к неподвижным контактам главной цепи. Если при выкатывании тележки шторки закрылись не полностью, работник, находящийся в отсеке выдвигного элемента, может оказаться под напряжением.

Следует убедиться в невозможности оперирования заземляющим разъединителем в отсутствие напряжения на зажимах блок-замка. С этой целью делаются попытки включить и отключить полюс заземлителя вручную при вставленном или удаленном ключе блок-замка: в обоих случаях полюс заземлителя не должен начинать выполнение соответствующей операции. Далее устанавливают нижний предел напряжения на зажимах блок-замка, вставляют в него ключ, деблокируют привод полюса заземлителя и производят по две операции включения – отключения. Перед выполнением каждой операции вынимают ключ из блок-замка, вновь его вставляют и деблокируют привод. В случае отказа электромагнитной блокировки заземляющего разъединителя выдвигной элемент может быть установлен в рабочее положение при включенных одновременно разъединителе и выключателе.

Нечеткая работа фиксатора выдвигного элемента может привести к ошибочному выкатыванию последнего с включенным выключателем. Если зазор между фиксатором и рычагом, который в него упирается, будет больше допустимого, может произойти деформация или поломка фиксатора. Четкая фиксация выдвигного элемента в рабочем положении свидетельствует о правильном сочленении главных разъемных контактов, а при нарушении регулировки механизма доводки подвижные контакты могут не дойти до неподвижных.

Проверка регулировки разъемных вспомогательных контактов производится в контрольном положении выдвигного элемента. Соединение неподвижной и подвижной частей контактов должно происходить на расстоянии 7...17 мм от края пружинящих пластин, ход которых при включении контактов вспомогательной цепи должен быть не менее 5 мм. Отгибание пружинящих пластин не допускается. При плавном ручном регулировании производится проверка работы коммутирующего устройства внешних вспомогательных цепей разъединителя и заземлителя. Сигнал о

включении должен появляться не раньше моментов касания контактов главной цепи, а сигнал об отключении – после прохождения подвижным контактом 80% расстояния между экранами контактов.

#### **4.16.3. Организация и охрана труда.**

Условия проведения наладочных работ в КРУ требуют не только соблюдения общих правил безопасности, но и учета специфики применяемого оборудования. К наладке приступают лишь после полного окончания строительных и электромонтажных работ. Должны быть проверены заземляющие устройства, протерты все изоляторы, плотно закрыты люки, проемы, лотки, закрашены места сварки, восстановлены поврежденные покрытия. Следует убедиться, что корпуса шкафов КРУ установлены правильно, без перекосов, качаний или наклона по фасаду и глубине, нижняя рама корпуса установлена горизонтально, а фланцы элементов ячеек и кожуха элегазовых КРУ закреплены на мягких прокладках.

Для проверки работы выключателя, релейной защиты, вспомогательных цепей выдвигной элемент может находиться в контрольном зафиксированном положении. При работах без выкатки выдвигного элемента на дверях его отсека или на рукоятке вывешивают предупредительные плакаты.

Работы в линейном отсеке производят при отсутствии напряжения на линейных разъемных контактах, включенном заземляющем разъединителе и запертых на навесной замок шторках, закрывающих доступ к шинным разъемным контактам. В отсеке выдвигного элемента должны быть заперты шторки, преграждающие доступ к шинным и линейным неподвижным контактам. Перед вкатыванием выдвигного элемента в корпус шкафа защитные шторки освобождают от навесных замков во избежание поломки приводного механизма.

Отключив находящийся под напряжением вакуумный выключатель для его проверки или регулировки, следует снять остаточное напряжение с экрана камер. Защита от рентгеновского излучения при испытании изоляции выключателя повышенным напряжением должна соответствовать правилам работ с источниками неиспользуемого рентгеновского излучения; предусматривается применение защитных экранов.

Особое внимание необходимо проявлять при работе с элегазовыми КРУ. Температура в помещениях для КРУЭ должна поддерживаться на уровне 15...20 °С при относительной влажности воздуха не более 80%. Максимальная концентрация элегаза не должна превышать 0,1%.

Сам элегаз не токсичен и не горюч, но при его утечке снижается процентное содержание кислорода в воздухе, а в элегазовом выключателе могут образовываться токсичные соединения. Следует соблюдать осторожность при работе в подвальных помещениях, в кабельных каналах, где элегаз может застаиваться, так как он в пять раз тяжелее воздуха. Концентрация элегаза постоянно контролируется теченскателем. В аварийных случаях можно воспользоваться свечой: если свеча гаснет, входить в помещение и находиться в нем не следует до тех пор, пока концентрация элегаза в воздухе не снизится до нормы.

## Глава 5. Линии электропередач.

### 5.1. Проверка воздушных линий электропередач (ВЛ).

#### 5.1.1. Проверка изоляторов. Производится согласно 4.13.

#### 5.1.2. Проверка соединений проводов. Производится согласно 4.14.1.

#### 5.1.3. Измерение сопротивления опор, их оттяжек и тросов.

На ВЛ должны быть заземлены:

1) опоры, имеющие грозозащитный трос или другие устройства молниезащиты. Сопротивление заземляющих устройств при высоте опор до 50 м должно быть не более приведенных в табл. 5.1 значений, при высоте опор более 50 м, а также на двухцепных и многоцепных опорах – вдвое меньше. Для опор горных ВЛ, расположенных на высоте более 700 м над уровнем моря, указанные значения могут быть увеличены в 2 раза;

2) железобетонные и металлические опоры ВЛ 3 – 35 кВ. Значения сопротивления заземляющих устройств должны быть: для ВЛ 3 – 20 кВ в населенной местности и для всех ВЛ 35 кВ – не более приведенных в табл.5.1, для ВЛ 3 – 20 кВ в ненаселенной местности в грунтах с удельным сопротивлением до 100 Ом·м – не более 30 Ом, а в грунтах с  $\rho > 100$  Ом·м – не более  $0,3 \rho$  Ом;

3) опоры, на которых установлены силовые или измерительные трансформаторы, разъединители, предохранители и другие аппараты. Значения сопротивления заземляющих устройств для ВЛ 110 кВ и выше должны быть не более приведенных в табл.5.1, для ВЛ 3 – 35 кВ не должны превышать 30 Ом;

4) металлические и железобетонные опоры ВЛ 110 кВ и выше без тросов и других устройств молниезащиты, если это необходимо по условиям обеспечения надежной работы защиты и автоматики. Сопротивление заземляющих устройств определяется при проектировании ВЛ.

Таблица 5.1

Наибольшие допустимые значения сопротивления заземляющих устройств ВЛ

Удельное эквивалентное сопротивление грунта, Ом·м	Наибольшее сопротивление заземляющего устройства, Ом
До 100	10
Более 100 до 500	15
Более 500 до 1000	20
Более 1000 до 5000	30
Более 5000	$6 \cdot 10^{-3} \rho$

Сопротивление заземляющих устройств опор ВЛ должно обеспечиваться и измеряться при токах промышленной частоты в период его наибольшего значения в летнее время. Допускается производить измерения в другие периоды (но не в период

глубокого промерзания грунта) с корректировкой результатов путем введения сезонного коэффициента. Конкретные значения сезонных коэффициентов в ПУЭ, 7-е изд. и ПТЭЭП не указываются; в табл. 5.2 приведены поправочные коэффициенты из табл.40 ПЭЭП, 5-е изд.

Таблица 5.2

Поправочные коэффициенты к значениям измеренного сопротивления заземлителя для средней полосы России

Тип заземлителя	Размеры заземлителя	t = 0,5 – 0,8 м			t = 0,5 м		
		K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>
Горизонтальная полоса	l = 5м	4,3	3,6	2,9	8,0	6,2	4,4
	l = 20 м	3,6	3,0	2,5	6,5	5,2	
Заземляющая сетка или контур	S = 400 м <sup>2</sup>	2,6	2,3	2,0	4,6	3,8	3,2
	S = 900 м <sup>2</sup>	2,2	2,0	1,8	3,6	3,0	
	S = 3600 м <sup>2</sup>	1,8	1,7	1,6	3,0	2,6	
Заземляющая сетка или контур с вертикальными электродами длиной 5 м	S = 900 м <sup>2</sup>	1,6	1,5	1,4	2,1	1,9	1,8
	n > 10 шт.						
	S = 3600 м <sup>2</sup>	1,5	1,4	1,3	2,0	1,9	
Одиночный вертикальный заземлитель	l = 2,5 м						2,30
	l = 3,5 м	2,00	1,75	1,50	3,80	3,00	
	l = 5,0 м	1,60	1,40	1,30	2,10	1,90	
		1,30	1,23	1,15	1,60	1,45	1,30

*Примечания.*

1) Соответствующий коэффициент применяется, когда измерение производится:

K<sub>1</sub> – при влажном грунте или когда моменту измерения предшествовало большое количество осадков;

K<sub>2</sub> – при грунте средней влажности или когда моменту измерения предшествовало выпадение небольшого количества осадков;

K<sub>3</sub> – при сухом грунте или когда моменту измерения предшествовало выпадение незначительного количества осадков.

2) Буквенные обозначения:

t – глубина заложения в землю горизонтальной части заземлителя или верхней части вертикальных заземлителей;

l – длина горизонтальной полосы или вертикального заземлителя;

S – площадь заземляющей сетки или контура;

n – количество вертикальных электродов.

Для ВЛ до 35 кВ применение грозозащитных тросов не требуется. Для ВЛ, защищенных тросами, сопротивление заземляющих устройств, выполненных по условиям

молниезащиты, должно обеспечиваться при отсоединенном тросе, а по остальным условиям – при неотсоединенном тросе. Требуемое сопротивление заземляющих устройств опор ВЛ 35 кВ, а также ВЛ 110 кВ и выше в грунтах с  $\rho > 1000$  Ом·м, должно обеспечиваться искусственными заземлителями. Сечение каждого из заземляющих спусков на опоре ВЛ должно быть не менее  $35 \text{ мм}^2$ , а для однопроволочных спусков –  $78,5 \text{ мм}^2$  (диаметр 10 мм), количество спусков на многостоечных опорах не менее двух. Заземлители опор должны находиться на глубине не менее 0,5 м, а в пахотной земле – 1 м.

## 5.2. Измерение характеристик и испытания силовых кабельных линий (КЛ).

### 5.2.1. Общие сведения.

Трехжильные кабели 6 – 10 кВ изготавливают с поясной изоляцией, в общей свинцовой или алюминиевой оболочке. Силовые кабели на напряжение до 35 кВ имеют от одной до четырех медных или алюминиевых жил с круглой, сегментной или секторной формой сечения (рис.5.1).

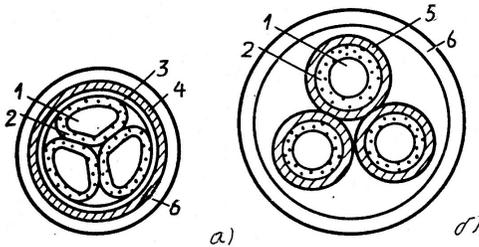


Рис.5.1. Поперечное сечение трехжильного кабеля: а) на 6 – 10 кВ с поясной изоляцией; б) на 35 кВ с отдельно оцинкованными жилами; 1 – токоведущая жила; 2 – изоляция жилы; 3 – поясная изоляция; 4 – металлическая оболочка; 5 – свинцовая оболочка жилы; 6 – защитный покров

Изоляция выполняется из пропитанной бумаги, резины, пластмассы, полиэтилена или поливинилхлорида. Для предохранения изоляции от влаги, газов, кислот и механических повреждений служит защитная герметичная оболочка из свинца, алюминия, резины или поливинилхлорида. В кабелях 20 – 35 кВ каждая жила дополнительно заключена в свинцовую оболочку для улучшения условий работы изоляции и отвода тепла. В кабелях 1 – 35 кВ между изолированными жилами и защитной оболочкой прокладывается слой поясной изоляции. Броня кабелей выполняется из стальных лент или стальной оцинкованной проволоки и защищается от коррозии наружным покровом из кабельной пряжи («каболки»).

Для соединения отрезков кабелей и оконцевания служат соединительные и концевые муфты (заделки). Места расположения муфт в земле отмечаются указательными реперами. На промышленных предприятиях, городских территориях преимущественно распространены *кабельные линии* (КЛ), состоящие из одного или нескольких

параллельно проложенных кабелей с заделками и крепежными деталями. Кабели прокладываются в земляных траншеях, кабельных каналах, тоннелях, по кабельным эстакадам, стенам и перекрытиям зданий.

### 5.2.2. Проверка целостности и фазировки жил кабеля.

Проверяются целостность и совпадение обозначений подключаемых жил кабеля.

Целостность жил кабелей напряжением до 20 кВ проверяют мегаомметром, а кабелей 35 кВ и выше – путем измерения сопротивления жил кабеля постоянному току. Удельное сопротивление должно быть не выше  $0,0179 \cdot 10^{-6}$  для медной и  $0,0294 \cdot 10^{-6}$  Ом·м для алюминиевой жилы при температуре 20 °С. Измеренное сопротивление не должно отличаться от указанных значений более чем на 5%. Рекомендуется проводить измерения по четырехзажимной схеме, сопротивление соединительных проводов – не более 0,005 Ом.

Измеренное при температуре  $T$  °С значение сопротивления  $R_T$  пересчитывают к температуре 20 °С по формулам

$$R_{20} = \frac{R_T}{1 + 0,0039(T - 20)} \text{ (для мягкой меди)}$$

$$\text{или } R_{20} = \frac{R_T}{1 + 0,0038(T - 20)} \text{ (для твердой меди).}$$

Температура жил кабеля при измерении принимается равной температуре окружающей среды после выдержки в отключенном состоянии не менее 10 суток при прокладке кабеля в земле и 4 ч – на воздухе.

### 5.2.3. Измерение сопротивления изоляции.

Производится мегаомметром на напряжение 2500 В. Для силовых кабелей выше 1 кВ сопротивление изоляции не нормируется. Измерение следует производить до и после испытания кабеля повышенным напряжением, для каждой жилы относительно оболочки и других заземленных жил.

Перед измерением КЛ должна быть разряжена путем соединения металлических элементов между собой и с землей не менее чем на 2 мин. Отсчет значений сопротивления изоляции жил производят через 1 мин после приложения напряжения. Причиной асимметрии сопротивления могут быть увлажнение и загрязнение концевых муфт КЛ.

### 5.2.4. Испытание повышенным напряжением выпрямленного тока.

Применение выпрямленного (постоянного) тока объясняется стремлением уменьшить мощность испытательного трансформатора: мощность переменного тока определялась бы преимущественно емкостью кабеля, которая достаточно велика (см. табл. 5.3).

Ориентировочные значения удельной емкости одной жилы на оболочку трехжильных кабелей с поясной изоляцией и секторными жилами

Сечение жил, мм <sup>2</sup>	10	16	25	35	50	75	95	120	150	185	240
Удельная емкость, мкФ/км	<u>0,10</u> 0,08	<u>0,11</u> 0,09	<u>0,14</u> 0,11	<u>0,16</u> 0,12	<u>0,18</u> 0,14	<u>0,21</u> 0,17	<u>0,25</u> 0,19	<u>0,28</u> 0,22	<u>0,31</u> 0,24	<u>0,34</u> 0,26	<u>0,38</u> 0,29

*Примечание.* В числителе приведены значения удельной емкости для кабелей на 6 кВ, в знаменателе – для кабелей на 10 кВ.

При испытании изоляции кабеля переменным напряжением мощность испытательного трансформатора, обусловленная током через емкость, должна быть (кВ·А):

$$P = U_{\text{исп}} I_c = U_{\text{исп}}^2 \varpi C \cdot 10^{-3},$$

где  $U_{\text{исп}}$  – испытательное напряжение, кВ;  $I_c$  – емкостный ток, А;  $\varpi = 2\pi f = 314$  1/с при  $f = 50$  Гц;  $C$  – емкость жилы, мкФ.

При испытании напряжением постоянного тока мощность нагрузки трансформатора обусловлена только током утечки  $I_{\text{ут}}$ :

$$P = U_{\text{исп}} \cdot I_{\text{ут}},$$

который намного меньше емкостного.

Пусть, например, испытывается напряжением переменного тока  $U_{\text{исп}} = 42$  кВ изоляция кабеля на 10 кВ с жилами сечением 50 мм<sup>2</sup> и удельной емкостью 0,14 мкФ/км. В этом случае при длине кабеля 1 км потребуется повышающий трансформатор мощностью

$$S = 42^2 \cdot 314 \cdot 0,14 \cdot 10^{-3} = 77,6 \text{ кВ} \cdot \text{А},$$

а емкостный ток составит  $I_c = 77,6/42 = 1,85$  А, тогда как для испытания напряжением постоянного тока 60 кВ достаточно было бы 60 Вт при токе утечки  $I_{\text{ут}} = 1$  мА (п.2.4.5.3), тем более, что на практике обычно  $I_{\text{ут}} < 100$  мкА.

При испытании трехжильного кабеля напряжение прикладывается между каждой жилой и двумя другими, соединенными между собой и с металлической оболочкой и заземленными. В этих условиях при испытании переменным напряжением емкость нагрузки будет больше, чем указано в табл.5.3,а, пропорционально возрастает и потребная мощность трансформатора: так, в приведенном выше примере будет  $C = 0,21$  мкФ (см. табл. 5.3,б) и  $S = 116,4$  кВ·А.

Таблица 5.3,б

Удельная емкость одной жилы трехжильного кабеля с секторными жилами и пропитанной бумажной изоляцией по отношению к двум другим жилам и металлической оболочке

Сечение, мм <sup>2</sup>	16	25	35	50	75	95	120	150	185	240
Удельная емкость, мкФ/км	0,19 0,15	0,20 0,18	0,24 0,20	0,28 0,21	0,33 0,22	0,37 0,23	0,40 0,27	0,41 0,29	0,47 0,32	0,52 0,36

Правилами оговариваются испытания не на постоянном, а на выпрямленном токе, поскольку из-за влияния большой емкости кабелей напряжение сглаживается и форма его практически не отличается от напряжения постоянного тока, а реализация источника выпрямленного тока не вызывает затруднений.

Значения испытательного напряжения выпрямленного тока и длительность его приложения приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Испытательное напряжение выпрямленного тока для силовых кабелей, кВ

Изоляция кабеля	Номинальное напряжение кабеля $U_{ном}$ , кВ						Продолжительность испытания, мин
	2	3	6	10	20	35	
Бумажная	12	18	36	60	100	175	10
Резиновая	-	6	12	20	-	-	5
Пластмассовая	-	15	36	60	-	-	10

Для кабельных линий на напряжение 110 кВ допускается испытание напряжением переменного тока промышленной частоты (1,00 – 1,73)  $U_{ном}$  или путем включения КЛ на номинальное напряжение  $U_{ном}$ . Длительность испытания – согласно указаниям завода-изготовителя.

Электрическая прочность неповрежденной изоляции в несколько раз выше испытательного напряжения для кабелей, поэтому при испытаниях выявляются явно дефектные места.

Коэффициент пульсации, а также погрешность расчета по формулам п.2.4.5.3 тем меньше, чем больше сопротивление изоляции и емкость кабеля, т.е. постоянная времени цепи разряда емкости. В приведенном численном примере  $R = U_{исп}/I_{ут} = 60 \cdot 10^3 / 1 \cdot 10^{-3} = 60 \cdot 10^6$  Ом,  $T = 60 \cdot 10^6 \cdot 0,14 \cdot 10^{-6} = 8,4$  с и коэффициент пульсации будет  $K_p = 0,24\%$ , что означает почти полное сглаживание.

Типовая принципиальная схема испытательной установки с однополупериодным выпрямлением переменного тока показана на рис. 5.2. Перед испытанием металлические оболочки (экраны, броня) следует заземлить. Пластмассовые оболочки (шланги) кабелей, проложенных в земле, испытываются приложением напряжения между отсоединенными от земли экранами (оболочками) и землей, а проложенных на воздухе – не испытываются.

Контроль испытательного напряжения производится на стороне переменного тока, либо на отпайке вторичной обмотки повышающего трансформатора, либо на первичной обмотке. Имея в виду сглаженную форму выпрямленного напряжения, шкалу вольтметра градуируют в киловольтах выходного напряжения, для чего фиксируемые вольтметром значения действующего напряжения умножаются на коэффициент трансформации и на  $\sqrt{2}$  для перехода к амплитудным значениям. Достаточная точность такого способа измерения обеспечивается при условии, что напряжение питающей сети синусоидально, а пульсация напряжения не превышает 3...5 %.

Подъем напряжения до 25...30% можно производить с любой скоростью, ограничиваемой только бросками зарядного тока в кабеле. Далее напряжение поднимают плавно со скоростью 1...2 кВ/с и поддерживают его на заданном уровне в продолжение всего периода испытания. Длительность приложения испытательного напряжения отсчитывают от момента установления нормированного значения напряжения, а отсчет тока утечки по микроамперметру – в конце испытания. По истечении нормированного времени напряжение плавно снижают до 30%  $U_{исп}$ , затем установка может быть отключена толчком.

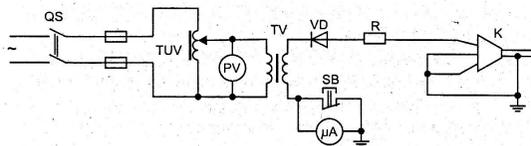


Рис. 5.2. Принципиальная электрическая схема испытания изоляции кабеля выпрямленным напряжением: QS – рубильник; TUV – автотрансформатор (ЛАТР); TV – испытательный трансформатор; VD – выпрямитель; R – токоограничивающий резистор; A – амперметр; SB – кнопка включения амперметра; K – испытуемый кабель

После отключения от сети заряд и напряжение на кабеле будут медленно уменьшаться по закону экспоненты с постоянной времени  $T$ , так что для снижения напряжения, например, до 1%  $U_{исп}$  потребуется около 4,5  $T$ , а до 0,1%  $U_{исп}$  – около 7  $T$ . Применительно к приведенному выше примеру это означает, в частности, что для снижения напряжения на кабеле до сверхнизкого значения 60 В понадобится около 1 мин. Однако при реальных значениях параметров изоляции «здорового» кабеля  $R_{из} \gg R = 60 \text{ МОм}$  и  $C > 0,14 \text{ мкФ}$  постоянная времени возрастает в десятки раз и, значит, опасное напряжение может сохраняться на кабеле десятки минут. Поэтому после снятия испытательного напряжения кабель разряжают путем замыкания испытанной жилы на землю – сначала через добавочное сопротивление, затем накоротко. Контрольный разряд кабеля производят также и перед началом работ, так как на нем может наводиться заряд при испытании соседних кабелей.

Во время испытания ведется наблюдение за показаниями приборов и разделками на концах кабеля. При удовлетворительном состоянии кабеля ток утечки при подъеме напряжения сначала резко возрастает (за счет заряда емкости), затем быстро спадает и в продолжение испытания остается стабильным. При наличии дефектов ток утечки спадает медленно или даже возрастает, особенно по достижении полного ис-

пытательного напряжения. В этих случаях испытание продолжают до выявления дефекта, но не более чем 15 мин. Абсолютное значение тока утечки браковочным показателем не является.

Обращается внимание на асимметрию (разницу одновременно наблюдаемых значений) токов утечки по фазам. Разница между наибольшим  $I_{\max}$  и наименьшим  $I_{\min}$  значениями оценивается коэффициентом асимметрии  $I_{\max} / I_{\min}$ , и если последний превосходит норму, чаще всего из-за плохой разделки муфт, испытание продолжают до наступления пробоа. Токи утечки и коэффициенты асимметрии указаны в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Токи утечки и коэффициенты асимметрии для силовых кабелей

Кабели напряжением, кВ	Допустимые значения токов утечки, мА	Допустимые значения коэффициента асимметрии
6	0,2	8
10	0,5	8
20	1,5	10
35	2,5	10
110 и выше	Не нормируется	Не нормируется

### 5.2.5. Определение активного сопротивления жил.

Производится для кабельных линий 20 кВ и выше. Сопротивление жил кабеля постоянному току, приведенное к  $1 \text{ мм}^2$  сечения, 1 м длины и температуре  $20^\circ\text{C}$ , должно быть не более 0,0179 Ом для медной жилы и 0,0294 Ом для алюминиевой. Результат измерения, приведенный к удельному значению и температуре  $20^\circ\text{C}$ , не должен отличаться от указанных значений более чем на 5%. Температура окружающей среды должна измеряться на высоте расположения кабеля, не дальше 1 м от него.

При измерении сопротивления жил 1, 2 и 3-жильного кабеля они попарно (1-2, 2-3, 1-3) подключаются к измерительному прибору на одном конце кабеля, а на другом конце соединяются болтом наглухо. Значения сопротивления фаз рассчитываются по следующим формулам:

$$R_1 = \frac{R_{12} + R_{13} - R_{23}}{2}; R_2 = \frac{R_{12} + R_{23} - R_{13}}{2}; R_3 = \frac{R_{13} + R_{23} - R_{12}}{2}.$$

Активное сопротивление проводника на переменном токе при частоте 50 Гц несколько выше сопротивления постоянному току (омического) за счет влияния поверхностного эффекта и эффекта близости. Это влияние учитывают поправочным коэффициентом, значение которого зависит от конструкции кабеля и сечения токопроводящей жилы (табл. 5.6). Для жил сечением до  $120 \text{ мм}^2$  поправочный коэффициент не вводится.

Значения поправочного коэффициента для пересчета омического сопротивления жил кабеля на сопротивление переменному току частотой 50 Гц

Конструкция кабеля	Номинальное сечение жилы, мм <sup>2</sup>				
	150	185	240	300	400
Трехжильные кабели с поясной изоляцией	1,01	1,02	1,035	1,052	1,095
Одножильные кабели или кабели с отдельно освинцованными жилами	1,006	1,008	1,011	1,025	1,050

### 5.2.6. Определение электрической рабочей емкости жил.

Производится для линий 20 кВ и выше. Измеренное значение не должно отличаться от результатов заводских испытаний более чем на 5%.

Рабочая емкость трехжильного кабеля может быть выражена через частичные емкости (на оболочку и между жилами):

$$C_p = C_o + 3C_1,$$

где  $C_o$  – частичная емкость жилы на оболочку;  $C_1 = C_{12} = C_{13} = C_{23}$  – частичные емкости между двумя жилами.

Рабочая емкость  $C_p$  характеризует нормальную работу кабельной линии и служит для подсчета зарядного тока по формуле (при симметричном трехфазном напряжении):

$$I_c = U_\phi C_p \omega.$$

Рабочую емкость трехжильного кабеля с поясной изоляцией непосредственно измерить нельзя, но ее можно вычислить, зная по крайней мере две из трех следующих величин:

$C_1 = C_o + 2C_1$  – емкость жилы по отношению к двум другим и металлической оболочке;

$C_{II} = 2C_o + 2C_1$  – емкость двух жил по отношению к третьей жиле и оболочке;

$C_{III} = 3C_o$  – емкость трех жил относительно металлической оболочки.

На основании полученных данных можно рассчитать значение рабочей емкости по одному из следующих выражений:

$$C_p = 1,5C_1 - 0,5C_o; C_p = \frac{3}{2}C_{II} - \frac{2}{3}C_{III}; C_p = \frac{3}{2}C_{II} - \frac{1}{6}C_{III}.$$

### 5.2.7. Измерение распределения тока по одножильным кабелям.

Неравномерность в распределении токов по параллельным кабелям не должна быть более 10%.

Параллельное включение нескольких (обычно от 2 до 6) одножильных кабелей часто применяется, например, для соединения сборных шин ЗРУ с мощными однофазными трансформаторами, установленными на открытом воздухе. На таких КЛ должны быть измерены токи, протекающие как в жилах, так и в оболочке и броне.

Однофазные кабели должны прокладываться так, чтобы в общем магнитном поле они занимали симметричное положение. В противном случае индуктивное сопротивление их будет различным и нагрузка на параллельно соединенных кабелей распределится неравномерно, что, в свою очередь, может привести к перегреву отдельных кабелей. Кроме того, на нагрев кабеля влияют и токи, которые наводятся в оболочке и броне и могут достигать 100% тока жилы.

Измерение обычно выполняют клещами на вертикальных участках кабеля, около концевых муфт: ниже концевой разделки измеряют общий ток, выше – ток, протекающий только в жиле кабеля. Ток в оболочке, броне находят как разность этих значений.

Правильность измерений контролируют суммированием токов в параллельно соединенных кабелях. Измерения токов и температур желательно проводить при нагрузках, близких к номинальным.

## **5.2.8. Проверка антикоррозионных защит.**

### **5.2.8.1. Общие сведения.**

Металлические оболочки и стальные трубопроводы кабелей должны быть защищены от почвенной *коррозии* и воздействия *блуждающих токов*. Электрозащита от коррозии осуществляется посредством катодной поляризации, при которой оболочке искусственно придается отрицательный потенциал относительно земли.

Блуждающие токи возникают, главным образом, в системах электропитания электрифицированного транспорта, где «минус» источника питания соединен с рельсовыми путями. Часть тока, ответвляющаяся в землю, вызывает электролитическую коррозию незащищенных металлических частей, причем оболочка кабеля играет роль анода. Наиболее интенсивно разрушается свинцовая оболочка; интенсивность разъедания коррозией у стали в 3 раза, у алюминия – в 11 раз меньше, чем у свинца.

Максимальные значения блуждающих токов наблюдаются в часы наиболее интенсивного движения рельсового электротранспорта. Для уменьшения этих токов стремятся к снижению продольного сопротивления рельсов и повышению переходного сопротивления рельсы – земля, к уменьшению протяженности участка рельсового пути, относящегося к одному отсасывающему пункту. Вблизи отсасывающего пункта (катодная зона рельсов) потенциалы рельсового пути всегда отрицательны. С перемещением электротранспорта образуются знакопеременные зоны, а при большом его количестве на линии отдельные участки рельсов могут иметь всегда только положительный потенциал (анодная зона рельсов).

Практика показывает, что даже весьма незначительные положительные потенциалы (0,1...0,2 В) на свинцовых оболочках кабелей могут вызвать их интенсивное разрушение. В определенных условиях опасными являются также большие отрицательные потенциалы. Поэтому стремятся уменьшить перепады потенциалов вдоль пути электрифицированного транспорта и разность потенциалов между рельсами. Для снижения перепадов служат отсасывающие устройства, соединяющие изолирован-

ными одножильными кабелями различные точки рельсов с «минусом» тяговой подстанции.

Падение напряжения на участках пути в зоне одной подстанции должно быть примерно одинаковым (2...3 В), а на стыках – не более 0,05...0,10 В. Территориально наиболее опасными по электрокоррозии являются места расположения подстанций и отсасывающих пунктов. Разность потенциалов между отсасывающими пунктами не должна превышать 1 В.

Работа антикоррозионных защит проверяется для:

– кабелей с металлической оболочкой, проложенных в грунтах с  $\rho > 20$  Ом·м и средней или низкой коррозионной активностью, при плотности тока утечки в землю выше  $0,15$  мА/дм<sup>2</sup>, и в грунтах с высокой коррозионной активностью и  $\rho < 20$  Ом·м – при любой плотности тока утечки;

– кабелей с незащищенной оболочкой и разрушенными броней и защитными покровами;

– стального трубопровода кабелей высокого давления.

При проверке измеряются потенциалы и токи в оболочке кабелей и параметры электрозащиты в соответствии с руководящими указаниями по электрохимической защите.

#### 5.2.8.2. Измерение разности потенциалов и плотности тока утечки.

Измерение потенциалов оболочки кабеля по отношению к земле и стекающего тока производится по схеме рис. 5.3. Во избежание погрешностей и образования гальванических пар (ЭДС поляризации) заземляющий электрод выполняют из того же металла, что и оболочка кабеля (свинец, алюминий). Измерение производится по трассе кабеля в каждом смотровом колодце, а при их отсутствии в открытых шурфах.

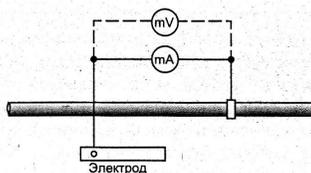


Рис. 5.3. Схема измерения разности потенциалов на оболочке кабеля и плотности стекающего с нее блуждающего тока

Вольтметр mV должен быть многопредельным (0 – 1, 0 – 20, 0 – 100 В) с двусторонней шкалой. При пересечении кабельных линий с рельсовыми путями потенциалы измеряют по обе стороны пути на расстоянии до 10 м.

Плотность тока, стекающего с оболочки кабеля в окружающую среду, являются одним из важных показателей процесса электролитической коррозии в оболочке. Для бронированных кабелей опасной считается среднесуточная плотность тока  $0,15$  мА/дм<sup>2</sup>. Для голых освинцованных бронированных кабелей в агрессивных грунтах опасными считаются любые анодные и знакопеременные зоны. Большие значе-

ния блуждающих токов в свинцовых оболочках, достигающие иногда десятков ампер, вызывают также дополнительный нагрев кабелей.

При измерении плотности тока по схеме рис. 5.3 применяют миллиамперметр (мА) с пределами измерения 0 – 10; 0 – 100 мА; 0 – 1 А и внутренним сопротивлением 1 – 5 Ом. В качестве электрода используют отрезок кабеля, одинакового с проверяемым, который закладывают на той же глубине и на расстоянии 0,3...0,5 м от него, а длину выбирают такой, чтобы площадь занимаемой им поверхности составляла не менее 1 дм<sup>2</sup>, желательно 5...10 дм<sup>2</sup>. Удельная плотность тока, стекающего с электрода в землю, определяется как

$$j_{уд} = I_{эл}/S,$$

где  $I_{эл}$  – измеренный ток, мА;  $S$  – площадь поверхности вспомогательного электрода, дм<sup>2</sup>.

### **5.2.8.3. Обнаружение и измерение блуждающего тока.**

Предварительные измерения с целью обнаружения блуждающих токов в оболочках КЛ можно производить из ТП, расположенных в зоне рельсовых путей электроподстанции, тяговых подстанций и ремонтных депо. При этом измерительные приборы присоединяются одним полюсом к контуру заземления, другим – к электроду (газовой трубе), вбитому в землю на расстоянии 7...10 м от ТП. В остальных случаях пункты для измерения оборудуются в специальных колодцах.

Сквозной ток, протекающий вдоль оболочки кабеля, может быть измерен методом падения напряжения на определенной длине кабеля или компенсационным методом. Метод падения напряжения применим в тех случаях, когда может быть достаточно точно определено активное сопротивление  $R_{уч}$  свинцовой оболочки и стальной брони кабеля на участке измерений. Тогда, измерив падение напряжения  $\Delta U_{уч}$  на этом участке, находят ток

$$I_{уч} = \Delta U_{уч}/R_{уч}.$$

Если определение сопротивления оболочки и брони вызывает затруднения (например, нельзя точно установить расчетную толщину металла, поврежденного коррозией), целесообразно применить компенсационный метод. По участку оболочки кабеля (обычно длиной 0,8...1 м), по которому протекает сквозной ток, пропускается от регулируемого постороннего источника постоянный ток обратного направления. В момент компенсации падение напряжения на этом участке, контролируемое милливольтметром, будет равно нулю, а ток от источника равен сквозному току. Милливольтметр должен иметь пределы 0 – 10; 0 – 100 мВ; 0 – 1 В, амперметр в цепи источника тока – пределы 0 – 5; 0 – 50 А. Места подсоединения проводов к оболочкам кабеля и электроду должны быть тщательно заизолированы и покрыты слоем битума, чтобы избежать проникновения влаги.

Полярность и значение потенциалов и блуждающих токов не остаются постоянными. Поэтому измерения производят несколько раз в течение 10...15 мин и вычисляют среднее значение. В знакопеременных зонах расчет производят отдельно для положительных и отрицательных значений параметра. Сопоставляя кривую измене-

ния блуждающих токов с графиком движения поездов, можно установить источник опасных блуждающих токов и дефектные места в рельсовых путях.

#### **5.2.8.4. Защита от блуждающих токов.**

Применяются следующие системы защит от блуждающих токов:

- электрический дренаж (прямой, поляризованный, усиленный) – отвод блуждающих токов посредством проводника от анодной зоны на оболочке защищаемого кабеля к источнику этих токов, т.е. к рельсам или отрицательной шине питающей подстанции. Дренаж называют прямым, когда на всем сближении кабеля с рельсовыми путями на оболочке сохраняется отрицательный потенциал. В знакопеременных зонах применяется поляризованный дренаж, при котором в дренажную цепь включается вентильный элемент, обычно диод. Усиленный дренаж содержит дополнительный источник постоянного напряжения;

- протекторная защита – гальванические аноды, устанавливаемые на определенном расстоянии и электрически соединенные с оболочкой кабеля. В результате разрушается поверхность защитных электродов, выполненных из металла с более низким электрохимическим потенциалом;

- катодная защита – регулируемый источник тока, обеспечивающий отрицательный потенциал оболочки кабеля по отношению к земле. Применяется для защиты подземных кабелей в опасных зонах при положительном потенциале оболочки кабеля по отношению к земле.

Серийно выпускаются устройства катодной защиты УКЗВ и УКЗН – высоковольтные (питание от сети 6 или 10 кВ) и низковольтные (питание от сети 220 В). Ввод питающей линии в УКЗВ – воздушный, в УКЗН – кабельный. Выводы линий постоянного тока в обоих устройствах – кабельные.

Преобразование переменного тока в постоянный осуществляется путем предварительного понижения напряжения переменного тока с последующим его выпрямлением. Устройства имеют защиты от атмосферных перенапряжений, коротких замыканий, снабжаются системой обогрева. Модификация 2УКЗВ-А обеспечивает возможность автоматического регулирования защитного потенциала.

### **5.3. Определение мест повреждения линий.**

#### **5.3.1. Классификация методов определения мест повреждения линий.**

Повреждение силовых кабельных (КЛ) и воздушных (ВЛ) линий электропередачи (ЛЭП) вызывает нарушение нормального электроснабжения потребителей и должно быть ликвидировано возможно скорее. Опыт показывает, что большая часть времени восстановления ЛЭП приходится на определение места повреждения (ОМП) линии.

В кабельных сетях 6 – 10 кВ около 90% причин отключения составляют повреждения кабеля и только 10% – выход из строя остальных элементов. Большинство повреждений связано с замыканием на землю. Около 30% повреждений КЛ в процессе эксплуатации приходится на муфты и концевые заделки, остальные 70% – на непрерывные участки кабеля. При профилактических испытаниях повреждаемость концевых и соединительных муфт достигает 40...45%.

ВЛ повреждаются чаще вблизи опор, где переходное сопротивление на землю значительно ниже, чем в пролетах. Более половины повреждений происходит из-за повреждения и разрушения изоляторов.

Наиболее быстро можно осуществить *дистанционное* ОМП линии – измерение расстояния от концов ЛЭП до места повреждения. Однако при этом точно указать МП кабеля невозможно: во-первых, расстояния на трассе КЛ отмечаются в плане, тогда как в действительности кабель не лежит в одной плоскости, во-вторых, его укладывают без натяга, «змейкой». В таких условиях получить относительную погрешность измерения расстояния менее 1...2% вряд ли реально. Фактически это означает, что, например, абсолютная погрешность дистанционного ОМП для КЛ длиной 1 км составит  $\pm 10...20$  м, т.е. необходимо будет произвести раскопку участка трассы протяженностью 20...40 м.

Между тем на заводских и городских территориях желательно обеспечить погрешность не более  $\pm 3$  м, но удовлетворить это требование затруднительно. Пусть, например, относительная погрешность измерения составляет 1%, погрешностью отсчета расстояния на местности 2%; тогда даже при сравнительно небольшой длине линии 200 м и относительной погрешности  $\sqrt{1^2 + 2^2} = 2,25\%$  абсолютная погрешность составит  $\pm 4,5$  м.

*Топографический* метод – это ОМП непосредственно на трассе кабеля. Метод позволяет установить искомое МП с точностью не ниже  $\pm 3$  м, но его применение требует перемещаться по трассе со специальной аппаратурой. Более целесообразно использовать оба метода: сначала дистанционно найти участок с МП, а затем топографически уточнить место повреждения кабеля на этом участке.

На рис.5.4 представлена общая классификация методов ОМП. Принятое при этом подразделение по частоте обусловлено принципиальным различием электрических процессов в проводах и кабелях в существенно различных частотных диапазонах – от нуля (постоянный ток) до нескольких килогерц (низкочастотный диапазон) и от нескольких десятков килогерц до мегагерц (высокочастотный диапазон).

*Импульсные (высокочастотные)* методы сводятся к измерению времени распространения электромагнитных волн (импульсов) по участкам КЛ. Для отсчета времени служат либо специально генерируемые зондирующие импульсы (*локационные* методы), либо возникающие в месте повреждения электромагнитные волны (*волновые* методы).

*Локационный* метод основан на измерении времени между моментом посылки в линию зондирующего электрического импульса и моментом возвращения его после отражения от МП. Термин «локационный» употребляется здесь по аналогии с радиолокацией, с тем только отличием, что в данном случае имеется в виду распространение импульсов по проводам, а не в окружающей локатор среде. Расстояние от начала линии до МП подсчитывается по формуле:

$$l_n = vt_n / 2,$$

где  $l_n$  – длина участка линии от начала до МП;

$v$  – скорость распространения импульса в линии;

$t_n$  – время пробега зондирующего импульса от начала линии до МП и обратно.

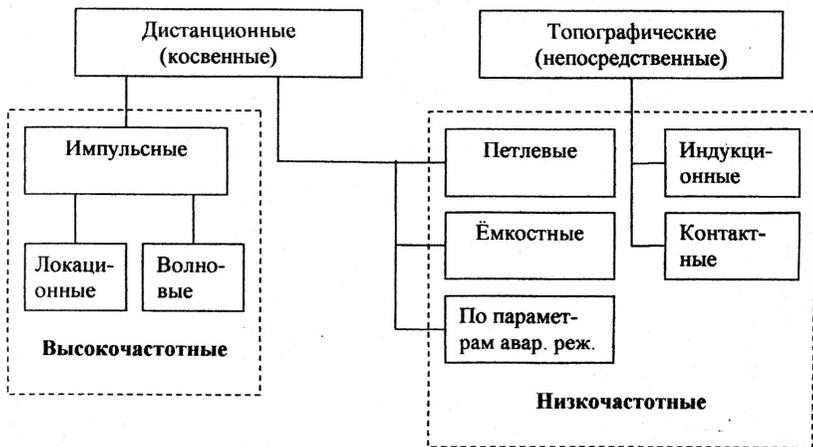


Рис. 5.4. Классификация методов ОМП

Локационные измерения могут выполняться с помощью автоматических или неавтоматических устройств. Первые используются на ВЛ, находящихся под рабочим напряжением. При срабатывании защиты запускается локационный искатель, позволяющий определить расстояние до МП за время меньше 0,1 с. На КЛ применяется неавтоматическая локация.

*Волновые* методы («пассивная локация») основаны на том, что при подаче на линию высокого напряжения в месте повреждения происходит пробой и в линии возникают волновые процессы, которые можно использовать для измерений. С этой целью фиксируют моменты прихода фронтов волн с помощью счетчиков на обоих концах линии (двусторонние измерения) или на одном из них (односторонние измерения).

По методу двусторонних измерений фиксируется интервал времени между моментами достижения концов линии фронтами волн, возникающих в МП. Пусть линия длиной  $L$  к моменту пробоя была заряжена до напряжения  $U$  положительной полярности (рис.5.5а). При пробое линии на землю напряжение в МП станет равным нулю. Это событие можно представить как появление волн напряжения  $U$  обратной полярности, стремящихся со скоростью  $v$  распространить нулевой потенциал в обе стороны от МП по всей длине линии (рис.5.5,б). Если пробой произошел в точке, расположенной на расстоянии  $l_k$  от конца линии, то по истечении времени  $t_1 = (L - l_k) / v$  фронт одной из волн достигнет начала линии (рис.5.5,в), а спустя время  $t_2 = l_k / v$  фронт другой достигнет конца линии. Интервалы времени  $t_1$  и  $t_2$  непосредственно измерить нельзя, но нетрудно отсчитать разность показаний счетчиков на концах линии, т.е. промежуток времени

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 2(l_k / v) - L / v,$$

откуда искомое расстояние будет

$$l_k = (L + \Delta t \cdot v) / 2.$$

Для синхронного хода счетчиков на концах линии необходима посылка *хронирующих сигналов*, которые могут передаваться по какому – либо каналу связи или по самой проверяемой линии.

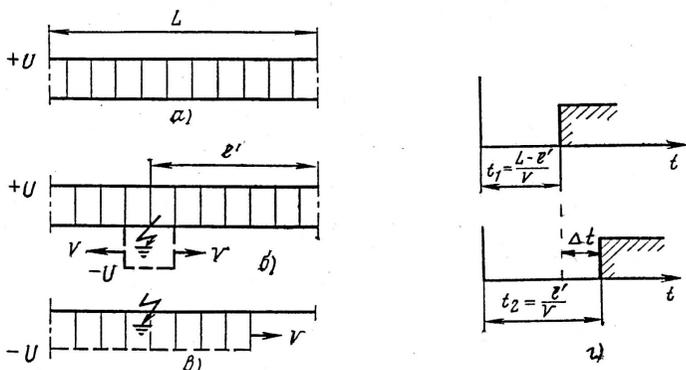


Рис. 5.5. Распространение волн вдоль линии (а, б, в) и временные диаграммы (г) при волновом методе ОМП

При двусторонних измерениях с *предварительными* хронящими сигналами на обоих концах линии непрерывно ведут счет времени одинаковые счетчики. Хронящие импульсы периодически поступают со стороны ведущего конца линии и достигают ведомого счетчика через определенный интервал времени  $t_0$ , а поэтому начало отсчета на ведомом конце всегда сдвинуто по отношению к началу работы ведущего счетчика на время  $t_0$ . В момент достижения фронтами волн концов линии соответствующие счетчики останавливаются, так что разность их показаний будет на  $t_0$  больше, чем в предыдущем случае, а расстояние

$$l = (L - vt_0) / 2 + \Delta t v / 2.$$

Если хронящие сигналы передаются по самой проверяемой линии, то  $t_0 = L / v$  и  $l = \Delta t \cdot v / 2$ .

При двусторонних измерениях с *последующим* хронированием счетные устройства находятся в ждущем режиме. Когда фронт волны достигает ведущего конца линии, там начинается отсчет времени. Приход волны к ведомому счетчику вызывает посылку хронящего импульса через заданное время задержки  $t_3$ . Спустя время  $t_0$  он достигает ведомого конца и останавливает там счет времени. Для исключения задержки счет времени на ведущей стороне начинают с запаздыванием на  $t_3$ , и тогда расстояние  $l$  можно вычислить так же, как и в предыдущем случае.

*Односторонние* измерения могут выполняться в двух вариантах. Первый – измерение времени  $\tau$  между моментом прихода к началу линии фронта волны, возникшей в МП, и моментом вторичного его прихода после двух отражений (в начале линии и в МП). Расстояние от начала линии до МП вычисляют как  $l = \tau v/2$ . Применительно к отключенным линиям этот вариант называют методом *колебательного разряда*.

Второй вариант предпочтительно используется для дальних ЛЭП постоянного тока. Измеряется время между моментами прихода к началу линии фронта волны, возникшей в МП и распространяющейся по двум волновым каналам: «провод – провод» и «провод – земля» со скоростями соответственно  $v_{п.з}$ ,  $v_{п.п}$ ; при этом

$$\Delta t \approx l (1/v_{п.з} - 1/v_{п.п}).$$

*Низкочастотные* методы включают в себя как дистанционные (петлевые, емкостные, по параметрам аварийного режима), так и топографические (индукционные, контактные) методы.

*Петлевой* метод основан на измерении сопротивления участков жил кабеля в схеме уравновешенного моста постоянного тока. Применяется для определения зоны повреждения при замыкания жилы на оболочку кабеля. Использование метода возможно лишь в тех случаях, когда жила с поврежденной изоляцией не имеет обрыва и при наличии в данном (или соседнем) кабеле хотя бы одной «здоровой» жилы. Однако петлевой метод дает сравнительно большие ошибки, зависящие от точности приборов и данных о параметрах кабеля (длина, сечение и удельное сопротивление жил), от наличия вставок и пр. Поэтому метод находит ограниченное применение, в частности, при большом переходном сопротивлении в МП (например, когда кабель находится в воде).

Для определения зоны повреждения при обрывах жил кабеля может применяться *емкостный* метод. При этом к чистому обрыву относят не только механический разрыв, но и случаи, когда переходное сопротивление в МП превышает 20 МОм. Так, если плотный контакт между концами кабеля в соединительной муфте нарушается (например из-за сокращения длины кабеля при сильном морозе), кабельная масса перегревается, плавится и, затекая, изолирует жилы кабеля друг от друга.

В принципе аналогичный петлевому, емкостный метод отличается тем, что измеряется не омическое сопротивление участков кабеля, а их емкость, значение которой также предполагается пропорциональным длине кабеля. Когда переходное сопротивление в МП велико (больше 20 МОм, обрыв), то емкость может быть измерена на постоянном токе. С этой целью участок поврежденного кабеля заряжается от аккумуляторной батареи и сразу же разряжается через гальванометр, отклонение стрелки которого будет пропорционально емкости кабеля, при условии, конечно, что сечение кабеля на всей длине участка одинаково. Если переходное сопротивление меньше 20 МОм, но больше 5 кОм, то измерение производят мостом переменного тока. При меньших значениях сопротивления точность метода резко снижается.

*Параметрами аварийного режима* (ПАР) называют токи и напряжения, измеренные во время КЗ. Чаще всего используются их составляющие нулевой или обратной последовательности. ОМП по этим параметрам производится в сетях с глухозаземленной нейтралью (напряжением 110 кВ и выше) при всех видах КЗ и в сетях 6 – 35

кВ при междуфазных КЗ. Расстояние до МП определяется при этом с помощью специализированных приборов.

Из *топографических* методов наиболее распространенным является *индукционный*, применяемый и на ВЛ, и на КЛ. Принцип его основан на улавливании магнитного поля, создаваемого протекающим по линии током промышленной или звуковой частоты (50 или 800...1200 Гц). Оператор с переносным приемным устройством передвигается вдоль линии, фиксируя изменение магнитного поля с помощью индукционной рамки, усилителя и индикатора. К индукционным устройствам относят также и направленные (фазочувствительные) устройства, содержащие датчики электрического поля (антенны).

К *контактным* методам принадлежат акустические, потенциальные и электромеханические. Сущность *акустического* метода заключается в прослушивании с поверхности земли звуковых колебаний, возникающих при электрическом разряде в изоляции МП. Применяется обычно на коротких кабелях или для уточнения МП в зоне, установленной одним из дистанционных методов. Оператор перемещается в этой зоне с акустическим датчиком и определяет место максимального уровня принимаемого сигнала. Датчик пьезо- или электромагнитной системы преобразует механические колебания грунта в электрические сигналы, поступающие затем на вход кабелеискателя. Источник питания для создания искрового разряда подключается на конце КЛ.

*Потенциальные* методы основаны на измерении разности потенциалов между точками, расположенными на расстоянии 1...1,5 м друг от друга вдоль трассы кабеля. Оператор перемещается по трассе с двумя контактными стержнями или пластинами, не изменяя их взаимного расположения. Разность потенциалов измеряется в первом случае непосредственно, во втором – через емкость пластин. Потенциалы снимаются либо с поверхности земли, либо с оболочки кабеля, что дает более точные результаты. Место повреждения находят по резкому изменению разности потенциалов над ним. Используют как постоянный ток, так и переменный низкой частоты.

*Электромеханические* методы предусматривают фиксацию усилий, которые токи КЗ создают в датчиках, расположенных вблизи линии.

### **5.3.2. Прожигание изоляции в месте повреждения.**

#### **5.3.2.1. Процесс прожигания.**

Большинство методов ОМП требует, чтобы переходное сопротивление в МП было достаточно малым – до десятков, единиц и даже долей ом – в зависимости от применяемого метода. Снижение переходного сопротивления достигается прожиганием изоляции кабеля в месте повреждения (пробоя). Кроме того, прожигание позволяет перевести однофазное замыкание в двухфазное, что облегчает поиск МП индукционным методом

Прожигание осуществляется за счет энергии, выделяющейся в канале пробоя при протекании электрического тока от постороннего источника: изоляция в МП обугливается, создается угольный мостик и переходное сопротивление снижается до десятков ом. Для дальнейшего снижения сопротивления необходимо создание не угольного, а металлического мостика. Это достигается при токах в несколько десятков ампер за счет выплавления металла с поверхности жил и оболочки кабеля. Для некоторых

способов ОМП (например, акустического) проводящий мостик бывает необходимо разрушить.

В зависимости от места повреждения изоляции процесс прожигания протекает различно.

При повреждении в целом месте процесс идет спокойно и сопротивление уменьшается до нескольких десятков ом за 5...10 мин. Когда МП находится в воде или мокром грунте, процесс также протекает спокойно, сопротивление уменьшается до нескольких килоом и в дальнейшем не изменяется. Прожигание в муфтах длится дольше обычного, сопротивление колеблется в широких пределах. Если по истечении 2...3 часов сопротивление не уменьшится до требуемого значения, прожигание следует прекратить.

КПД прожигания показывает, какая часть энергии выделяется в МП, а какая расходуется в самой установке. Мощность прожигания характеризует скорость протекающего процесса, т.е. производительность труда при ОМП.

Прожигание можно производить как постоянным, так и переменным током.

### 5.3.2.2. Прожигание от источника постоянного тока.

На начальном этапе емкость кабеля (С) заряжается от источника питания через его внутреннее сопротивление ( $R_0$ ). Напряжение, приложенное к изоляции, возрастает до напряжения пробоя МП по закону экспоненты с постоянной времени  $R_0C$ . После пробоя емкость кабеля разряжается через сопротивление проводящего мостика ( $R_m$ ), в первом приближении также по экспоненте, но с постоянной времени  $R_mC$ . Сопротивление  $R_m < R_0$  и потому заряд емкости происходит дольше, чем разряд (рис.5.6). Период повторения разрядов в начале процесса составляет (3...5)  $R_0C$ .

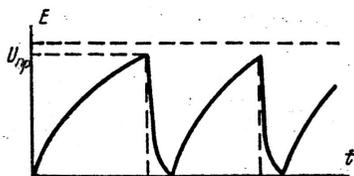


Рис.5.6. Напряжение на разрядном канале при прожигании изоляции кабеля постоянным током

После пробоя максимальное значение установившегося напряжения на проводящем мостике будет

$$U_m = E \frac{R_m}{R_m + R_0} = \frac{E}{1 + R_0 / R_m},$$

$$\text{а КПД } \eta = \frac{U_m}{E} = \frac{1}{1 + R_0 / R_m},$$

где  $E$  – ЭДС источника питания.

Из этих выражений видно, что, например, при  $R_m = 0,2 R_0$  максимальное напряжение будет  $U_m = E/6$ , а КПД соответственно 16,6%. Повысить эти показатели можно путем уменьшения внутреннего сопротивления источника питания: так, при  $R_0 = R_m$  получим значения  $E/2$  и 50%.

Уменьшить сопротивление  $R_0$  можно следующими путями:

применить установку высокого напряжения с малым внутренним сопротивлением, то есть весьма большой мощности;

после снижения напряжения разряда с помощью установки высокого напряжения, подключить другой источник – с меньшим напряжением и внутренним сопротивлением;

выполнить источник питания многоступенчатым. Переход с одной ступени на другую обеспечивает уменьшение внутреннего сопротивления источника, повышение напряжения и КПД прожига.

Реализация первого способа связана с чрезмерным увеличением габаритов и массы установки, поэтому практическое применение нашли два других способа. Установка МКС Мосэнерго содержит генератор звуковой частоты и два полупроводниковых выпрямителя. Прожигание начинают с помощью выпрямителя на номинальное напряжение 60 кВ, и когда напряжение на кабеле снизится до 15 кВ, параллельно с ним подключают выпрямитель на 10 кВ. После того как напряжение пробоя снизится до 10 кВ, первый выпрямитель отключают. При снижении напряжения до 5 кВ обмотки питающего трансформатора второго выпрямителя переключают с последовательного соединения на параллельное и ведут прожигание на токе около 3 кА. Если требуется получить металлическое соединение в МП, производят дожигание с помощью генератора звуковой частоты.

Установка КВГ – 601 (Германия) позволяет вести прожигание 5-ю ступенями от трансформаторов на 110, 25, 4 и 0,7 кВ. Переключение ступеней производится с помощью специального коммутатора без разрыва цепи нагрузки.

В установке Харьковэнерго трехфазное напряжение сети преобразуется в переменное прямоугольной формы частотой 1000 Гц, которое повышается и после выпрямления подается на кабель.

Для повышения эффективности прожигания между источником постоянного напряжения и поврежденным кабелем целесообразно вводить индуктивность (рис. 5.7). При возникновении в такой схеме колебательного режима напряжение на кабеле может достигать двойного напряжения источника, а КПД 80...90%.

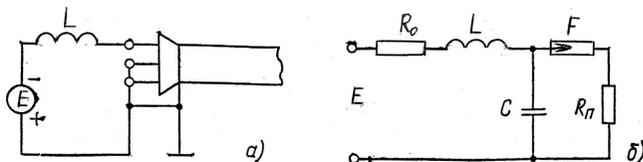


Рис. 5.7. Схема прожигания изоляции от источника постоянного тока с последовательно включенной индуктивностью

В схеме Новочеркасского политехнического института запасенная в индуктивности энергия расходуется на заряд конденсатора. Когда напряжение на кабеле превысит напряжение пробоя, происходит разряд емкости через МП.

Установка Башкирэнерго содержит батарею конденсаторов, включенную последовательно со вторичной обмоткой трансформатора. Регулирование производится путем перераспределения напряжения на индуктивности и емкости при изменении индуктивности обмотки. Прожигание осуществляется тремя ступенями током от 0,6 до 10 А при напряжении от 10 до 1 кВ.

В сходной по составу установке (Башэлектромонтаж) применена батарея конденсаторов из 8 секций, которые коммутируются автоматическими выключателями. Здесь в контуре секция конденсаторов – вторичная обмотка трансформатора возникает резонанс, при котором выходное напряжение возрастает до двойного номинального напряжения трансформатора, происходит пробой и обеспечивается устойчивое горение дуги. Процесс прожигания длится не более 3...5 минут. Дожигание производится постоянным током, значение которого от 10 А и выше устанавливается с помощью тиристорного регулятора.

Аппарат, разработанный в ПНУ «Казэлектромонтаж», имеет ту особенность, что для усиления импульса тока прожигания используется емкость второй фазы кабеля.

В схему установки Тулэнерго введены блок умножения напряжения, разрядник и катушка индуктивности. Разрядник служит для разрушения проводящего мостика между жилой и оболочкой, а индуктивность препятствует восстановлению электрической прочности изоляции в МП. Ток первой стадии прожигания 0,2 А (25 кВ от умножителя), наибольший ток дожигания 200 А (220 В от сети).

Прожигающая установка УП-7 (ЛВИ-2, ЛВИ-3) Холдинговой компании «ЭМЗ» (г. Ярославль) предназначена для прожигания поврежденной изоляции силовых КЛ при ОМП индукционным или акустическим способом. Предусмотрено 6 ступеней ручного переключения ступеней напряжения прожига – от 0,17 кВ (ток 65 А) на переменном и до 22 кВ (ток 0,55 А) на постоянном токе.

Выпускаемые серийно и применяемые на практике установки для прожига различаются по мощности и массогабаритным показателям в широких пределах – от нескольких киловольтампер, десятков килограмм и выше на порядок и более.

### ***5.3.2.3. Прожигание изоляции на переменном токе.***

#### ***Нерезонансный режим.***

В этом режиме прожигание производится с помощью повышающего трансформатора, вторичная обмотка которого присоединяется непосредственно к поврежденной жиле и оболочке кабеля или другой поврежденной жиле, а первичная – к сети переменного тока промышленной частоты. Но при больших значениях напряжения пробоя и емкости кабеля требуется большой ток и, следовательно, высокая мощность (десятки киловольтампер) повышающего трансформатора.

Расчеты показывают, что для кабелей длиной более 0,5 км нерезонансное прожигание на начальном этапе нерационально. Когда же в МП образуется проводящий мостик, условия для прожигания улучшаются и удается обеспечить КПД 20...30%. При этом для кабелей длиной более 0,3 км переходное сопротивление не должно превышать 100 Ом, а длиной более 2 км – 15 Ом.

*Резонансное прожигание на промышленной частоте.*

В этом режиме емкостное сопротивление кабеля компенсируется индуктивным сопротивлением трансформатора или регулируемого дросселя. Оба варианта реализуются в режиме резонанса токов или резонанса напряжений, при этом собственная частота резонансного контура равна частоте питающей сети.

В режиме *резонанса напряжений* ток в контуре ограничивается только активным сопротивлением контура. Напряжение на кабеле превышает напряжение питания в  $Q$  раз, где  $Q$  – добротность контура. При низкой добротности мощность, выделяемая в разрядном канале, может оказаться недостаточной для прожига.

В режиме *резонанса токов* напряжение на емкости кабеля равно напряжению источника питания. Эффективность прожигания, энергетические и временные соотношения в обоих режимах примерно одинаковы, но существенно отличаются условия работы питающего трансформатора после пробоя изоляции: при резонансе напряжений трансформатор переходит в режим холостого хода, при резонансе токов – в режим короткого замыкания, когда КПД установки резко снижается.

#### 5.3.2.4. Прожигание изоляции с помощью аппаратов типа РА (РА-2М, РА-3).

В практике пусконаладочных организаций широкое распространение получили резонансные трансформаторы со сравнительно небольшими массой и габаритами. Они обеспечивают эффективное прожигание МП кабеля при напряжении пробоя до 10...14 кВ (действующее значение).

Трансформатор такого типа имеет стержневой магнитопровод с первичной (сетевой)  $L1$  и вторичной  $L2$  обмотками со слабой магнитной связью. Резонансный контур создается из емкости  $C$  жилы кабеля и индуктивности обмотки  $L2$ . Напряжение на контуре можно регулировать переключением отпаек  $X1$  и  $X2$  трансформатора и изменением емкости  $C$  (рис. 5.8). Если емкость одной жилы кабеля оказывается недостаточной, параллельно с поврежденной жилой можно включить две здоровые.

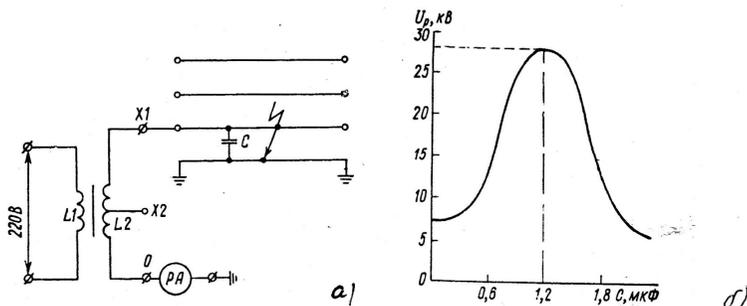


Рис.5.8. Прожигание изоляции поврежденной жилы кабеля с помощью резонансного трансформатора: а) схема прожигания; б) зависимость напряжения резонансного контура от емкости

Емкость резонансного контура подбирают так, чтобы возбуждаемое на кабеле напряжение было больше напряжения пробоя. Значение емкости кабеля можно приблизительно рассчитать по формуле

$$C = k_{cx} C_{уд} l,$$

где  $k_{cx}$  – коэффициент, зависящий от схемы соединения жил и оболочки кабеля (рис.5.9);  $C_{уд}$  – удельная емкость (табл.5.3 и др.) и  $l$  – длина кабеля.

В условиях резонанса напряжение на выходе РА достигает 25 кВ при максимальной потребляемой из сети мощности 20 кВт и токе в первичной обмотке L1 до 70 А.

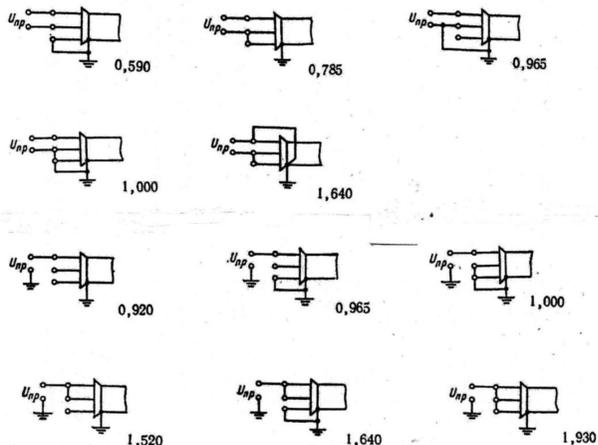


Рис. 5.9. Схемы соединения жил и оболочки кабеля и значение коэффициента  $k_{cx}$

При напряжении пробоя 10...15 кВ действ. и емкости 0,8... 1,6 мкФ пробой достигается за 3...5 периодов переменного тока, прожигание происходит с периодическими разрядами. При напряжении пробоя 8...10 кВ прожигание можно вести в режиме, близком к резонансу токов как на основном выводе (при  $C = 0,4...0,8$  мкФ), так и на отпайке ( $C = 1...2$  мкФ). После того как трансформатор перешел в режим КЗ и ток установился на уровне 1...2 А, рекомендуется перейти на прямое (нерезонансное) дожигание непосредственно от сети, используя обмотку L1 в качестве реактора и закоротив обмотку L2. Переходное сопротивление в МП доводится таким путем до 20...30 и даже до единиц ом.

Необходимо иметь в виду, что режимы, близкие к резонансу, являются наиболее тяжелыми по нагреву трансформатора. Допустимую длительность включения  $t_{доп}$  принимают в зависимости от тока  $I_2$  во вторичной цепи трансформатора:

$I_2$ , А	12	8	6	5	4	3	2	1
$t_{доп}$ , мин	1	2,5	5	7	11	15	30	120

За контрольное значение тока при периодических разрядах принимают среднее из максимального и минимального показаний амперметра в данный период колебаний.

### 5.3.2.5. Выводы и рекомендации.

Наиболее эффективным является прожигание на постоянном токе от идеального (с пренебрежимо малым внутренним сопротивлением) источника тока с последовательно включенной индуктивностью. Таким источником можно считать емкостный накопитель энергии с трехфазным выпрямителем для его заряда.

Установки постоянного тока с индуктивным накопителем энергии несколько менее эффективны из-за большей длительности заряда и необходимости применения коммутатора.

Устройства переменного тока эффективны при низких значениях пробивного напряжения. Обугливание в МП и уменьшение переходного сопротивления происходит на переменном токе медленнее, чем на постоянном. Основное преимущество резонансного метода состоит в уменьшении мощности и габаритов прожигательной установки.

Можно рекомендовать ряд наиболее рациональных приемов прожигания.

*Чередование ступеней прожигания.* По мере снижения напряжения пробоя следует переходить на другую ступень с меньшим внутренним сопротивлением источника питания и большим значением тока прожигания. Если при этом происходит запыление пробоя и подъем пробивного напряжения, следует вернуться к предыдущей ступени и повторить операцию. Задерживаться на какой – либо ступени нецелесообразно.

Если повторение пробоев не приводит к снижению напряжения пробоя, можно предположить, что пробой произошел в соединительной или (реже) концевой муфте. В этом случае прожигание прекращают и приступают к определению МП.

*Ограничение тока прожигания.* Когда образование металлического сая нежелательно, ток прожига ограничивают до нескольких ампер. В этом случае последние ступени прожигания не используют.

*Разрушение металлического сая.* Разрушить металлический мостик между жилой и оболочкой можно импульсами постоянного тока. С этой целью заряженный от высоковольтного выпрямителя конденсатор емкостью 1...1,5 мкФ подключают к месту пробоя через разрядник с пробивным напряжением 20...25 кВ. При разряде бросок тока достигает нескольких сотен ампер, а динамические усилия – таких значений, при которых спай может быть разрушен. Если повторение пробоев в течение 10...30 мин не приводит к желаемому результату, увеличивают емкость конденсатора или напряжение разряда.

*Перевод однофазного замыкания в двухфазное* (рис. 5.10).

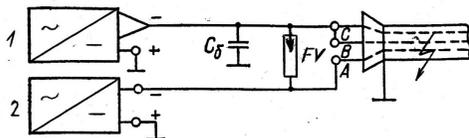


Рис.5.10. Принципиальная схема прожигания изоляции кабеля для перевода замыкания жилы на оболочку в замыкание между жилами

При прожигании изоляции жилы А напряжением 5...10 кВ от выпрямителя 2 между ней и оболочкой кабеля создается металлический мостик. К этой жиле через разрядник FV (напряжение пробоя 20...25 кВ) подключают импульсный узел, состоящий из выпрямителя высокого напряжения 1 и емкости двух неповрежденных жил В и С относительно оболочки и балластного конденсатора. Емкость периодически заряжается до напряжения пробоя разрядника, и импульс тока разряда разрушает мостик. Периодическое создание и разрушение спая увеличивает объем разрушения изоляции и способствует пробоям с жил В и С на поврежденную. Наступление пробоя характеризуется прекращением роста напряжения и срабатывания разрядника.

### 5.3.3. Передвижные установки для испытания КЛ.

Возможности применения переносных испытательных установок, особенно в полевых условиях, ограничены их массой и габаритами. В энергосистемах и наладочных организациях получили распространение передвижные испытательные установки, которые монтируются на шасси микроавтобусов, автобусов и грузовых автомобилей. Кузов таких автомашин разделяется перегородкой или пультом на высоковольтное отделение и отсек оператора. Большинство их обеспечивает прожигание изоляции постоянным током, обязательно в несколько ступеней.

Для электропитания аппаратуры в полевых условиях предусматриваются автономные источники (электрогенератор с приводом от собственного двигателя внутреннего сгорания или от коробки отбора мощности автомобиля). Имеются специальные барабаны с высоковольтным проводом для присоединения к испытываемому кабелю. Электробезопасность обеспечивается с помощью блокировочных контактов, ограждений, индивидуальных защитных средств.

Компания «ЭМЗ» (г. Ярославль) выпускает широкий спектр испытательного оборудования. В серии ЛВИ НVT представлены 84 типа высоковольтных лабораторий разного функционального назначения.

Лаборатории высоковольтных испытаний типа ЛВИ предназначены для испытаний электроустановок и ОМП кабелей с использованием оборудования предварительной и точной локализации МП. Измеряются емкость и тангенс угла диэлектрических потерь, сопротивление изоляции и заземляющих устройств, параметры холостого хода и короткого замыкания трансформатора. Лаборатории выпускаются в трех модификациях:

ЛВИ-1 – для испытания электрооборудования подстанций и РУ;

ЛВИ-2 (ЛВИ-2М1) – для испытаний КЛ до 10 кВ и обнаружения МП изоляции в них;

ЛВИ-3 – для проведения полного комплекса испытаний электрооборудования и определения МП силовых кабелей.

Базируются эти лаборатории на автомобилях отечественного производства (рис. 5.11). Электропитание ЛВИ осуществляется как от внешнего источника (мощность до 12 кВ·А), так и от встроенного синхронного генератора мощностью 20 кВ·А. Для измерения высокого напряжения используются прецизионный делитель и амплитудный вольтметр.

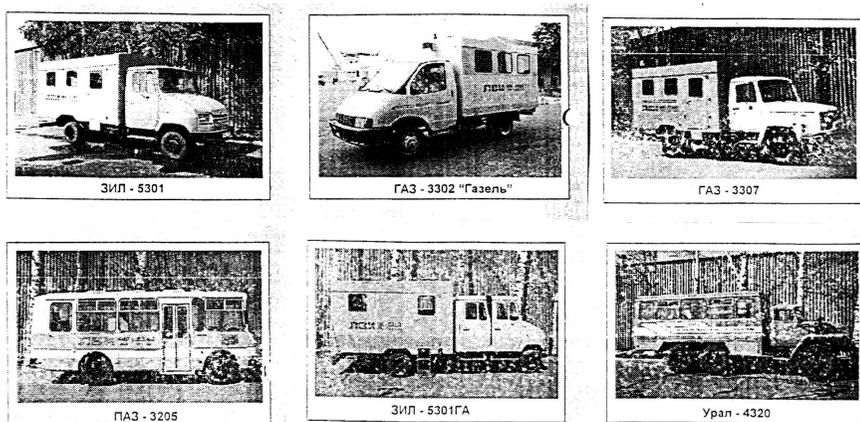


Рис. 5.11. Передвижные лаборатории высоковольтных испытаний Ярославского электромеханического завода

Установки СПЗИИ (г. Пенза) и УВЛ-03 (г. Пушкино) размещаются на автомашинах ГАЗ и УАЗ. Первая содержит автономный генератор промышленной частоты, вторая отличается возможностью получения выпрямленного напряжения 175 кВ, что позволяет испытывать кабели на 35 кВ. Обе они снабжены выпрямителями для прожига изоляции со ступенями напряжения: СПЗИИ – 1,5; 5; 10 и 25 кВ, УВЛ-0,3 – 1; 3; 6; 10 и 65 кВ. Установки содержат статический генератор звуковой частоты 800...1000 Гц, импульсные конденсаторы, кабелеискатель.

Установки аналогичного назначения, выполненные на достаточно высоком техническом и эстетическом уровне (хотя и по весьма высоким ценам), предлагают и зарубежные фирмы. Прожигательные аппараты фирмы SEBA Dynatron (ФРГ) обеспечивают как ступенчатое, так и плавное регулирование. Ток прожигания стабилизируется на заданной уставке. При внезапном уменьшении сопротивления (пробое.) в МП жилы сохраняется возможность прожигания на малых токах и предотвращается повреждение соседних жил.

Импульсная приставка состоит из генератора высокого напряжения, батареи конденсаторов и шарового разрядника. Подаются как одиночные, так и периодические импульсы с интервалом до 6 с, напряжением от 2,5 до 16 кВ. Комбинацией генератора высокого напряжения и низковольтного аппарата для прожигания можно получить максимальные значения напряжения 130 кВ и тока 110 А.

Выпускаются и передвижные установки специального назначения. Так, система «Скважина» (InterEng Messtechnik, Германия, Дрезден) предназначена для испытания и диагностики кабелей погружных электронасосов. На нефтяных скважинах общая доля отказов электропогружного оборудования по вине кабелей достигает 60%, поэтому к эффективности испытания их предъявляются повышенные требования. К системе прилагаются необходимые программные средства. Осуществляются все не-

обходимые испытания и измерения, а также прожигание высокоомных повреждений с переводом их в низкоомные.

## 5.4. Методы определения МП.

### 5.4.1. Импульсные методы ОМП.

#### 5.4.1.1. Понятие о линиях с распределенными параметрами.

Фактически параметры электрической цепи всегда распределены вдоль ее участков. Но во многих случаях можно без заметной погрешности считать, что активное и реактивное сопротивления сосредоточены в определенных точках цепи. Такое допущение справедливо, когда скорость изменения во времени напряжений и токов пренебрежимо мала по сравнению со скоростью распространения электромагнитной волны вдоль цепи. При периодических токах и напряжениях это условие означает, что волна успевает пробежать вдоль всей линии за небольшую долю периода. Если же за время пробега волны от начала до конца цепи (или обратно) токи и напряжения успевают заметно измениться, то такую цепь называют линией с *распределенными параметрами*, или *длинной линией*.

Очевидно, что токи и напряжения в таких линиях являются функциями двух параметров: времени  $t$  и длины линии  $l$ . При этом длина волны  $\lambda$  определяется формулой

$$\lambda = v/f = vT,$$

где  $v$  – скорость распространения электромагнитной волны в данной среде;  $f$  и  $T$  – соответственно частота и период напряжения (тока). Для воздуха значение скорости близко к  $v = 3 \cdot 10^8$  м/с = 300 000 км/с, для силового кабеля – почти вдвое меньше, в среднем около 160 000 км/с. К примеру, в воздухе длина волны сигнала частотой 50 Гц равна 6000 км, и, значит, воображаемую ЛЭП от Калининграда до Владивостока можно было бы считать линией с распределенными параметрами. При передаче сигналов высокой частоты (сотни килогерц и более) все реальные КЛ и ВЛ приходится считать длинными линиями: например, частоте 0,5 МГц соответствует длина волны в воздухе 600 м, в кабеле 320 м.

Линию, параметры которой распределены равномерно по ее длине, называют *однородной*. Сюда относятся, в частности, участки ВЛ и КЛ, на всем протяжении которых сечение непрерывных проводников, их взаимное расположение и характеристики среды не изменяются. В точках нарушения однородности (место повреждения, разветвления, транспозиции, соединительная муфта), называемых также *особыми* точками, возникают *отраженные* (движущиеся в обратном направлении) и *преломленные* волны. Отраженная волна возвращается к месту посылки сигнала, и по времени двойного пробега ее можно судить о расстоянии до МП.

Значение синусоидального сигнала в данной точке линии является синусоидальной функцией времени, а в каждый данный момент оно будет распределено вдоль линии также по синусоидальному закону. Такая волна напряжения перемещается по линии с постоянной скоростью  $v$  и называется *бегущей* волной. Из-за наличия активных потерь по мере продвижения вдоль линии волна затухает по показательному закону (рис. 5.12). Волны, бегущие от начала линии к ее концу, называются прямыми, или падающими, в обратном направлении – обратными, или отраженными. Каждое

значение бегущей волны в данной точке линии представляет собой сумму прямой и обратной волн. В частном случае одной из волн может и не быть.

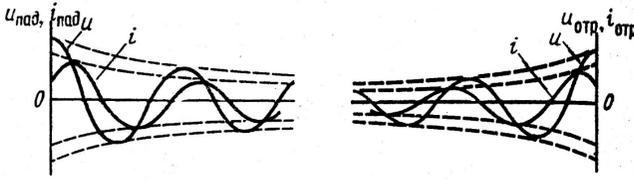


Рис.5.12. Бегущая волна в линии с потерями

**5.4.1.2. Распространение электромагнитных волн и импульсов в однопроводных линиях.**

Систему «провод – земля», «жила – оболочка кабеля» называют обычно *однопроводной*, или *одноволновой*. Параметры линии относят обычно к единице длины (1 км):

$\gamma_0$  – суммарное активное сопротивление обоих проводов;

$L_0$  – индуктивность петли, образуемой этими проводами;

$C_0$  – емкость между ними.

Волны распространяются со скоростью

$$v = 1/\sqrt{L_0 C_0} .$$

Падающая  $u_{пад}$  и отраженная  $u_{отр}$  волны напряжения возбуждают соответствующие волны тока  $i = u/Z = (u_{пад} - u_{отр})/Z = i_{пад} - i_{отр}$ , где

$$Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} - \text{волновое сопротивление линии.}$$

Вид и параметры отраженной волны зависят от типа и места расположения неоднородности линии.

а) Активное сопротивление  $R$  в конце линии. Отраженная волна пропорциональна падающей:

$$u_{отр} = u_{пад} k_{отр},$$

где  $k_{отр} = \frac{R - Z}{R + Z}$  – коэффициент отражения.

Напряжение в конце линии

$$u = iR.$$

Для короткозамкнутой линии  $R = 0$ ,  $k_{отр} = -1$ , то есть отражение напряжения происходит без искажения, но с переменной полярности..

Для линии, разомкнутой на конце,  $R \rightarrow \infty$ ,  $k_{отр} = 1$ , т.е. отражение происходит без изменения.

При  $R = Z$  коэффициент отражения  $k_{отр} = 0$ , т.е. отраженной волны не возникает; этот случай называют *согласованием* линии.

В целом по виду отраженного импульса можно судить о месте повреждения и характеристике неоднородности (рис. 5.13). Выброс вверх свидетельствует об увеличении волнового сопротивления (обрыв, наличие муфт, переход на участок кабеля с меньшим сечением жилы), выброс вниз указывает на уменьшение волнового сопротивления (КЗ, утечка, переход на большее сечение).

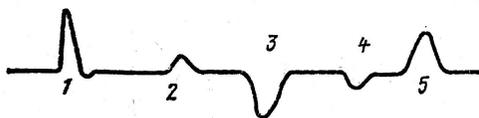


Рис.5.13. Отражение импульсов от неоднородностей линии; 1 – посылаемый импульс; 2 – муфта, переход на меньшее сечение, 3 – КЗ на оболочку; 4 – наличие впадины в кабеле; 5 – разомкнутый конец кабеля или обрыв жилы

б) Переход волны с одного провода на другой. В случае, когда волна с потенциалом  $u_{пад}$  набегает по линии с сопротивлением  $Z_1$  на линию с сопротивлением  $Z_2$ , для точки перехода будет справедливо равенство

$$u = u_{пад} \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} = u_{пад} k_{пр},$$

где  $k_{пр}$  – коэффициент преломления.

Преломленная волна сохраняет полярность падающей.

#### 5.4.1.3. Многократные отражения.

Преломленные и отраженные волны, распространяясь по линии, могут вызвать появление новых отраженных и преломленных волн. Потенциал в любой точке линии будет при этом равен сумме потенциалов всех волн.

Распространение потенциалов и токов вдоль линии зависит от характера поданного в линию сигнала. При включении разомкнутой на конце линии на постоянное напряжение вдоль нее по окончании переходного процесса устанавливается одинаковое напряжение, равное входному, а при подаче короткого импульса – равное нулю. *Коротким* условились называть такой импульс, ширина  $l_{им}$  которого удовлетворяет условию

$$l_{им} = L/m,$$

где  $L$  – длина линии,  $m$  – кратность, указывающая, на какой части линии находится импульс (обычно принимается  $m \geq 5$ ).

#### 5.4.1.4. Характерные особенности воздушных линии и силовых кабелей.

Для ВЛ характерно существенное различие скоростей распространения и коэффициентов затухания в нулевом и межпроводном каналах. Для удаленных повреждений отраженные волны практически определяются только межпроводными параметрами.

«Медленные», или «нулевые», волны распространяются по нулевому каналу со скоростью  $v_0$ , «быстрые» – по межпроводному каналу со скоростью  $v_1$ ; типовые значения этих величин приведены в табл.5.7.

Таблица 5.7

Типовые значения волнового сопротивления и скорости распространения волн в нулевом и межпроводном каналах

Линии электропередачи	Номинальное напряжение, кВ	Сопротивление, Ом		Скорость, м/с	
		$Z_0$	$Z_1$	$v_0$	$v_1$
Воздушные	35	725	387	275	
	110	675	389	«	«
Кабельные	3	30...10	15...5	152...159	160 ± 1
	6	45...14	23...7		
	10	57...19	28...10		

Свинцовая или алюминиевая оболочка кабелей почти полностью предотвращает проникновение электромагнитного поля высокой частоты (>40 кГц) во внешнее пространство, поэтому влиянием земли на параметры волновых процессов можно пренебречь.

#### 5.4.2. Выделение полезных сигналов.

При импульсных измерениях необходимо различить полезные сигналы, т.е. отраженные от места повреждения, и сигналы, отраженные от неоднородностей линии. Полезный сигнал должен быть выделен таким способом, чтобы он был доступен для обработки.

##### 5.4.2.1. Способ переменного усиления.

Возможны три режима усиления импульсов: а) линейное, не зависящее от времени; б) усиление с ограничением, не зависящее от времени, и в) усиление, изменяющееся во времени по заданному закону. В первом случае амплитудные соотношения между различными импульсами на выходе усилителя остаются такими же, как и на входе, во втором – все импульсы становятся одинаковыми по амплитуде. Если же усиливать импульсы по закону, обратному закону затухания импульсов, можно выделить полезный сигнал как наибольший по амплитуде, поскольку коэффициент отражения в МП всегда больше, чем в неоднородностях.

##### 5.4.2.2. Изменение схемы включения искателя повреждений (ИП).

Возможны различные варианты подключения ИП к проводам ЛЭП.

а) Генератор и приемник (усилитель) сигналов искателя присоединены к одним и тем же проводам линии. При удаленном (более 30 км) КЗ, когда существенное значение имеют лишь межпроводные составляющие, включение прибора по схеме «провод – земля» обеспечивает меньший отраженный импульс, чем по схеме «провод – провод».

б) Локационные приборы (ИКЛ-5, P5-1А, P5-5 и т.п.) позволяют включать генератор и приемник импульсов раздельно. Этим обеспечивается получение значительно большей амплитуды отраженного импульса, чем подключение к поврежденному и неповрежденному проводникам. Во всех случаях при изменении схемы включения прибора амплитуда и полярность импульсов также изменяются (табл. 5.8).

Таблица 5.8

Виды повреждений ЛЭП и характеристики сигналов

Вид повреждения	Схема включения искателя повреждения	Характеристика сигналов
Однополюсное КЗ (однополюсный обрыв)	1. Поврежденный провод – земля 2. Поврежденный провод – неповрежденный провод  3. Между двумя неповрежденными проводниками 4. Генератор – к поврежденному проводу, приемник – к неповрежденному.	Волновые картины и полярность отраженных импульсов в МП одинаковы при схемах 1 и 2. При близких повреждениях полезный сигнал больше в схеме 1, при удаленных – по схеме 2. Отражение от МП практически отсутствует. Отраженный от МП импульс существенно меньше, чем для схем 1 и 2, полярность противоположная
Двухполюсное КЗ (обрыв)	1. Между двумя поврежденными проводниками  2. Поврежденный провод – неповрежденный провод 3. Неповрежденный провод – земля 4. Генератор к одному, приемник – к другому поврежденному проводу.	Отражение в МП максимально по амплитуде, по полярности противоположно зондирующему импульсу при КЗ и обрыве. Отражение в МП существенно меньше. Отражение в МП отсутствует.  Отраженный в МП импульс меняет полярность по сравнению со сх. 1
Трехполюсное КЗ (обрыв)	1, 2, 3: провод – земля 4, 5, 6: провод – провод 7: три провода – земля	Полярность отражений одинакова Отраженный импульс наибольший Отраженный импульс наименьший

Полезный сигнал нетрудно выделить путем сравнения картин отражения в поврежденной и исправной линиях. При этом желательно, чтобы амплитуда отраженного сигнала составляла не менее одной пятой размера экрана.

**5.4.2.3. Погрешности.**

Методические погрешности связаны в основном с деформацией контрольного импульса. Погрешность  $\Delta t$  в отсчете момента времени прихода импульса  $u(t)$  зависит от погрешности  $\Delta u$  фиксации определенного уровня напряжения (рис.5.14). Соответствующая погрешность в определении расстояния будет:

$$\Delta l = \frac{v}{2} \Delta t .$$

Чем круче фронт импульса, тем меньше погрешность измерения. С увеличением длины пробега крутизна импульса уменьшается в десятки и сотни раз.

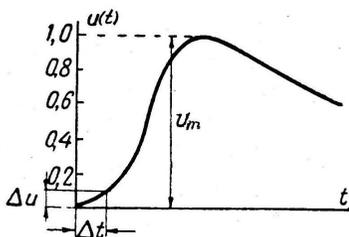


Рис. 5.14. К образованию погрешности при отсчете начальной точки фронта импульса.

Крутизна импульса на выходе усилителя возрастает с увеличением усиления, а также длительности импульса. При определении временного положения начальной точки импульса желательно применять максимальное усиление с ограничением. Практически погрешность напряжения  $\Delta u = (0,05 \dots 0,15)U_m$ , в среднем  $0,1U_m$ .

### 5.4.3. Подавление помех.

#### 5.4.3.1. Неавтоматические искатели повреждений.

На отключенных КЛ существенные электрические помехи отсутствуют. Наводки потенциалов промышленной частоты, достигающие нескольких киловольт, возможны на ошиновке и сборках, к которым присоединен кабель. Помехи создаются и высокочастотными сигналами, которые передаются по ВЛ. Кратковременные импульсные помехи практического влияния на измерения не оказывают.

Простейшая схема подавления наведенного напряжения показана на рис.5.15. К проводу 1 линии подсоединяется заземляющий дроссель 2 индуктивностью несколько миллигенри. На вход прибора 3 подключается конденсатор 4 емкостью  $0,1 \text{ мкФ}$ , так что при входном сопротивлении прибора  $300 \text{ Ом}$  напряжение помехи ослабляется в 100 раз. Для обеспечения безопасности устанавливается разрядник 5.

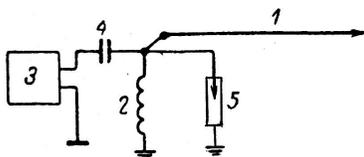


Рис.5.15. Схема подавления наведенного напряжения промышленной частоты на отключенном проводе ВЛ

Для подавления помех от высокочастотных каналов вход измерителя шунтируется фильтрами.

### **5.4.3.2. Автоматические искатели повреждений.**

Импульсные помехи.

а) Помехи от дуги в месте КЗ. Эти помехи наиболее существенны, так как автоматические измерения производятся именно в период горения дуги. Сразу после возникновения дуги 3...4 мс практически непрерывно идут помехи высокого уровня. Далее, как правило, каждые полпериода, следуют небольшие пики, а после отключения высоковольтного выключателя вновь появляются непрерывные помехи высокого уровня.

Очевидно, что в первые 4 мс, как и в период отключения, посылать зондирующий или хронизирующий импульс нецелесообразно. Временной интервал для измерений выбирают между этими двумя сериями непрерывных помех; он может длиться от единиц до нескольких десятков периодов. Чтобы исключить фиксацию в интервале измерений пика помехи, посылают импульсы либо многократно, либо с задержкой после АПВ.

б) Коммутационные помехи. Они достаточно велики, однако возможность их появления в интервале измерения крайне мала и с нею можно не считаться.

### **5.4.4. Импульсные искатели повреждений.**

#### **5.4.4.1. Неавтоматические локационные искатели.**

**Структурные схемы.** Отсчет результата измерения осуществляется по масштабу линии развертки или по положению калиброванной задержки развертки (рис. 5.16). В приборах первого типа (ИКЛ-5, P5-1A и т.п.) генератор тактовых импульсов вырабатывает короткие пусковые импульсы, которые запускают одновременно генератор зондирующих импульсов, задержку развертки и генератор масштабных меток времени (рис. 5.16,а). Оператор сначала выводит до нуля задержку развертки и наблюдает на экране ЭЛТ зондирующий импульс, затем вводит развертку и отсчитывает число масштабных меток до отраженного импульса. В некоторых приборах отсчет ведется по калиброванной линии развертки, но точность измерений в этом случае снижается из-за нелинейности развертки.

В приборах второго типа (P5-5, P5-9 и т.п.) осуществляется задержка поступления и развертки выходного импульса по отношению к тактовому на время  $t_{з,п}$ , а запуск генератора зондирующих импульсов – на время  $t_{з,г}$  (рис. 5.16,б). Изменяя задержку развертки, жестко связанную со шкалой прибора, совмещают отраженный импульс с началом развертки (нулевой масштабной меткой) и измеряют временной интервал

$$\Delta t = t_{з,п} - t_{з,г} \text{ (рис.5.16,в).}$$

Этот принцип обеспечивает более высокую точность, так как отсчет не зависит от линейности развертки и производится непосредственно по шкале (вместо подсчета меток).

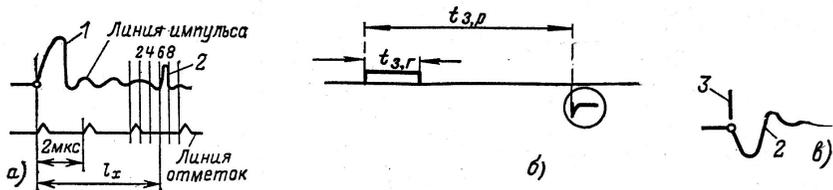


Рис. 5.16. Временные диаграммы работы локационных искателей типов:  
 а) ИКЛ-5, P5-1, P5-1А (обрыв); б, в) P5-5 (КЗ);  
 1 – зондирующий импульс; 2 – отраженный импульс; 3 – совмещение отраженного импульса с нулевой масштабной меткой

### Технические данные отдельных импульсных приборов.

Приборы типов **ИКЛ-5, P5-1, P5-1А** отличаются друг от друга лишь некоторыми элементами схемы и конструкции. Прибор P5-1А позволяет определить расстояние до места повреждения ВЛ – до 300 км, КЛ – до 10 км. Гарантируемая погрешность измерения не более  $\pm 1,5\%$  длины линии. Потребляемая мощность 200 Вт, масса 23 кг.

Прибор имеет три диапазона: для ВЛ, для КЛ и промежуточный. Инструментальная погрешность искателя обусловлена в основном следующими факторами: нестабильностью частоты генератора масштабных меток (не лучше 0,1%), нелинейностью развертки (около 10% длины линии) и неидеальностью фронтов синхронизирующих импульсов. В итоге гарантируемая изготовителем погрешность превышает, в связи с чем не рекомендуется использовать прибор для КЛ длиной менее 200 м.

Прибор **P5-5** выполнен на полупроводниковых элементах, имеет малое собственное потребление, масса его 8 кг. Полная погрешность измерения времени не превышает значения

$$\Delta t = (0,10 \dots 0,15) t_{\text{изм}} + 0,1\% t_{\text{м.з}}$$

где  $t_{\text{изм}}$  – измеренный временной интервал;

$t_{\text{м.з}}$  – максимальное значение калиброванной задержки развертки;  $t_{\text{м.з}} = 100, 400$  или 1600 мкс (в зависимости от диапазона).

Так, например, при  $t_{\text{изм}} = t_{\text{м.з}} = 100$  мкс максимальная погрешность по времени составит 0,25 мкс, а по расстоянию (для КЛ)

$$\pm \Delta l = v \cdot \Delta t = 160 \cdot 10^6 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} / 2 = 20 \text{ м,}$$

тогда как в приборе P5-1А эта величина составила бы 120 м.

Для обнаружения МП с большим переходным сопротивлением, когда отраженный импульс очень мал, применяют приставку к прибору P5-5, которая позволяет сравнивать импульсные характеристики поврежденной и неповрежденной жил и тем самым облегчить поиск. При отыскании приборами P5-1А и P5-5 МП на близком расстоянии от конца кабеля, а также при наличии сильных электрических полей можно под-

ключить искусственные линии задержки, например из провода РК-19. На коротких расстояниях более точные результаты обеспечивают измерители неоднородностей типов Р5-8, Р5-9.

Приборы фирмы «ФЕБ Функцион Дрезден» основаны на отсчете результата измерения по сумме времен калиброванной задержки развертки и калиброванной развертки ЭЛТ.

Дальность действия универсального измерителя ФОГ-201 составляет 16,6 км для КЛ и 200 км для ВЛ. Питание – от сети переменного тока, потребляемая мощность 120 В·А, масса 13 кг. Максимальная погрешность для КЛ  $1,25\% \pm 0,1$  мкс, для ВЛ  $1,25\% \pm 100$  м. Грубый отсчет производят после установки задержки развертки, уточняющий – с помощью масштабной сетки по расстоянию на линии развертки.

Прибор типа СМЕ-110 предназначен для КЛ длиной до 9 км. Потребляет около 10 Вт от батареи или 25 В·А от сети переменного тока; масса 6 кг.

Отсчет результата измерения ведется по калиброванной линии развертки. Высокая разрешающая способность позволяет при длительности зондирующего импульса 0,02 мкс определить МП, удаленное всего на несколько метров от прибора.

#### 5.4.2.2. Автоматические локационные искатели повреждений.

Структурная схема автоматического локационного искателя представлена на рис.5.17.

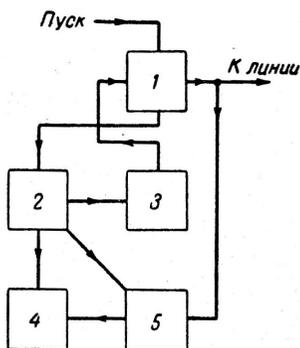


Рис.5.17. Структурная схема автоматического локационного искателя повреждений: 1 – блок управления; 2 – блок синхронизации; 3 – генератор зондирующих импульсов; 4 – измерительное устройство; 5 – приемно-регулирующее устройство

При возникновении повреждения запускается блок управления 1, а от него – блок 2, синхронизирующий работу генератора зондирующих импульсов 3, измерительного устройства 4 и приемно – регулирующего устройства 5, в котором производится автоматическая регулировка амплитуды отраженных от МП сигналов. Устройство 4 фиксирует интервал времени между зондирующим и отраженным импульсами, пропорциональный расстоянию до МП.

Локационные искатели с *однократным зондированием* линии. В искателе АИИП-1 блок управления подключает устройство к проверяемой линии и освобождает шторку фотоаппарата. В момент полного открытия объектива замыкается цепь пуска генератора зондирующих импульсов. После однократного пробега луча по экрану ЭЛТ шторка закрывается. При использовании цифровой фотосъемки отсчет производится с помощью монитора, в других модификациях применяется поляроидная камера, а показания снимаются посредством электронного счетчика.

Локационные искатели с *многократным зондированием* обеспечивают наиболее эффективную отстройку от помех. Они различаются способом фиксации интервала времени между зондирующим и отраженным импульсами. Здесь одновременно с блоком, определяющим время зондирования линии, запускается блок синхронизации, вырабатывающий тактовые импульсы для запуска генератора зондирующих импульсов и устройства записи посылаемого и отраженных импульсов.

В искателе английской фирмы «Ферранти» результат измерения фотографируется с экрана ЭЛТ, в искателе Fп (Япония) – записывается на магнитный барабан и воспроизводится с помощью осциллографа. В приборе P5-7 (Россия) отсчет снимается непосредственно с экрана ЭЛТ.

Отечественными предприятиями освоено производство нового поколения импульсных локационных (рефлектометрических) приборов. В портативном рефлектометре РЕЙС-105Р полученная информация о расстоянии до МП или неоднородности линии может быть переписана из прибора в компьютер и обратно; возможно полное управление прибором от РС. Диапазон измеряемых расстояний от 1,5 м до 25, 6 км, инструментальная погрешность 0,2%, масса 0,7 кг.

Малогабаритный импульсный рефлектометр РИ-10М (ИР-10М) НПФ «Диполь» предназначен для работы как в полевых, так и в стационарных условиях на кабелях длиной до 20 км, с волновым сопротивлением от 20 до 200 Ом. Функциональные особенности прибора:

- измерение расстояний в реальном масштабе времени ;
- цифровая индикация расстояний до заданного участка рефлектограммы, отображаемой на экране ЖК-дисплея;
- возможность сохранения и просмотра рефлектограммы в памяти прибора;
- возможность обмена данными с компьютером.

Питание прибора – от сети переменного тока через адаптер или от встроенного аккумулятора; масса прибора с аккумулятором 2 кг. Укладочная сумка защищает прибор от осадков и ударов при переноске и обеспечивает полную доступность к органам управления прибора при работе в полевых условиях.

*Подключение* локационного искателя к проводам линии осуществляется одним из двух способов: 1) с автоматическим переключением от фазоизбирательных устройств РЗ и 2) с фиксированным отключением. Генератор импульсов подключается через конденсатор связи, приемник – с помощью антенн, емкостных делителей и др.

Посылка и прием импульсов только по одному проводу резко ухудшает соотношение сигнал/помеха; по крайней мере прием импульсов должен производиться от трех проводов.

### 5.4.3. Волновые искатели повреждений.

#### 5.4.3.1. Автоматические волновые искатели.

В автоматических ИП с *предварительными хранирующими* сигналами «ведомый» счетчик работает синхронно с «ведущим». Приход фронта волны от места повреждения останавливает оба счетчика и выполняется отсчет. При поступлении случайного импульса (например, блуждающей волны) автоматически производится сброс показаний и последующая синхронизация. Если сработала защита, сброс не происходит.

В автоматических ИП с *последующими хранирующими* сигналами приход волны от МП запускает счетчик на «главном» конце линии и блок задержки на другом ее конце. По истечении времени задержки в линию посылается хранирующий импульс, останавливающий счетчик, и из отсчитанного им времени вычитается задержка. Точность измерений снижается с увеличением задержки. Задержку можно полностью исключить путем посылки сигнала по радиорелейной линии.

Для сопоставления искателей различных типов в качестве основных критериев целесообразно принять:

- вероятность пропуска или ложного измерения;
- погрешность;
- область применения и дальность действия;
- собственное время измерения.

По первому критерию, а также по надежности определения МП преимущество имеют устройства с многократной посылкой сигнала. При существенных неоднородностях или при наличии ответвлений надежность локационного измерения снижается. Погрешности измерения различных искателей – одного порядка. Дальность действия локационных и волновых искателей примерно одинакова. Собственное время измерений у различных типов искателей – от нескольких десятков до 100...150 мкс.

Локационные искатели значительно проще в наладке и обслуживании. Для ВЛ обычной длины (до 300 км) автоматические локационные искатели имеют решающие преимущества перед волновыми.

#### 5.4.3.2. Неавтоматические волновые искатели.

Впервые предложены в нашей стране. Эффективно используются для определения места заплывающего пробоя КЛ. Принцип действия их основан на методе колебательного разряда: измеряется период (полупериод) свободных колебаний, возникающих в заряженной линии при пробое изоляции.

Если кабель заряжен напряжением отрицательной полярности, то после пробоя в обе стороны от МП будут распространяться волны положительной полярности. От разомкнутого конца линии они отразятся с тем же знаком, а дойдя вновь до МП, изменят полярность. При этом в момент пробоя  $t_0$  напряжение в МП падает от  $-U_0$  до 0, затем возрастает до значения  $U_0$  и вновь резко падает до 0. Этот процесс совершается в течение времени  $t_1 \approx 2l/v$ , где  $l$  – расстояние от МП до конца линии,  $v$  – скорость распространения волны напряжения (рис. 5.18). Первый период колебаний завершается возвращением волны положительной полярности к месту пробоя.

При отсутствии активных потерь форма колебаний была бы прямоугольной с периодом  $T = 4l/v$ . В действительности из-за активных потерь фронт импульса деформируется, колебания затухают, период их удлиняется. Поэтому измеряют обычно

только время первого, наименее искаженного полупериода колебаний  $t_1 = 2l/v$ , откуда находят  $l = vt_1/2$ , или  $l = 80t_1$ , где  $l$  – в км,  $t_1$  – в мкс,  $v = 160 \cdot 10^6$  м/с = 160 км/с.

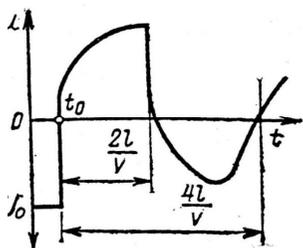


Рис. 5.18. Напряжение на кабеле при пробое изоляции искателя

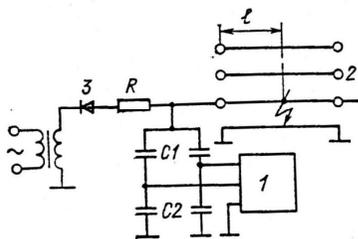


Рис. 5.19. Схема подключения неавтоматического волнового к кабелю: 1 – прибор; 2 – кабель; 3 – выпрямитель

При измерении на жилу кабеля 2 (рис. 5.19) подается напряжение от высоковольтного выпрямителя 3 через зарядный резистор  $R$  (1...10 кОм, 50...100 Вт). Напряжение поднимается до наступления пробоя (но не выше испытательного), когда измерительный прибор 1 начинает отсчет времени, заканчивающийся по истечении первого полупериода возникающих колебаний. Интервал времени, пропорциональный расстоянию до места пробоя, фиксируется с помощью осциллографа или миллисекундомера.

Среди специализированных измерителей широкое распространение получили электронные микросекундомеры типов ЭМКС-58МТ, Щ4120, ЦР0200 в комплекте с емкостным делителем напряжения, посредством которого прибор подсоединяется к поврежденной жиле кабеля. Измеритель ЭМКС позволяет определить место запыляющего пробоя на расстоянии от 20...40 м до 10 км.

При наличии неоднородностей в КЛ кривая колебательного разряда может быть искажена резкими выбросами напряжения. Для исключения ошибок, которые могут при этом возникнуть, предусмотрено два уровня чувствительности. Если показания прибора на обоих уровнях оказываются близки, то за основной принимается отсчет при большей чувствительности, а при существенном (более 10%) расхождении отсчет берется по более грубому уровню. Расстояние отсчитывается по шкале, градуированной в километрах.

Цифровой прибор Щ4120 (Украина) имеет устройство задержки импульса помехи, соответствующей расстоянию 50 м...40 км. Для проверки достоверности измерения устанавливают задержку на 5...10% больше, чем следует, и повторяют измерение. Если результат остается неизменным, то он считается истинным. Предел допускаемой основной погрешности  $\pm 30$  м. Выпускаемый вместо Щ4120 прибор Ц2100 имеет погрешность до 20 м; масса 6,5 кг. Оба измерителя обеспечивают заявленную точность и при ОМП кабелей с неоднородностями волнового сопротивления.

В приборе FOG-311 («Функверк Дрезден») временной интервал преобразуется в соответствующее число периодов напряжения эталонной частоты, которое фиксиру-

ется счетчиком. Усреднение результатов нескольких последовательных измерений позволяет существенно снизить погрешность. Максимальное расстояние – до 16 км.

Для КЛ под нагрузкой применяют антенное подключение приборов, без непосредственной связи с токоведущими частями, проложив вдоль КЛ два провода длиной 2...5 м и подсоединив их к измерителю вместо делителя напряжения. Подобное подключение применяется также и для отыскания мест пробоя на ВЛ электрифицированных железных дорог.

## **5.5. Низкочастотные методы ОМП.**

### **5.5.1. ОМП по параметрам аварийного режима.**

*Параметрами аварийного режима (ПАР)* называются определенные электрические величины, измеренные в период КЗ. В качестве таких величин чаще всего используются напряжения и токи нулевой или обратной последовательности, а также соответствующие проводимости и сопротивления. Для вычисления расстояния до МП требуется решение не менее двух уравнений, поскольку неизвестно еще переходное сопротивление КЗ. Снизить влияние этого сопротивления и получить наиболее точные результаты можно при двустороннем измерении ПАР, с обоих концов поврежденной линии.

Переходное сопротивление в случае однополюсных КЗ на металлическую или железобетонную опору ВЛ составляет 30...40 Ом, а при перекрытии в пролетах может превышать 100 Ом. Десятки и сотни ом может составлять переходное сопротивление при пробое на тело деревянной опоры. Методы, основанные на измерении ПАР, используются при КЗ всех видов на ВЛ в сетях с глухозаземленной нейтралью (110 кВ). В сетях с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостных токов (6...35 кВ) эти методы пригодны при междуфазных КЗ. Измерения производят в начальный период металлического или дугового КЗ длительностью не более 0,1 с, когда повреждение носит характер КЗ без обрыва. При обрыве ВЛ (например, при падении опор или перегорании проводов) МП определяют неавтоматическими локационными искателями.

Параметры аварийного режима измеряются и запоминаются с помощью фиксирующих приборов, а МП находят либо непосредственно по этим параметрам, либо по расстоянию до него путем расчета или автоматического преобразования ПАР. В памяти приборов типа ФИП (ФИП-1, ФИП-2, ФИП-Ф) фиксируется ток КЗ, после чего по схеме линии определяют зону поиска повреждения и расчетным путем находят расстояние до точки КЗ. Приборы типа ЛИФП фиксируют ток или напряжение в начале КЗ, имеют более широкий по сравнению с ФИП диапазон измеряемых величин и не требуют градуировочных характеристик. Основная относительная погрешность не превышает 3%.

Фиксирующие омметры (ФМК-10, ФИС и др.) запоминают не одну, а две величины – ток и напряжение, по которым рассчитывается сопротивление, предпочтительно реактивное; шкала – в км. В приборах типа ФИС выделяют фазы с минимальным значением фазного (при однополюсном КЗ) или междуфазного напряжения (при двухполюсном КЗ). Измерителям этого типа свойственны значительные погрешности из-за ограниченной чувствительности и влияния переходного сопротивления. Мгновенные значения токов и напряжений аварийного режима используются также в

приборе ИРА, который выполняет односторонние измерения с учетом переходного сопротивления.

Приборы «Волна», «Зонд» содержат датчик, фиксирующий появление (увеличение амплитуды сигнала) высших гармонических составляющих тока на землю, а поврежденная линия определяется по максимальному показанию прибора; за местом повреждения показания резко уменьшаются. Прибор «Зонд» указывает еще и направление поиска на основании сравнения фаз напряжения и тока 11-й гармоники (550 Гц).

Приборы фирмы Siemens определяют расстояние до места двухфазного КЗ по данным измерений полного сопротивления петли короткого замыкания.

### 5.5.2. Петлевые методы

Петлевые методы основаны на измерении сопротивления отрезков жил кабеля до и после МП. Применяются для определения расстояния до места замыкания жилы на оболочку при наличии хотя бы одной неповрежденной жилы и значении переходного сопротивления в МП до 10 кОм. Схема измерения собирается по принципу моста постоянного тока. Источник питания постоянного тока GB (батарея гальванических элементов) подключают к поврежденной и «здоровой» жилам кабеля, на другом конце которого их соединяют перемычкой (рис.5.20).

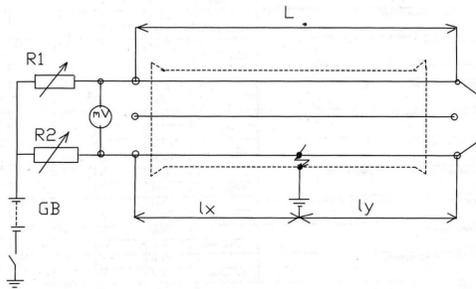


Рис.5.20. Схема соединений при ОМП петлевым методом

Если принять, что сопротивление жил участков кабеля пропорционально длине последних, то при этом образуется мост с сопротивлениями плеч  $R_1$ ,  $R_2$  резисторов  $R_L + R_y$ ,  $R_x$  отрезков жил (рис. 5.21). Уравнение равновесия моста будет:

$$R_1 R_x = R_2 (R_1 + R_y).$$

Учитывая, что  $l_y = L - l_x$  и, значит,  $R_y = R_L - R_x$ , получим:

$$R_x = \frac{2R_2 R_1}{R_1 + R_2}$$

и окончательно

$$l_x = \frac{2R_2}{R_1 + R_2} L.$$

После определения расстояния  $l_x$  следует поменять местами концы проводов, идущих от моста к кабелю, и путем нового измерения получить расстояние  $l_x + L$ . Сумма результатов обоих измерений должна быть примерно равна  $2L$ . Для повышения достоверности измерение рекомендуется провести с двух сторон КЛ.

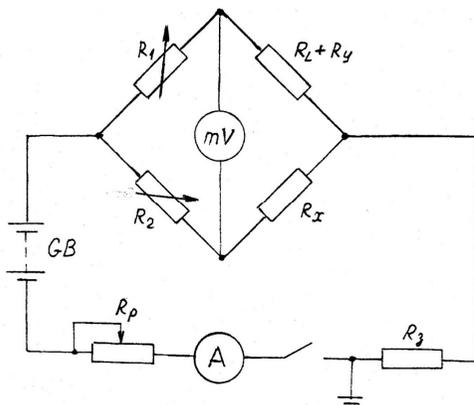


Рис.5.21. Эквивалентная принципиальная схема измерения расстояния до МП петлевым методом:  $R_p$  – резистор для регулирования тока питания моста;  $R_3$  – переходное сопротивление на землю; остальные обозначения – те же, что и на рис.5.20

Соединение моста с жилами кабеля производится гибким медным проводом сечением  $4 \text{ мм}^2$ , а милливольтметр присоединяется отдельными проводниками непосредственно к жилам кабеля. Перемычку между поврежденной и неповрежденной жилой кабеля изготавливают обычно из гибкого многожильного провода сечением не менее  $50 \text{ мм}^2$ .

Точность измерения зависит главным образом от погрешности определения фактической длины кабеля и чувствительности моста, зависящей, в свою очередь, от чувствительности милливольтметра и отношения напряжения питания моста к переходному сопротивлению в МП. Поэтому напряжение питания выбирается в соответствии с значением переходного сопротивления:  $4 \dots 6$ ,  $25 \dots 30$  и  $100 \dots 120 \text{ В}$  при верхних пределах сопротивления  $100$ ,  $1000$  и  $10000 \text{ Ом}$ . При больших переходных сопротивлениях применяют высоковольтные мосты, но в этом случае требуется изолировать корпус моста от земли, а сопротивление резисторов регулировать с помощью изолирующей штанги. Кроме того, выбор напряжения питания ограничивается допустимой рассеиваемой мощностью резисторов в плечах моста.

При отсутствии неповрежденной жилы используют дополнительный провод или жилу параллельного кабеля.

Если кабель состоит из нескольких участков с жилами разного сечения и материала, длину кабеля  $l$  пересчитывают на какое-либо одно сечение  $q$  и удельное сопротивление  $\rho$  и рассматривают однородную эквивалентную линию с тем же омическим сопротивлением, что и реальная. Если, например, требуется привести длину участка 1 кабеля к параметрам участка 2, должно соблюдаться равенство

$$\rho_1 l_1 / q_1 = \rho_2 l_{\text{пр}} / q_2,$$

откуда приведенная длина

$$l_{\text{пр}} = l_1 q_2 \rho_1 / q_1 \rho_2.$$

Сложив приведенные длины участков, получают длину эквивалентного однородного кабеля и рассчитывают расстояние до МП этого кабеля.

Относительную ошибку измерения мостовым методом можно оценить по формуле (%):

$$\delta = c R_{\text{п}} 100 / 2 U R_{\text{к}},$$

где  $c$  – чувствительность нуль-индикатора;  $R_{\text{п}}$  – переходное сопротивление в МП;  $U$  – напряжение источника питания моста;  $R_{\text{к}}$  – сопротивление кабеля.

Пусть, например, длина кабеля с медными жилами составляет  $l = 1$  км, сечение жилы  $q = 240 \text{ мм}^2$ , переходное сопротивление  $R_{\text{п}} = 0,5 \text{ кОм}$ , напряжение питания моста  $U = 12 \text{ В}$ , чувствительность прибора  $c = 10^{-4} \text{ В/дел}$ ; тогда расчетное сопротивление кабеля  $R_{\text{к}} = 0,018 \cdot 10^3 / 240 = 0,075 \text{ Ом}$ , и  $\delta = 10^{-4} \cdot 500 \cdot 100 / 2 \cdot 12 \cdot 0,075 \approx 2,8\%$ , т.е. в данном случае 28 м, что неприемлемо. Резко снизить ошибку можно, применив прибор с большей чувствительностью; для гальванометра значение  $c = 10^{-6} \dots 10^{-7} \text{ В/дел}$  считают достаточным практически во всех случаях. Если переходное сопротивление на землю в МП превышает 10 кОм, рекомендуется снизить его путем прожигания.

Расчетная погрешность измерения может быть доведена до 0,1...0,3%, но фактически она оказывается значительно больше из-за невозможности точно учесть реальную длину кабеля. По этой причине петлевой метод применяется сейчас сравнительно редко, хотя и имеет определенные преимущества:

- метод достаточно прост, использование его не требует ни участия высококвалифицированного персонала, ни наличия специализированных приборов и аппаратов;
- может применяться при расположении МП в воде, когда переходное сопротивление не удастся снизить до значений, меньших нескольких килоом;
- может применяться для ОМП кабелей со сложной картиной неоднородностей, затрудняющей использование импульсного метода (например, для ОМП кабеля малой длины с отпайками и большим переходным сопротивлением на землю).

### 5.5.3. Емкостные методы.

Применяются для определения расстояния до места обрыва одной или нескольких жил кабеля. В отличие от петлевого метода, измеряется не омическое сопротивление, а емкость участка жил КЛ, которая также принимается пропорциональной длине

данного участка. Измерение производится с помощью мостов переменного тока или баллистических гальванометров.

Два смежных плеча моста содержат регулируемые резисторы  $R_1$  и  $R_2$ ; в одно из двух других плеч включена цепочка поврежденная жила – земля (емкость  $C_x$  и переходное сопротивление  $R_x$ ), во второе – магазин конденсаторов и переменный резистор (эталонные емкость  $C_3$  и сопротивление  $R_3$ ), которые для повышения чувствительности соединяют параллельно.

При измерении к одной из диагоналей моста подводится напряжение от генератора звуковой частоты (обычно в диапазоне от 100 до 1000 Гц; мощность 10...20 В·А), к другой – телефон или иной индикатор. Подбором сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , емкости  $C_3$  и сопротивления  $R_3$  добиваются равновесия моста, о достижении которого судят по минимальному уровню сигнала на индикаторе. Тогда емкость поврежденной жилы относительно земли можно рассчитать по формуле

$$C_x = \frac{R_1}{R_2} C_3$$

и определить расстояние  $l_x$  до места обрыва, полагая, что оно пропорционально рассчитанному таким образом значению  $C_x$ .

Надежные результаты получаются при условии  $R_x < 1000/l_x$ , Ом ( $l_x$  – в км). Вместе с тем при  $R_x < 3...5$  кОм точность метода резко снижается и при  $R_x < 300$  Ом становится недопустимо низкой. Когда измеряется емкость одной жилы, две другие следует заземлить.

Измерение с помощью баллистического гальванометра производят при сопротивлении утечки не менее 20 МОм. Как известно, отброс  $\alpha$  стрелки гальванометра при заряде емкости  $C$  до напряжения  $U$  (или разряде ее от  $U$  до 0) пропорционален количеству электричества  $Q$ , прошедшему через рамку прибора:

$$\alpha = kQ = kUC,$$

где  $k$  – постоянная гальванометра.

Изменяются углы отброса стрелки гальванометра при заряде емкости поврежденной жилы ( $\alpha_x$ ) и эталонной емкости ( $\alpha_3$ ) и рассчитывается емкость поврежденной жилы по формуле

$$C_x = \frac{\alpha_x}{\alpha_3} C_3.$$

При измерении емкости оборванной жилы могут представиться три характерных случая:

а) Разрыв жилы без заземления. Измеряется емкость с одного ( $C_1$ ) и другого конца ( $C_2$ ) жилы. Если принять, что длина кабеля делится пропорционально измеренным емкостям, то есть

$$\frac{l_x}{L-l_x} = \frac{C_1}{C_2},$$

то расстояние до места обрыва будет

$$l_x = \frac{LC_1}{C_1 + C_2}.$$

б) Оборванная жила глухо заземлена с одного конца. В этом случае измеряется емкость  $C_1$  незаземленного участка жилы и емкость одной из неповрежденных жил  $C$ . Расстояние до МП определяется из выражения

$$l_x = \frac{LC_1}{C}.$$

в) Один конец оборванной жилы и две другие жилы глухо заземлены. Измеряется емкость  $C_1$  с незаземленного конца оборванной линии. Расстояние до места обрыва ориентировочно можно определить через удельную емкость жилы  $C_{уд}$  относительно других заземленных жил:

$$l_x = C_1/C_{уд}.$$

Такое измерение целесообразно производить только на КЛ длиной до 200 м. Ввиду невысокой точности измерений и значительных трудозатрат на их проведение этот метод в наладочной практике применяется редко.

#### **5.5.4. Топографические методы. Индукционные методы.**

##### **5.5.4.1. Магнитное поле тока в КЛ.**

Индукционные методы предназначены для непосредственного ОМП на трассе КЛ или ВЛ. Они основаны на улавливании магнитного поля, создаваемого протекающим в линии (и около нее, в земле) током. Для отключенных КЛ используется ток звуковой частоты от специального генератора, для линий под напряжением сети – ток промышленной частоты и его нечетные гармоники. Магнитное поле фиксируется с помощью индукционной приемной рамки (антенны), усилителя и индикатора (телефона) при перемещении последних вдоль трассы. Нижняя граница частоты генератора составляет 300 Гц, верхняя 10...12 кГц; сила тока от 1 до 80 А, мощность генератора 150...200 Вт.

Значение ЭДС, наводимой в рамке, пропорционально частоте и силе тока в линии и зависит от вида повреждения, расположения рамки относительно линии, от глубины залегания кабеля и наличия металлических частей вблизи. Зная характер изменения поля, можно при соответствующей ориентации антенны определить трассу линии и МП на ней. В качестве примера на рис. 5.22 приведены: структурная схема приемника кабелеискателя в составе индукционной рамки, усилителя и телефона; кабельная линия в земле и кривая изменения напряженности магнитного поля над

КЛ. Оператор с кабелеискателем проходит по трассе кабеля, улавливая характерное звучание в телефоне, зависящее от напряженности поля.

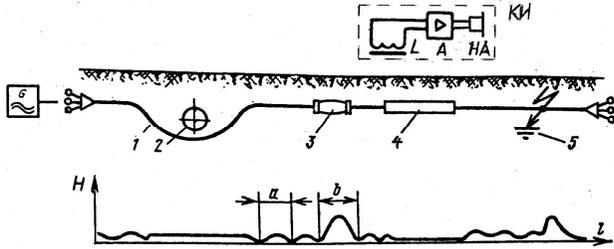


Рис. 5.22. Поиск МП кабеля с помощью кабелеискателя и кривая изменения напряженности магнитного поля над КЛ:

КИ – кабелеискатель: L – индукционная рамка (антенна); А – усилитель; НА – телефон; G – генератор звуковой частоты;

a – шаг скрутки (повива) жил кабеля; b – длина муфты;

1 – заглубление кабеля; 2 – теплопровод; 3 – соединительная муфта; 4 – участок кабеля в металлической трубе; 5 – место повреждения кабеля

Электромагнитное поле КЛ, возникающее при ОМП, можно рассматривать как результат токораспределения в жилах кабеля, соответствующего определенным видам повреждения.

Поле *одиночного тока* образуется в случае пропускания тока по цепи жила – земля, когда влиянием тока в земле можно пренебречь. В плоскости поперечного сечения линии кривые напряженности этого поля представляют собой концентрические окружности с центром на оси кабеля (рис. 5.23,а). Напряженность поля убывает пропорционально удалению от кабеля.

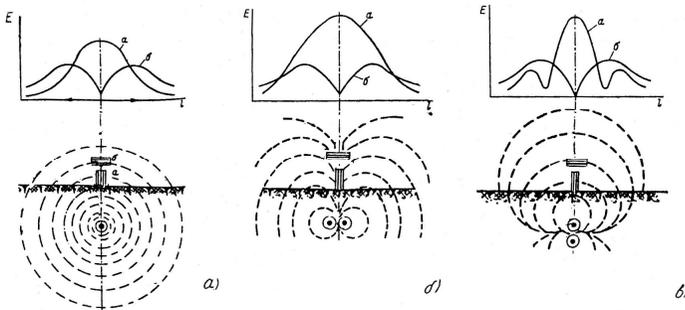


Рис.5.23. Линии напряженности магнитного поля и кривые изменения ЭДС при вертикальном (а) и горизонтальном (б) положении рамки и использовании цепей тока: а) жила – земля; б) жила – жила в горизонтальной плоскости; в) жила – жила в вертикальной плоскости

Поле *пары токов*, равных по значению и противоположных по направлению, образуется при отыскании места замыкания между двумя фазами. Эти токи создают два концентрических магнитных поля, действующих в противоположном направлении (рис.23, б и в). Результирующее поле будет значительно слабее, чем поле одиночного тока. Напряженность его пропорциональна расстоянию между жилами и обратно пропорциональна квадрату расстояния от оси кабеля. ЭДС рамки зависит от ее положения и от взаимного расположения жил кабеля (вертикальное или горизонтальное).

Поле *распределенного емкостного тока* образуется при ОМП в случае обрыва жилы кабеля. При частоте порядка 1 кГц его непосредственное проявление незначительно.

#### **5.5.4.2. Определение трассы, глубины залегания и МП кабеля.**

Отыскание *трассы* кабеля производится по минимуму или максимуму сигнала при пропускании тока по цепи жила – земля (случай одиночного тока). При фиксации минимума сигнала рамку располагают над кабелем горизонтально, так что витки ее не пересекаются линиями магнитного поля и ЭДС в ней близка к нулю (рис.5.23,а, кривая б). По мере удаления от КЛ сигнал усиливается, а затем спадает.

При фиксации максимума сигнала рамку располагают вертикально. Над осью кабеля витки рамки пересекаются максимальным магнитным потоком и ЭДС оказывается наибольшей (рис.5.23,а, кривая а). Если перемещать рамку вдоль линии, ЭДС будет изменяться в соответствии с рис.5.23,а в сторону от КЛ – не изменится. В практике чаще используют первый способ, так как результаты его не зависят от глубины залегания КЛ. Силу тока генератора устанавливают в пределах 0,5...5 А, в зависимости от глубины залегания.

Для определения *глубины залегания* кабеля предварительно находят трассу КЛ и, перемещая рамку перпендикулярно оси кабеля, находят линию отсутствия ЭДС. Расстояние от этой линии до КЛ равно искомому значению глубины.

Для отыскания *места замыкания* между жилами и соединительных *муфт* выводы генератора подсоединяют к поврежденным жилам кабеля (случай пары токов). Рамка располагается горизонтально. Звучание будет слышно на участке кабеля от генератора до МП. Расположению жил кабеля в горизонтальной плоскости будут соответствовать наибольшие значения ЭДС, вертикальному – наименьшие. Жилы кабеля скручиваются с шагом повива  $a = 0,5...3$  м. Поэтому при перемещении рамки по трассе в ней будет индуцироваться ЭДС, периодически изменяющаяся от максимума до минимума (рис.5.22), и соответственно звук в телефоне будет усиливаться и ослабевать. Погрешность ОМП с поверхности земли при замыкании между проводниками не превышает 0,5 м, на открытом кабеле – нескольких сантиметров.

Над муфтами длина интервалов слышимости заметно изменяется и звук резко усиливается. Этот эффект вызывается разводкой жил в муфте (где они не скручиваются, а располагаются «звездочкой») и используется для нахождения муфты.

Если на каком – то участке трассы звук ослабляется или исчезает, то это свидетельствует о неправильной скрутке жил кабеля, заглублинии или экранировке кабеля металлическими трубами. В таких случаях проверяют наличие сигнала за этим участком трассы. Над МП сигнал, как правило, усиливается, а на расстоянии не более 0,5 м (обычно 0,5...1 м) за ним – затухает. Чтобы не перепутать место повреждения и

участки с ослабленным сигналом, следует обратить особое внимание на «концевой эффект», проявляющийся в усилении сигнала. Если звучание прекращается плавно или обрывается без заметного усиления, то на этом участке кабель заглублен или заложен в металлическую трубу. В сомнительных случаях генератор переключают с одного конца кабеля на другой: при наличии МП сигнал будет прекращаться в одном и том же месте. Значение тока выбирают не менее 5...25 А в связи с тем, что при удалении от кабеля ЭДС в рамке убывает пропорционально квадрату расстояния.

Кроме периодического усиления и ослабления звука над трассой кабеля, иногда прослушивается и звук по обеим сторонам ее. Такое явление может возникать при недостаточной степени прожигания изоляции одной или пары жил или выгорании отрезка (5...10 см) одной из жил, когда наряду с магнитным полем пары токов образуется еще и поле тока растекания в земле и оболочке кабеля. Напряженность поля растекания, намного превышающая напряженность межпроводного поля, создает существенные помехи в виде непериодического звучания, которое медленно уменьшается за МП. Такого рода *помехи* иногда удается устранить дополнительным прожиганием изоляции жил кабеля вплоть до КЗ между ними.

Индустриальные помехи от электрических и магнитных полей (под ЛЭП высокого напряжения, на территории подстанций, вблизи железнодорожных, трамвайных или троллейбусных путей, пучка кабелей и т.п.) также могут быть достаточно велики. Интенсивность их убывает с увеличением частоты. Наибольший уровень помех соответствует частоте основной гармоники 50 Гц, но даже при питании от источника тока частотой 1000 Гц ЭДС помех может превысить полезный сигнал. С другой стороны, повышение частоты питания свыше 10 кГц вряд ли целесообразно из-за экранирующего воздействия оболочки и брони кабеля, проявления индуктивного сопротивления кабеля и снижения чувствительности слуха. Для получения более отчетливой слышимости в зоне сильных электропомех увеличивают ток питания кабеля, совершенствуют конструкцию кабелеискателя.

Трассодефектоискатель ТДИ-05м (НПФ «Диполь») позволяет локализовать трассу и определить место повреждения изоляции или КЗ, а также глубину прокладки трассы. Конструктивно прибор состоит из двух блоков – генератора и приемника с головными телефонами. Передающая частота генератора 0,89; 2,4 и 8,9 кГц, мощность 6 Вт. Масса прибора с аккумулятором 2 кг.

Определение места *однофазного замыкания* (жилы на оболочку кабеля) осложняется тем, что в МП ток растекается по оболочке кабеля в обе стороны и по земле. При этом ток от генератора  $I = I_1 + I_2$ , протекая по поврежденной жиле (рис.5.24), возвращается не только по оболочке ( $I_1$ ), но и по земле ( $I_2$ ). Таким образом, существует поле пары токов  $I_1$  до МП и поле одиночного тока  $I_2$  за МП. Одиночный ток может распространяться на десятки метров за МП и создавать поле в десятки раз более интенсивное, чем поле пары токов. На фоне такой сильной маскировки выявить полезный сигнал очень трудно.

Практически отыскание МП в этом случае возможно, если существенно (до 90%) повысить долю тока, возвращающегося по оболочке кабеля к генератору. С этой целью с обеих сторон КЛ снимается заземление (заземляющий тросик кабеля отсоединяется от общего контура заземления), а генератор подключается к поврежденной жиле и оболочке (к тросику). За счет перехода тока с жилы на оболочку сигнал не-

сколько увеличивается и его можно выявить, постепенно сокращая зону наибольшего сигнала путем уменьшения чувствительности приемника.

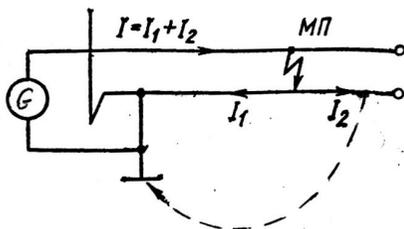


Рис.5.24. Растекание тока при однофазном замыкании на землю

Следует отметить еще так называемый метод *аномалии минимального сигнала*. Этот метод базируется на выявлении искажений трассовых характеристик поля одиночного тока в зоне МП. При горизонтальном положении приемной рамки трассовая характеристика напряженности магнитного поля одиночного тока (и, следовательно, ЭДС рамки) имеет вид седлообразной кривой с четко выраженным минимумом  $H_{\min}$  и максимумом  $H_{\max}$ . В МП уровень  $H_{\min}$  повышается, а  $H_{\max}$  снижается. Таким путем можно выявить МП по увеличению отношения  $H_{\min} / H_{\max}$ .

Успешно применяется метод *накладной рамки*. Конструктивно такая рамка состоит из прямоугольной катушки (рис.5.25), изогнутой по форме кабеля и закрытой стальным ярмом для усиления ЭДС от пары токов. МП определяется по характеру изменения сигнала при повороте рамки вокруг оси кабеля непосредственно на оболочке. Здесь интенсивность поля пары токов сопоставима с полем одиночного тока и МП может быть обнаружено по исчезновению поля пары токов. Метод позволяет выявить однофазные металлические замыкания на оболочку кабелей, проложенных открыто (в помещениях, туннелях, подвалах и т.п.) или в земле. В последнем случае, правда, придется произвести раскопку нескольких шурфов в зоне повреждения КЛ.

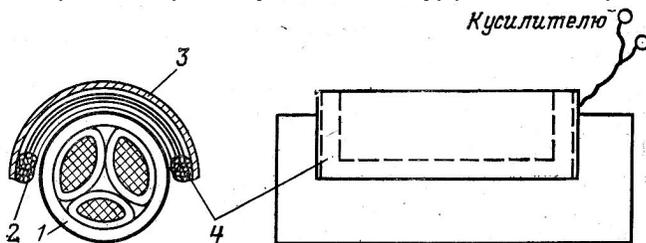


Рис.5.25. К методу накладной рамки

1- жила кабеля, 2- изоляция рамки, 3- стальное ярмо, 4- рамка.

Генератор подключают к поврежденной жиле и оболочке кабеля (рис.5.24) и направляют ток 1...10 А. Если рамка находится до МП со стороны генератора, то при вращении ее вокруг оси кабеля в телефоне будут прослушиваться два максимума и два минимума сигнала за один оборот рамки. Это означает, что по кабелю протекают токи, образующие междупроводное поле. Если же рамка находится за МП, то по его оболочке будет протекать одиночный ток, образующий неизменяющееся магнитное поле, и тогда в телефоне прослушивается монотонное звучание.

Применение метода эффективно при наличии металлического замыкания между жилой и оболочкой, но затруднено, когда переходное сопротивление в МП превышает несколько ом и длина кабеля за МП более 1 км,

При невозможности подключить генератор непосредственно к жиле кабеля используют метод *электроразведки*. Генератор подключается к индукционной рамке, которая возбуждает ток в металлической оболочке кабеля, а поле этого тока улавливается приемной рамкой. Рамки располагают под прямым углом, чтобы исключить их взаимное влияние.

Отыскание нужного кабеля в пучке других кабелей, например, кабеля, отключенного для ремонта. С этой целью применяют двухпроводное включение генератора на здоровые жилы кабеля, замкнутые между собой перемычкой на другом конце, без заземления. Задают ток 5...10 А, располагают рамку кабелеискателя вертикально и, пересекая ею трассу пучка, находят искомый кабель по силе звука генераторной частоты: он уменьшается до минимума или исчезает полностью, когда ось рамки совпадает с осью кабеля. Затем кабель очищается от земли и проверяется накладной рамкой (рис.5.26).

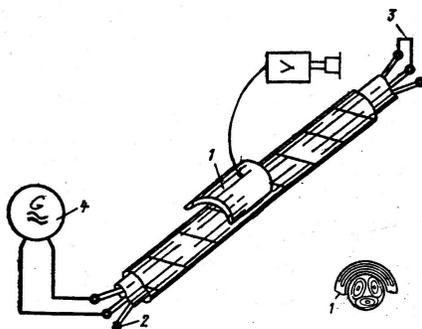


Рис.5.26. Отыскание нужного кабеля в пучке: 1 – накладная рамка; 2 – жилы кабеля; 3 – перемычка; 4 – генератор звуковой частоты

#### 5.5.4.3. Особенности индукционных методов ОМП для линий, включенных в сеть.

В сетях с изолированной нейтралью по всем фазам всех линий протекают емкостные токи на землю. В нормальном режиме сумма этих токов близка к нулю. При однофазном замыкании на землю (ОЗЗ), наиболее характерном повреждении в данных

сетях, распределение емкостных токов изменяется, система становится несимметричной и возникают токи нулевой последовательности. На их обнаружении и основано ОМП таких линий.

При отсутствии стационарной земляной сигнализации используют токоизмерительные клещи. Охватывая ими кабель ниже концевой разделки, измеряют ток нулевой последовательности на всех отходящих направлениях и устанавливают участок, в начале которого протекает ток нулевой последовательности, значительно превышающий ток нулевой последовательности неповрежденной линии. Поиск МП на трассе ведут с помощью индукционного датчика.

Процесс ОМП нагруженной линии осложняется мешающим влиянием магнитного поля токов нагрузки. В переносных устройствах, использующих для поиска места ОЗЗ сигналы промышленной частоты, это влияние стремятся скомпенсировать, как, например, в приборах ОМЗ-1. Но поскольку существенного улучшения при этом не достигается, широкого применения такие приборы не нашли. Более эффективно использование магнитных полей высших гармоник (частота от 150 до 650...1000 Гц) фазных токов, по которым можно судить о направлении к месту ОЗЗ линии. Появление этих гармоник обусловлено соответствующими гармониками фазного напряжения, возникающими из-за наличия нелинейных элементов в сети, например, вследствие нелинейности вольт-амперных характеристик силовых трансформаторов.

#### **5.5.4.4. Приемники и генераторы.**

Важнейшими характеристиками *приемного* устройства являются чувствительность и помехоустойчивость. *Чувствительность* рамки оценивается отношением ЭДС, наводимой в ней магнитным полем, к напряженности этого поля. Она прямо пропорциональна частоте генератора, числу витков рамки, сечению и магнитной проницаемости материала сердечника рамки; ее значение – порядка нескольких Ом·м. Чувствительность приемного устройства в целом оценивают по напряженности магнитного поля, которая при максимальном усилении обеспечивает достаточное значение сигнала на индикаторе, например, 1 В. Порядок значения напряженности  $10^{-4}$  А/м, коэффициента усиления  $(0,2...2,0)10^5$ .

Для КЛ наиболее распространены индукционные датчики (рамки) цилиндрической формы с ферритовыми сердечниками и катушками, содержащими несколько тысяч витков. С целью защиты от помех используют две рамки, включаемые встречно и разнесенные на расстояние шага скрутки жил кабеля.

Приемная аппаратура для трассового поиска на ВЛ также выполняется переносной. Приемное устройство, реагирующее на напряженность поля токов нулевой последовательности, содержит такой же магнитный датчик, как и для КЛ. Датчик целесообразно располагать на расстоянии 6...8 м от оси линии. Сигнал от датчика фиксируется и после усиления поступает на индикатор.

Приборы, реагирующие на высшие гармонические токи, снабжаются фильтрами – узкополосными, настроенными на одну определенную гармонику, например 11-ю, или полосовыми, на частоту 200...1500 Гц. Устройства, позволяющие судить о направлении к месту замыкания, могут работать только на фиксированной частоте.

Направленные устройства снабжены, кроме магнитного датчика, также штыревой антенной. Направление (к МП или в обратную сторону) определяется по знаку на

индикаторе. Достоинством таких устройств является то, что их действие не зависит от длины поврежденного участка.

Для генератора важным фактором является возможная нагрузка. Сопротивление ее можно подсчитывать по обычной формуле  $Z = R + jX$ , не принимая во внимание волновое сопротивление, если длина линии до места повреждения  $l < \lambda/5$ , где  $\lambda$  - длина волн генераторной частоты.

Выпускаются полупроводниковые и электромашинные генераторы. Транзисторные генераторы фирмы Seba dynatronic (ФРГ), например, имеют мощность до 500 Вт при выходном напряжении до 700 В и рабочей частоте от 1,3 до 12 кГц. Мощность 200 Вт считается достаточной для КЛ до 110 кВ и для большинства КЛ до 35 кВ. Генераторы большей мощности могут быть использованы и для прожигания изоляции. Для ОМП воздушных сетей распространены в основном генераторы промышленной частоты, но имеется и опыт применения (Тулэнерго) электромагнитного генератора частоты 5-й гармоники (250 Гц).

### 5.5.5. Электроконтактные методы.

Эти методы называют также *потенциальными*, или методами измерения потенциалов. Они предусматривают создание непосредственного контакта цепи измерения с цепью постоянного тока, пропускаемого через МП. При этом определяются значения и полярности падения напряжения на металлической оболочке кабеля или на поверхности земли в случае кабеля с пластмассовой защитной оболочкой.

Для отыскания места замыкания на оболочку два контактных стержня (щупа) располагаются на расстоянии 0,5...1,0 м друг от друга и присоединяются к измерительному прибору постоянного тока (милливольтметру, микроамперметру). Наконечниками щупов касаются металлической (алюминиевой, свинцовой) оболочки кабеля, через которую пропускается ток, и, не изменяя расстояния между ними, перемещаются вдоль трассы КЛ. Место замыкания на оболочку фиксируется по изменению полярности сигнала, контролируемого прибором. Для отстройки от мешающего влияния блуждающих токов проходящий через МП ток периодически прерывают.

Выполнение измерений на металлической оболочке обусловлено тем, что изоляция между нею и броней намного прочнее изоляции между броней и землей, а проводимость металлической оболочки намного выше, чем брони. Поэтому ток растекается преимущественно по металлической оболочке, постепенно сходя в землю через соединенные с оболочкой участки брони. Применение метода ограничивается необходимостью вскрытия кабеля.

Для открыто проложенных кабелей со свинцовой оболочкой без брони применяется разновидность потенциального метода, при которой прибор подключается на конце кабеля между поврежденной жилой и оболочкой, а постоянный ток пропускается через короткий участок свинцовой оболочки. Если контакты подключения источника тока передвигать по оболочке в сторону от места подключения прибора, то сразу за МП показания прибора станут равны нулю.

У кабелей с защитной пластмассовой оболочкой измерение падения напряжения производится на поверхности земли. Контактные стержни устанавливают на глубину 6...8 см и начинают измерение с участка, заведомо находящегося до МП. Ток подается импульсами от батареи конденсаторов, которая периодически разряжается на поврежденную жилу кабеля. Измерения желательно производить не далее 10 м от

трассы кабеля. Напряжение импульсной установки не должно превышать 2...3 кВ. Известна, например, установка с конденсаторной батареей емкостью 60 мкФ на напряжение 500 В, длительность импульса до 0,5 с, длительность паузы около 4 с.

#### 5.5.6. Акустические методы.

Акустический метод был разработан в Ленэнерго в начале 1950-х годов. Принцип его заключается в фиксации звуковых колебаний, вызванных мощным электрическим разрядом в месте повреждения. Метод применяется при различных видах повреждения, но чаще всего на коротких КЛ (до 100 м) и для уточнения МП, определенного индукционным методом. Ошибка составляет не более 0,2...0,3 м.

Для формирования электрического разряда в МП электрическая энергия предварительно накапливается в высоковольтных конденсаторах или в емкости самого кабеля. При пробое эта энергия расходуется на создание искрового разряда между жилой и защитной оболочкой кабеля, который сопровождается звуковым эффектом. Звук достигает максимальной громкости над МП и может быть прослушан на поверхности земли. По окончании разряда емкость заряжается снова, и разряды периодически повторяются через 2...3 с. Прослушивание ведут с помощью пьезоэлектрического микрофона или электромагнитного звукоснимателя, при мощных разрядах МП можно обнаружить с помощью деревянного стетоскопа (из дуба).

Уровень импульсного напряжения зависит от амплитуды посылаемого импульса и от переходного сопротивления в МП, которое должно превышать волновое сопротивление кабеля. Если это условие не соблюдается, импульсное напряжение резко уменьшается и пробоя не происходит. Практически устойчивый искровой разряд обеспечивается при переходном сопротивлении 40...50 Ом и более; при меньших значениях металлические спаи разрушают пропусканием больших токов.

Эффективность акустического метода зависит от энергии разряда  $W = CU^2/2$ , где  $U$  – напряжение пробоя искрового промежутка,  $C$  – разряжаемая емкость. Поскольку акустическая энергия пропорциональна квадрату напряжения, его стремятся увеличивать. Но и емкость не должна быть слишком мала, так как от нее зависит длительность разряда; практически считают достаточным значение  $C = 1...2$  мкФ. Конденсатор должен быть надежно подключен к металлической оболочке кабеля и контуру заземления.

Во избежание импульсных перенапряжений напряжение пробоя не должно превышать 70% испытательного для данного кабеля: на практике принимают 25, 30 и 40 кВ соответственно для силовых кабелей с рабочим напряжением 6, 10 и 35 кВ. При повреждениях с заплывающим пробоем и обрывах жил, когда напряжение подают на кабель непосредственно от выпрямителя, волновых процессов не возникает и напряжение пробоя может быть поднято до испытательного.

В зависимости от вида повреждения КЛ собирают одну из схем рис.5.27. При заплывающем пробое применяют схему рис.5.27,а, для других видов повреждений в качестве накопителей энергии используют емкость неповрежденных жил кабеля (рис.5.27,б) или конденсаторы высокого напряжения (рис.5.27, в, г). При обрыве жилы (рис.5.27,в) напряжение пробоя определяется переходным сопротивлением в МП, а в случае устойчивого замыкания между жилой и оболочкой кабеля – напряжением пробоя разрядника FV (рис.5.27,г).

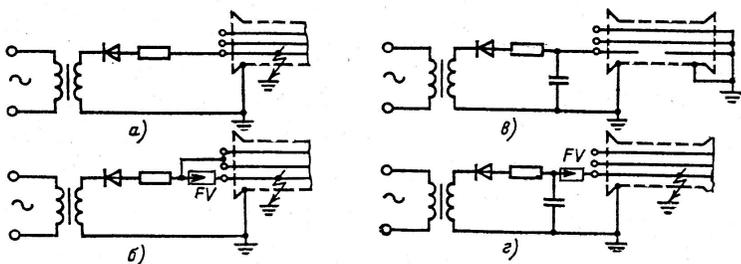


Рис.5.27. Схемы определения мест повреждений кабеля акустическим методом: а) при заплывающем пробое; б) с использованием неповрежденных жил кабеля; в) при обрыве жил кабеля; г) при замыкании жилы на оболочку кабеля

Слышимость звука с поверхности земли зависит от глубины залегания кабеля, состояния грунта, вида повреждения кабеля и мощности разрядного импульса. Глубина прослушивания составляет обычно от 1 до 3...5 м, зона слышимости от 2 до 15 м, а при ОМП подводных кабелей может достигать 0,5...1 км. Лучше всего звуковые колебания передаются в твердом, плотном и однородном грунте (глина, лед, бетон), хуже – в рыхлых грунтах (песок, торф, снег). Слышимость улучшается при наличии открытого отверстия в защитной оболочке кабеля в месте повреждения, а также при расплавлении мастики в процессе прожигания и разгерметизации оболочки муфты.

Для обнаружения МП предварительно одним из дистанционных методов находят зону повреждения, которая может достигать нескольких десятков метров, и уточняют трассу кабеля индукционным методом. На трассе отмечают места расположения соединительных муфт, где повреждения наиболее вероятны. Предполагаемое место повреждения уточняется по максимальной слышимости звука от акустического датчика, устанавливаемого над трассой кабеля через каждые 1...2 м.

Устройства ОМП акустическим методом обычно содержат и индукционную рамку. Кабелеискатель типа КАИ-80, например, состоит из генератора и приемника звуковой частоты, индукционного и акустического преобразователей и головных телефонов. Генератор может работать в двух режимах – непрерывном и периодическом прерываемом для отстройки от сильных помех. При индукционном методе по поврежденному кабелю пропускается ток частотой 1 или 10 кГц. Сигнал принимается индукционным преобразователем и контролируется оператором с помощью головных телефонов и стрелочного индикатора. Сигнал от акустического датчика принимается акустическим преобразователем и обрабатывается аналогичным образом.

### 5.5.7. Выбор метода и аппаратуры для ОМП кабеля.

Для выбора метода ОМП кабеля необходимо установить вид и характер повреждения. С этой целью мегаомметром на 1000 или 2500 В измеряют сопротивление изоляции жил кабеля относительно земли и между собой. Закорачивают и заземляют все три жилы кабеля на одном, а затем на другом его конце, и измеряют сопротивление изоляции каждой жилы с противоположного конца, что дает возможность обнаружить обрыв жил. Если переходное сопротивление в МП велико (более 5 МОм),

производят прожигание поврежденного участка. Далее одним из методов, указанных в табл.5.9, определяют зону повреждения и уточняют МП кабеля.

Таблица 5.9  
Рекомендуемые способы определения места повреждения КЛ

Виды поврежде- ния	Переходное сопротивление в МП, кВ	Метод определения	
		зоны повреждения	точного МП на трассе КЛ
Замыкание жилы на землю	0 - 50	Импульсный, петле- вой	Индукционный, накладная рамка
	50 – 200	Импульсный, колебат. разряда, петлевой	Акустический
	200 – 5000	колебательного раз- ряда, петлевой	Акустический
Замыкание между жилами, между жилами и на зем- лю в одном месте	0 – 50	Импульсный, петле- вой	Индукционный,
	50 – 200	Импульсный, колебат. разряда	Индукционный, акустический
	200 – 3000	Колебательного раз- ряда,	Индукционный, акустический
Двойное замыка- ние на землю в разных местах	0 – 200	Импульсный	
	200 – 3000	Петлевой, колеба- тельного разряда	Акустический (с предварительным прожиганием)
Обрыв токоведу- щих жил без за- земления	Выше $10^6$	Импульсный, колебат. разряда, емкостной	Акустический
	0 – 200	Импульсный	Индукционный,
Заплывающий пробой изоляции	Выше 200	Колебательного раз- ряда	Акустический
	Выше $10^6$	Колебательного раз- ряда,	Акустический

### 5.6. Особенности ОМП на воздушных линиях.

Описанные выше методы ОМП относятся в основном к кабельным линиям. На воздушных ЛЭП преимущественное распространение получили методы ОМП по параметрам аварийного режима. Соответствующие устройства могут быть подразделены на три группы:

- фиксирующие приборы для определения расстояния до МП, автоматически регистрирующие электрические параметры во время аварийного режима;
- устройства, автоматически регистрирующие эти параметры с целью отыскания поврежденных участков сети;

- переносные устройства для определения места замыкания на землю (в сетях с изолированной нейтралью) с помощью датчиков тока и напряжения.

Фиксирующие приборы обычно выдают информацию, на основе которой рассчитывается расстояние до МП. С этой целью применяются также искатели локационно-го типа, причем неавтоматические искатели могут использоваться только при устойчивых повреждениях линии (обрыв проводов, схлестывание). Устройства для определения поврежденных участков особенно эффективны в сетях 6 – 20 кВ, где ОМП затрудняется их сложной разветвленной структурой. В этих сетях наиболее целесообразно использовать устройства третьей группы, так как однофазные замыкания на землю составляют в них до 80% всех повреждений.

### **5.6.1. Фиксирующие приборы для ОМП линий.**

#### **5.6.1.1. Типы приборов.**

По принципу запоминания результатов измерения фиксирующие приборы можно подразделить на группы с механической, электрической и магнитной памятью. В приборах с *механической памятью* подвижная система жестко фиксируется в точке отсчета. Такие приборы просты по конструкции, но имеют небольшой диапазон измерения, невысокую стабильность показаний и большое потребление. Простейший прибор с механической памятью типа Ф-Э34 содержит промежуточное реле, которое нормально подтянуто, а при появлении тока отпадает и заклинивается, фиксируя результат измерения. Кратность измерения (отношение максимального значения измеряемой величины к минимальному) у этих приборов невелика и поэтому при диапазоне больше 5...6 приходится использовать два прибора. В другом варианте электромагнитного прибора (ФП-2) подвижная система перемещается в положение, соответствующее измеряемой величине, и возвращается в исходное положение при повторном намагничивании. В устройствах типа АИ-2 используется прибор магнито-электрической системы без противодействующей пружины. Угол поворота подвижной части прибора пропорционален количеству электричества, поступившего в цепь измерительной рамки, и в конечном счете значению измеряемой величины. Недостатком прибора является возможность разбалансировки магнитной системы.

К группе приборов с *электрической памятью* принадлежат приборы серии ФИП. В них запоминающий конденсатор заряжается до напряжения, пропорционального значению контролируемого параметра. К нему периодически подключается вспомогательный конденсатор, в процессе заряда – разряда которого вырабатываются импульсы постоянного тока, а напряжение на задающем конденсаторе постепенно снижается до определенного уровня. Количество импульсов, зафиксированное счетчиком к этому моменту, оказывается логарифмической функцией входного сигнала. Для получения именованной величины служит градуировочная кривая.

Фиксирующие приборы типа ЛИФП проградуированы в единицах измеряемой величины и обеспечивают более широкий диапазон измерений и более длительное хранение информации. Принципиальная схема такого прибора (в несколько упрощенном виде) представлена на рис.5.28.

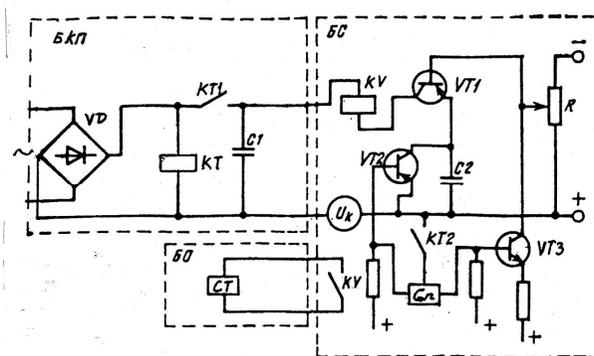


Рис.5.28. Принципиальная электрическая схема фиксирующего прибора типа ЛИФТ

Основными функциональными элементами схемы являются блоки кратковременной памяти БКП, считывания БС и отсчета БО. При аварии на линии срабатывает пусковое реле КТ, которое своим контактом КТ1 подключает запоминающий конденсатор С1 к выпрямителю VD, контактом КТ2 запускает генератор импульсов Gn и через 0,1 с контактом КТ1 отключает конденсатор С1 от цепи заряда. В исходном состоянии транзисторы VT1 и VT2 закрыты, а транзистор VT3 открыт. При поступлении импульса на базу транзистора VT3 он снимает запирающий импульс с базы транзистора VT1 и конденсатор C2 заряжается от конденсатора C1 до напряжения  $U_0$ , задаваемое потенциометром R. Срабатывает реле KV и включает счетчик импульсов CT, после чего импульсом от генератора открывается транзистор VT2 и конденсатор C2 разряжается. Этот процесс повторяется до тех пор, пока напряжение на конденсаторе C1 не снизится от значения  $U_1$  до значения  $U_2$ , недостаточного для срабатывания реле KV.

Число импульсов, отсчитанное при этом счетчиком, можно определить из выражения

$$U_2 = U_1 - mU_0 + U_k,$$

где  $m$  – коэффициент, пропорциональный искомому числу; при  $U_2 = U_k$  коэффициент  $m = U_1/U_0$ . В связи с тем, что число импульсов находится в линейной зависимости от напряжения  $U_1$ , шкала прибора градуируется в вольтах.

Приборы типа ФИС, предназначенные для определения места повреждения на ЛЭП 35 кВ и выше, фиксируют сопротивление участка линии до МП. В этих приборах обеспечивается линейная зависимость показаний счетчика от отношения контролируемых величин, а шкала их может быть проградуирована либо в единицах сопротивления, либо непосредственно в километрах длины линии. При повреждениях на землю фиксируется отношение минимальных значений фазного напряжения и фазного тока, а при повреждениях, не связанных с землей, – отношение минимальных значений междуфазного напряжения и максимальной разности фазных токов.

Прибор этого типа содержит два запоминающих конденсатора. При КЗ на линии каждый из них заряжается до напряжения, пропорционального амплитуде одной из контролируемых величин:  $U_1$  – напряжения и  $U_2$  – тока. Число импульсов, отсчитанных счетчиком, пропорционально отношению  $U_1/U_2$  этих значений. Прибор реагирует на реактивную составляющую сопротивления, что позволяет уменьшить влияние переходного сопротивления в МП на результат измерения. Значения сопротивления фиксируются в двух диапазонах: от 0,05 до 20 Ом и от 0,25 до 100 Ом, кратность измерения – до 100 (на одном пределе), время – не более чем за 0,1 с после поступления входного сигнала.

В ряде случаев в качестве контролируемых величин используют токи и напряжения обратной и нулевой последовательности, что дает возможность определить МП не только при замыкании на землю, но и при двухфазном КЗ без земли. Как правило, расстояние до МП определяется по данным измерений с двух концов ВЛ, само же место повреждения обнаруживается путем обхода и осмотра, а также с помощью указателей опор с поврежденной изоляцией.

В приборах с *магнитной памятью* контролируемая величина намагничивает (или размагничивает) магнитную систему во время КЗ. Широкого распространения приборы этого типа пока не получили.

### 5.6.2. Устройства для определения поврежденных участков линий.

Эти устройства контролируют ток или направление мощности в аварийном режиме. Указатели типа АУПН содержат быстронасыщающийся трансформатор ТА1 и не насыщающийся в рабочем режиме трансформатор тока ТА2, а также усилитель ДА и поляризованное двухобмоточное реле КН (рис.5.29). При КЗ трансформатор ТА1 насыщается, МДС обмотки 2 реле превышает МДС обмотки 1 и реле срабатывает, сигнализируя об аварии. Так как в нормальном режиме трансформатор ТА1 не насыщается и МДС обмотки 1 больше МДС обмотки 2, то после ликвидации аварии реле возвращается в исходное положение.

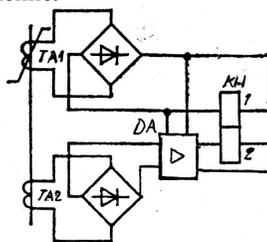


Рис.5.29. Функциональная электрическая схема указателя типа АУПН

Указатели другой группы устанавливаются на безопасном расстоянии от токоведущих частей линии и содержат магнитные датчики тока. В указателе типа УПУ (рис.5.30) магнитный датчик ВМ представляет собой Т – образный магнитопровод с двумя рабочими обмотками, каждая из которых включена на свой выпрямитель (VD1 и VD2).

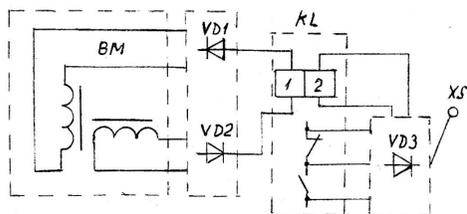


Рис.5.30. Функциональная электрическая схема указателя поврежденного участка типа УПУ

Соединенные последовательно, они питают обмотку 1 реле KL, обмотка 2 которого подключена к выпрямительному мосту VD3 в блоке возврата. Питание блока осуществляется от ВЛ путем емкостного отбора напряжения (разъем XS). В рабочем режиме вход выпрямителя VD3 замкнут замыкающим контактом реле и обмотка 2 последнего обесточена. При КЗ на линии возрастает магнитный поток в магнитопроводе датчика ВМ и соответственно в обмотке 1 реле, которое срабатывает и своим замыкающим контактом включает цепь сигнализации. Когда на линии восстанавливается рабочее напряжение, получает питание обмотка 2 и реле возвращается в исходное положение.

Указатели серии УПУ обладают пониженной чувствительностью к токам частотой ниже или выше 50 Гц, а также к аperiodическим составляющим, что облегчает отстройку от бросков тока трансформаторов. В сетях 6 – 10 кВ минимальный первичный ток срабатывания указателей этой серии составляет 40...50 А. Возврат устройства в исходное положение происходит при токе 150 мкА в цепи отбора напряжения.

Несколько иначе построен указатель типа УКЗ. В нем магнитный датчик включен в резонансный контур, выходное напряжение которого пропорционально току в линии. Это напряжение выпрямляется и дифференцируется, так что скачок тока приводит к образованию управляющего импульса для тиристора, включенного в цепь обмотки срабатывания блока магнитной памяти. При возникновении КЗ блок перемагничивается, и это его состояние может быть обнаружено по положению стрелки компаса.

Указатели направления мощности к месту КЗ предназначены преимущественно для сетей 110 – 220 кВ. Они выдают информацию об аварии, если ликвидация повреждения связана с отключением напряжения на линии. К точности таких устройств не предъявляется жестких требований и поэтому в них применяются простейшие датчики тока и напряжения.

### 5.6.3. Указатели поврежденных опор.

Указатели серии УПИ состоят из стационарного и переносного блоков: первый содержит элемент памяти и устанавливается на опоре, второй используется для контроля и возвращения устройства в исходное состояние. Память модификаций УПИ-1 и УПИ-2 построена на магнитных элементах, УПИ-3 на запоминающих конденсаторах, УПИ-4 на двухпозиционных реле.

Стальной магнитопровод устройства УПИ-1, состоящий из двух половин, охватывает контролируемую опору и замыкается кольцом из магнитотвердого материала, предварительно намагниченным с определенной полярностью. Ток повреждения, протекающий по металлическим деталям опоры, вызывает перемагничивание кольца. Для контроля магнитного состояния кольца служит переносный индикатор с герконом. Указатель срабатывает при протекании тока по железобетонной (металлической) опоре 300 А (200 А) длительностью больше 0,1 с.

Указатель УПИ-2 отличается от УПИ-1 тем, что участок магнитопровода снабжен трансформатором тока, во вторичную цепь которого введена обмотка магнитного элемента памяти. Ток срабатывания указателя, устанавливаемого на железобетонной опоре, около 100 А, на элементе металлической опоры 50 А.

Стационарный блок указателя УПИ-3 содержит электромагнитный датчик тока, к выходной обмотке которого подключена цепь накопительного и запоминающего конденсаторов. При протекании тока повреждения накопительный конденсатор заряжается, а после срабатывания порогового элемента разряжается на запоминающий конденсатор. Ток срабатывания указателя составляет 200 или 100 А соответственно при установке на железобетонную или металлическую опору.

В указателе УПИ-4 от выходной обмотки электромагнитного датчика питается обмотка двухпозиционного поляризованного реле. Когда ток замыкания на землю превысит заданную уставку, реле срабатывает и остается в том же состоянии после исчезновения тока замыкания. При этом загорается световой индикатор, вход которого в нормальном режиме зашунтирован контактами реле. Возврат устройства в исходное положение осуществляется с помощью переносного блока, содержащего постоянный магнит или электромагнит.

Указатель типа КПГ позволяет выявить как опору, так и гирлянду изоляторов, на которых произошло замыкание. Он представляет собой пластмассовый диск со сквозными отверстиями на периферии, закрытыми металлизированной пленкой. Диск устанавливается на верхнем элементе гирлянды изоляторов железобетонных или металлических опор. При перекрытии гирлянды пленка сгорает, открывая видимые с земли отверстия. Одним из недостатков устройства является возможность его срабатывания при импульсных перекрытиях во время грозы.

Некоторые зарубежные конструкции содержат плавкий проводник, сгорающий при протекании через него части тока повреждения металлической опоры.

#### **5.6.4. Устройства для определения места замыкания на землю в сетях 6 – 35 кВ.**

##### **5.6.4.1. Основные положения.**

В этих сетях токи замыкания на землю (ЗЗ) намного меньше токов нагрузки. Ток и напряжение нулевой последовательности зависят главным образом от переходного сопротивления в месте ЗЗ и от степени компенсации емкостного тока. В силу этих особенностей, а также сложной конфигурации ВЛ 6 – 35 кВ, для ОМП в них применяются приборы, в основу работы которых положен принцип контроля специфических параметров режима.

Фазные напряжения и токи содержат составляющие нулевой последовательности. Токи в поврежденной и неповрежденной линиях противоположны по направлению. Высшие гармонические содержатся как в токе нулевой последовательности повреж-

денной линии, так и в токе дугогасящей катушки. В применяемых приборах контроль тока нулевой последовательности осуществляется встроенными магнитными датчиками, контроль напряжения сети – с помощью штыревой антенны. Приборы могут быть токовые и направленные, реагирующие на ток (напряжение) промышленной частоты или на высшие гармонические.

Токовые приборы выявляют максимальный уровень составляющих нулевой последовательности, определяя сначала поврежденную линию, а затем и место повреждения; направленные защиты указывают направление к месту повреждения. Использование высших гармоник позволяет значительно уменьшить влияние токов нагрузки, так как сопротивление контура ЗЗ имеет емкостный характер и, следовательно, уменьшается с возрастанием номера гармонической составляющей тока. Приборы могут быть настроены на одну частоту и/или на полосу частот.

#### **5.6.4.2. Переносные приборы «Поиск», «Волна», «Зонд».**

Токовый прибор «Поиск-1» имеет фиксированные настройки на 5, 7, 11 и 13-ю гармоники и может работать в полосе частот; существуют модификации на фиксированные частоты 1000 и 10000 Гц («Поиск-10»). Основными узлами его являются магнитный датчик, фильтр – пробка, блок конденсаторов. Датчик представляет собой индуктивную катушку с разомкнутым ферромагнитным сердечником и двумя обмотками: рабочая обмотка совместно с блоком конденсаторов используется для настройки в резонанс на требуемую частоту, вспомогательная служит для наладки и эксплуатационных проверок. Фильтр – пробка на 50 Гц позволяет исключить влияние первой гармоники на показания прибора. С помощью штыревой антенны можно контролировать наличие напряжения на линии и замыкание на землю. В нормальном режиме на антенне наводится небольшой электрический потенциал, значение которого возрастает в несколько десятков раз при замыкании на землю.

Отыскание места ЗЗ производится в следующем порядке. Прибор располагают поочередно под каждой линией на выходе с территории подстанции и фиксируют его показания, наибольшее из которых будет свидетельствовать о повреждении данной линии. Далее измерения производят в местах разветвления этой линии и последовательно вдоль поврежденного ответвления. Переход через место ЗЗ определяют по резкому снижению показаний прибора. Как правило, измерения производятся на частоте 250 Гц (5-я гармоника). Остальные частоты используют для контроля в случае необходимости.

Когда поврежденная линия отключена или токи нулевой последовательности отходящих линий одинаковы, прямое использование токовых приборов становится невозможным.

Прибор «Волна» также основан на измерении высших гармоник тока замыкания на землю, но отличается от прибора «Поиск» (снят с производства) более высокой чувствительностью, селективностью, лучшими массо-габаритными показателями. Структурная схема его представлена на рис. 5.31.

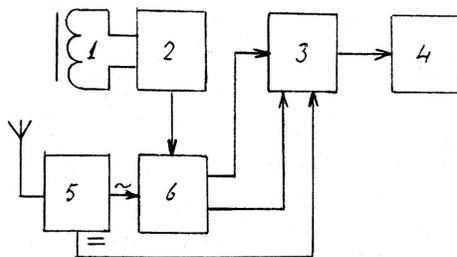


Рис.5.31. Структурная электрическая схема прибора «Волна»

Магнитный датчик 1 и конденсаторы в блоке 2 образуют резонансный контур, настроенный на частоту 250 или 550 Гц. Выходной сигнал блока 2 подается через блок управления 6 на вход усилителя 3, к выходу которого подключен измерительный прибор 4. Электрическая антенна в виде металлической пластины встроена в корпус прибора. Ее выходное напряжение усиливается в блоке 5, имеющем два выхода – переменного и постоянного тока, первый из которых подается на блок управления 6, второй – на усилитель 3. Порядок пользования прибором тот же, что и для «Поиск-1».

Прибор «Зонд» позволяет определить направление к месту замыкания, контролировать ток 11-й гармоники и напряжение нулевой последовательности. Структура электрической части прибора иллюстрируется рис. 5.32. Выходной сигнал магнитного датчика 1 подается на блок 2 с фильтром на 550 Гц и усилителем и через блок управления 5 поступает на усилитель 3. Сигнал с выдвижной телескопической антенны поступает на блок 4, где выделяется и усиливается составляющая 550 Гц. Выходные сигналы с блока 4 подаются в схему сравнения фаз 6 и через блок управления 5 – на измерительный блок 7. Выбор направления к месту повреждения осуществляется по показаниям выходного измерительного прибора.

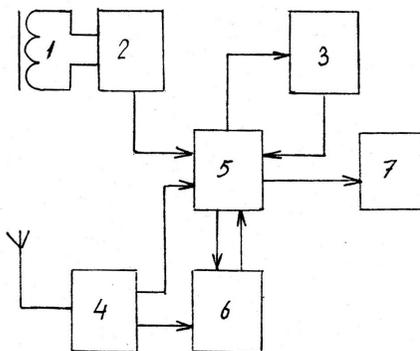


Рис.5.32. Структурная электрическая схема прибора «Зонд»

#### 5.6.4.3. Другие отечественные приборы.

ОАО «Самарский трансформатор» выпускает систему «СПЛ-1Ф» для поиска поврежденной ВЛ 6-10 кВ при ОЗЗ. Система состоит из трансформаторного датчика тока и устройства сигнализации, которое поочередно подключается к датчикам тока всех отходящих ЛЭП. В приборе учтены следующие особенности режима ОЗЗ:

- симметричность трехфазной некомпенсированной сети не нарушается, изменяется лишь путь прохождения емкостных токов;
- при перекompенсации возникают токи нечетных (3-й, 5-й) гармоник;
- при недокомпенсации формируются токи 1-й и 2-й гармоник, имеющие противоположное направление и меньшие значения, чем емкостной ток.

Используются следующие методы поиска:

- по значению и направлению емкостного тока в отсутствие компенсации;
- по искажению синусоидальной формы кривой тока при перекompенсации;
- по направлению емкостного тока при недокомпенсации.

Кроме того, система способна отличить неполнофазный режим работы сети, например, при повреждении выключателя.

*Индикаторы ИКЗ-1,2* устанавливаются на опорах ВЛ и предназначены для определения направления к МП воздушных распределительных сетей 6 – 35 кВ, отключившихся в результате замыкания. Индикатор ИКЗ-2 обеспечивает возможность обращения к прибору для включения, контроля работы и считывания по беспроводному каналу, а встроенный GSM- передатчик позволяет вводить данные в систему телемеханики. Прибор сохраняет в памяти направление потока мощности, значения аварийных напряжения и тока, расстояние до МП для 50 последних аварий. Порог срабатывания индикатора соответствует увеличению тока на 50...100 А. Направление поиска индицируется визуально с помощью флажка, видимого на расстоянии до 20 м от опоры. Питание индикатора ИКЗ-1 осуществляется путем отбора напряжения от двух фаз контролируемой сети через дополнительные изоляторы, ИКЗ-2 – от внутренней батареи. Модификация *ИКЗ-2М* позволяет считывать информацию об авариях, проводить мониторинг ВЛ, изменять внутренние настройки с помощью GSM/GPRS интерфейса.

Как правило, все новые приборы аналогичного назначения строятся с использованием микропроцессоров. *Индикатор* микропроцессорный фиксирующий *ИМФ-1Р* предназначен для непосредственного определения расстояния до места междуфазного КЗ на ВЛ до 35 кВ протяженностью до 200 км, в устройстве *ИМФ-3Р* реализовано ОМП неоднородных по длине линий.

*Прибор КВАНТ* предназначен для определения места ОЗЗ в сетях 6 – 35 кВ с изолированной и компенсированной нейтралью.

## Глава 6.

# Защита от повреждений и ненормальных режимов

### 6.1. Основные понятия.

В электрических сетях и электроустановках потребителей могут возникать повреждения и ненормальные режимы. *Повреждения* нарушают работу электроустановок потребителей, приводят к разрушению основного электрооборудования, а *ненормальные режимы* – к отклонению частоты, напряжения или тока от допустимых значений. Релейная защита (РЗ) обеспечивает: а) автоматическое отключение части питающей сети или потребителей или действие на сигнал, если повреждение непосредственно не нарушает непрерывность электроснабжения, условия безопасности и не угрожает разрушением защищаемого объекта; б) реагирование на опасные, ненормальные режимы работы с действием на отключение или сигнал.

Большинство нарушений связано с возникновением *сверхтока*, значение которого превосходит наибольшее рабочее значение тока электроустановки. Наиболее опасный вид повреждений – *короткое замыкание (КЗ)*. *Ток короткого замыкания* – это свертток, обусловленный повреждением с пренебрежимо малым сопротивлением между точками, находящимися под разными потенциалами в нормальных рабочих условиях. Устройства РЗ должны обеспечить наименьшее время отключения КЗ и, как правило, только поврежденного элемента.

Одним из основных видов ненормальных режимов работы электроустановки являются *перегрузки*. *Ток перегрузки* – свертток в электрической цепи электроустановки при отсутствии электрических повреждений. Защиту от ненормальных режимов часто выполняют не быстродействующей, как при КЗ, а с выдержкой времени.

К защите предъявляются следующие основные требования: селективность, быстрдействие, чувствительность и надежность. *Селективность*, или *избирательность*, – это способность защиты обеспечивать эффективное отключение только одного элемента схемы.

*Быстрдействие* РЗ способствует ограничению масштабов разрушения оборудования, уменьшению продолжительности снижения напряжения и т.д. Полное время отключения складывается из времени работы защиты и времени срабатывания выключателя. Защиты, действующие с временем до 0,10...0,12 с, считаются быстродействующими.

*Чувствительность* защиты принято оценивать коэффициентом чувствительности. Для максимальных защит, реагирующих на возрастание контролируемого параметра (например, тока), этот коэффициент определяется как отношение минимально возможных (при данном повреждении или ненормальном режиме) значений этого параметра к уставке защиты, а для минимальных защит, реагирующих на уменьшение контролируемого параметра, – как отношение уставки к расчетному значению параметра. Необходимые значения коэффициентов чувствительности регламентированы ПУЭ в пределах 1,2 ...2,0.

*Надежность*: защита должна безотказно работать при повреждениях в установленной для нее зоне и не должна срабатывать в режимах, при которых ее работа не предусмотрена.

Традиционные схемы РЗ строятся на отдельных реле, соединяемых друг с другом по определенной схеме. В настоящее время все более широкое распространение получают защиты на интегрированных полупроводниковых элементах с микропроцессорным управлением по соответствующим программам, и хотя они не содержат отдельных реле в прежнем понимании этого термина, название РЗ за ними сохраняется.

*Реле* представляет собой автоматическое устройство, которое приходит в действие (срабатывает) при определенном значении (уставке) воздействующей на него входной величины, электрической (напряжение, ток, частота и пр.) или неэлектрической (давление газов, температура и др.). Различают параметры срабатывания реле и возврата его в исходное положение; отношение второго значения к первому называется *коэффициентом возврата*. У максимальных реле коэффициент возврата меньше единицы, у минимальных – больше единицы. Реле *прямого действия* устанавливаются непосредственно в приводе коммутационного аппарата. Они отличаются простой, но вместе с тем большим потреблением мощности и невысокой точностью; применяются в сетях 3 – 35 кВ, когда эти недостатки незначительны. Защита с реле косвенного действия при срабатывании включает цепь питания привода аппарата от источника оперативного тока.

*Оперативный ток* питает цепи дистанционного управления выключателями, релейной защиты и автоматики, телемеханики и сигнализации. В качестве источников переменного оперативного тока служат трансформаторы тока и напряжения и трансформаторы собственных нужд подстанции; применяются также предварительно заряженные конденсаторы как источники импульсного оперативного тока. В качестве источников постоянного тока применяются аккумуляторные батареи и выпрямители, управляемые и неуправляемые. Для получения более высокого напряжения, чем напряжение батареи, используют инверторы с повышающим трансформатором и выпрямителем.

С целью повышения надежности сеть оперативного тока секционируется. Каждая секция представляет собой шинки, питающие группы потребителей. Цепи защиты, автоматики и электромагнитов отключения питаются от шинок управления ШУ (ЕС), цепи катушек включения, потребляющих большие токи, – от шинок ШВ (ЕУ), сигнализация – от шинок ШС (ЕН). Остальные потребители (аварийное освещение, вентиляция и пр.) питаются по отдельной сети.

*Вспомогательные устройства и автоматика* включают в себя цепи управления, блокировки и сигнализации, а также противоаварийную автоматику (АПВ, АВР, автоматическая разгрузка трансформаторов и др.) и автоматику нормального режима (регулирование напряжения, нагрузки, коэффициента мощности и пр.), источники питания.

В ряде случаев повреждения и нарушения нормальной работы электроустановок, вызвавшие их отключение, самоустраняются, носят кратковременный характер (перекрытие изоляции, схлестывание проводов, перегрузки и т.п.). Для быстрого восстановления питания в таких случаях, а также при ошибочных отключениях выключателей или неселективном действии защиты, предусматриваются устройства *автоматического повторного включения (АПВ)*. В механических устройствах АПВ по-

вторное включение производится за счет предварительно поднятого груза или заведенной пружины; в настоящее время не выпускаются. В схемах электрического АПВ используются релейные схемы на постоянном или переменном оперативном токе.

Как правило, вводится *ускорение* действия релейной защиты на случай неуспешного АПВ, т.е. когда восстановление электропитания или нормальной схемы не достигается. Если АПВ может привести к расширению повреждения, действие его запрещается (блокируется). Схемы АПВ должны обеспечивать заданную кратность действия, т.е. определенное количество повторных включений: однократное АПВ – один раз после аварийного отключения выключателя (цикл О – В – О), двукратное – два раза после первого и повторного отключений (цикл О – В – О – В – О). Действие устройств АПВ фиксируется указательными реле или счетчиками числа срабатываний.

При отключении рабочего источника питания, приводящем к обесточению электроустановок потребителей, осуществляется автоматическое включение резервного источника (АВР). Устройства АВР применяются также для автоматического включения резервного оборудования. Для этой цели используются пусковые органы различных типов, в том числе реагирующие на исчезновение напряжения, тока, снижение частоты, изменение направления мощности и др., а также на сигналы специальных датчиков (давления, уровня и др.). Успешность действия АВР составляет 90...95%.

При одностороннем АВР одна из линий является рабочей, другая – резервной, при двустороннем – любая линия может быть как рабочей, так и резервной. В случае совместного применения устройства АВР должны действовать при внутренних повреждениях рабочего источника, АПВ – при прочих повреждениях. Регулирование генераторов, частотная разгрузка, системная автоматика здесь не рассматриваются.

## **6.2. Виды повреждений и ненормальных режимов.**

### **6.2.1. Повреждения. Короткие замыкания.**

Различают следующие виды коротких замыканий (КЗ) :

симметричное трехфазное;

двухфазное – две фазы соединяются между собой;

двойное замыкание на землю – две фазы замыкаются между собой и землей;

однофазное – фаза соединяется с нейтралью источника питания через землю.

Короткие замыкания происходят через *переходные сопротивления* – электрических дуг, неплотно прижатых контактов, посторонних предметов, окисных пленок и т.п. (*неполное* КЗ). В упрощенных расчетах переходное сопротивление принимают равным нулю («полное», «металлическое», или «глухое» КЗ).

#### **6.2.1.1. Симметричное трехфазное КЗ (ТКЗ).**

ТКЗ при одинаковых переходных сопротивлениях в фазах называют симметричным. На рис.6.1 показана симметричная трехфазная цепь, которая питается от источника неограниченной («бесконечной») мощности  $S \rightarrow \infty$ . Условно считают, что напряжение на шинах такого источника остается неизменным при любых изменениях тока в присоединенной к нему цепи или, иначе говоря, его собственное (внутреннее) сопротивление  $z$  пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением  $z_k$  цепи КЗ.

При вычислении токов КЗ и уставок релейной защиты сопротивление  $z$  можно не учитывать при условии  $z/z_k \ll (5 \dots 10)\%$ .

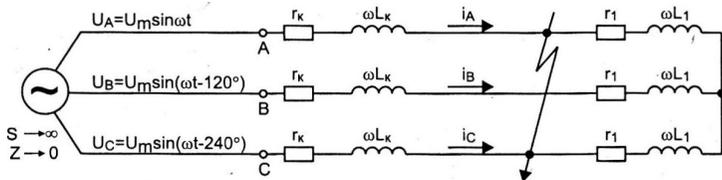


Рис.6.1. Короткое замыкание в симметричной трехфазной цепи

В нормальном режиме работы сила тока в цепи определяется геометрической суммой сопротивлений  $z_1$  и  $z_k$  по закону Ома. Короткое замыкание вызывает переходный процесс в цепи, в ходе которого ток можно рассматривать как сумму двух составляющих: *вынужденной* гармонической (периодической, синусоидальной)  $i_n$  и *свободной* (аперриодической, экспоненциальной)  $i_a$  (рис.6.2). Свободная составляющая уменьшается с постоянной времени  $T_k = x_k/\omega r_k$  по мере затухания переходного процесса.

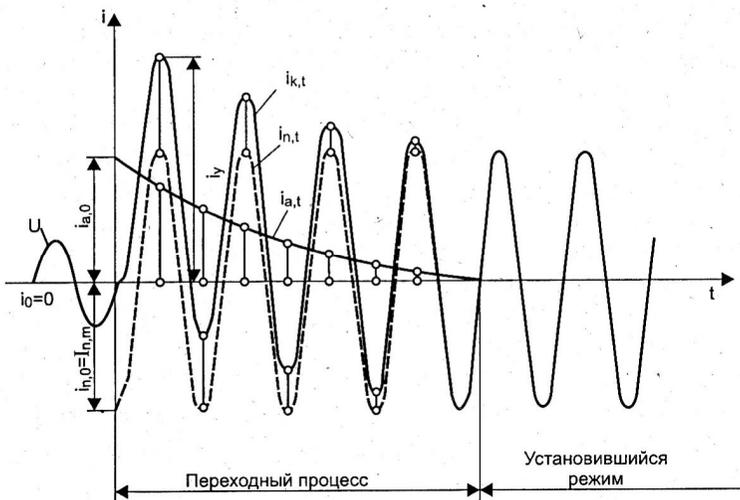


Рис.6.2. Ток КЗ при наибольшем значении аперриодической составляющей

Максимальное мгновенное значение суммарного тока называется *ударным током*  $i_y$ , а отношение этого значения к амплитуде периодической составляющей – *ударным коэффициентом*:  $k_y = i_y / I_{n,m}$ , причем  $1 < k_y < 2$ . Практически в сетях выше 1000 В значение ударного коэффициента колеблется в пределах от 1,8 до 1,3. Наибольшее

значение пик тока и коэффициент  $k_y$  приобретают при следующих условиях: а) перед возникновением КЗ сеть работала в режиме холостого хода (ток  $i = 0$ ); б) КЗ возникает в момент прохождения напряжения через нуль; в) угол фазного сдвига в цепи близок к  $90^\circ$ , то есть индуктивность в ней преобладает:  $x_k \gg r_k$  (рис.6.3). При этом ударный ток возникает через полпериода (0,01 с) после возникновения КЗ, переходный процесс затухает медленно и повышенное значение тока будет сохраняться длительное время.

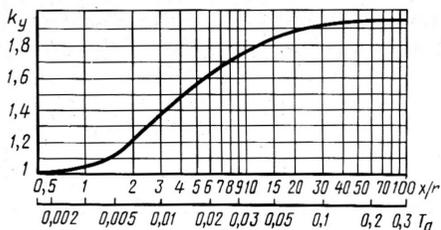


Рис.6.3. Зависимость ударного коэффициента  $k_y$  от отношения индуктивного сопротивления  $x_k$  к активному сопротивлению  $r_k$  короткозамкнутой цепи

Наиболее тяжелым видом являются трехфазные КЗ. Для расчета токов ТКЗ принимается ряд упрощающих допущений, но с условием, чтобы погрешность не превысила 10% (в сторону завышения тока). Далее составляют схему замещения и приводят ее к наиболее простому виду с тем, чтобы источник ЭДС был связан с точкой КЗ одним результирующим сопротивлением. Зная ЭДС и сопротивление, определяют по закону Ома амплитуду периодической составляющей тока, затем рассчитывают постоянную времени и значение ударного тока.

#### 6.2.1.2. Несимметричное короткое замыкание.

В трехфазных сетях могут возникать следующие виды несимметричных КЗ: двухфазное, однофазное и замыкание двух фаз на землю.

При *двухфазном* КЗ, например, между фазами В и С, фазные напряжения их равны  $0,5 E_A$  ( $E_A$  – ЭДС неповрежденной фазы А). Напряжения в нейтрали генератора и трансформатора (независимо от того, заземлена она или нет) равны нулю. По мере удаления от места повреждения напряжение фазы А остаётся неизменным, напряжения поврежденных фаз изменяются. На шинах напряжение опережающей фазы В больше, чем отстающей С. Напряжение прямой последовательности имеет наименьшее значение в месте повреждения и возрастает по направлению к источнику питания. Напряжение обратной последовательности, наоборот, максимально в точке повреждения и снижается в том же направлении.

*Двухфазное КЗ на землю* в сети с изолированными нейтральными (или заземленными через дугогасительные реакторы). В России это обычно сети с напряжением 3 – 35 кВ. От предыдущего отличаются только тем, что поврежденные фазы принужденно приобретают потенциал земли; появляется напряжение нулевой последовательности, практически одинаковое во всей сети. Нейтраль системы (трансформатора) получает

по отношению к земле смещение  $0,5 E_A$ , а напряжение неповрежденной фазы возрастает до  $1,5 E_A$ .

*Двухфазное КЗ на землю в сети с глухозаземлёнными нейтралями* могут сопровождаться сильным снижением как междуфазного, так и фазных напряжений повреждённых фаз (до нуля в месте КЗ), и появлением составляющих нулевой последовательности не только в фазных напряжениях (как в сетях с изолированными нейтралями), но и в токах.

*Однофазные КЗ в сети с глухозаземлёнными нейтралями.* Являются наиболее частыми в таких сетях (60 – 90%). Иногда ток однофазного КЗ (ОКЗ) превышает даже ток ТКЗ. В общем случае токи проходят по неповреждённым фазам даже при отсутствии токов нагрузки, достигая в пределе значения тока КЗ в повреждённой фазе. В фазах линии появляется ток нулевой последовательности, равный по значению одной трети тока КЗ, проходящего через место повреждения, и совпадающий с ним по фазе. Напряжение в точке КЗ равно  $1/3$  геометрической суммы напряжений неповреждённых фаз, т.е. близко к ЭДС повреждённой фазы.

Однофазные КЗ представляют собой тяжёлый вид повреждения, хотя и менее опасный для системы энергоснабжения, чем многофазные КЗ, и должны отключаться по возможности быстро. Защита может действовать на отключение всех трёх фаз линии или только одной повреждённой с последующим её АПВ. Последний способ оказывается целесообразным для магистральных линий (преимущественно одноцепных) и в некоторых других случаях.

*Однофазные замыкания на землю в сети с изолированными нейтралями или заземлёнными через дугогасящие реакторы (с резонансной настройкой).* Это – характерный вид повреждений для сетей 3 – 35 кВ и частично – более высокого напряжения (например, в северных районах).

Если фазы сети имеют между собой и по отношению к земле одинаковые ёмкости, в нормальном режиме фазные токи симметричны и сумма их равна нулю. Напряжение нейтрали относительно земли также близко к нулю. При КЗ напряжения неповреждённых фаз возрастают в  $\sqrt{3}$  раз, но междуфазные напряжения остаются неизменными, к фазам нагрузки подводятся нормальные напряжения и бесперебойность питания потребителей не нарушается. Токи в месте пробоя малы и кратковременное протекание их к существенным разрушениям не приводит.

Защиту выполняют обычно с действием только на сигнал. Селективная защита часто осуществляется с помощью специальных высокочувствительных устройств, реагирующих на токи нулевой последовательности, а в сетях с дугогасящими катушками – на токи высших гармоник, поскольку для них компенсация отсутствует. В условиях повышенной опасности (например, сети 6 – 10 кВ торфяных предприятий) защита работает на отключение без выдержки времени.

Расчет параметров сети при несимметричных КЗ принято производить методом *симметричных составляющих*. Сущность этого метода состоит в том, что любую несимметричную трёхфазную систему векторных величин **A**, **B**, **C** (токов, напряжений) можно представить в виде геометрической (векторной) суммы трёх симметричных систем: прямой **A**<sub>1</sub>, **B**<sub>1</sub>, **C**<sub>1</sub>, обратной **A**<sub>2</sub>, **B**<sub>2</sub>, **C**<sub>2</sub> и нулевой **A**<sub>0</sub>, **B**<sub>0</sub>, **C**<sub>0</sub> последовательно. На рис.6.4 в качестве примера показано построение вектора **A** несимметричной системы путём суммирования векторов **A**<sub>1</sub>, **A**<sub>2</sub> и **A**<sub>0</sub> (тонкие линии).

В свою очередь, симметричные составляющие получаются суммированием в определённом порядке векторов исходной системы, как это показано на рис. 6.4 для определения вектора  $\dot{A}_1$ . Здесь коэффициенты  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{a}^2$  обозначают поворот вектора против часовой стрелки на 120 и 240 град. эл. соответственно; точка над символом указывает на векторный характер величины.

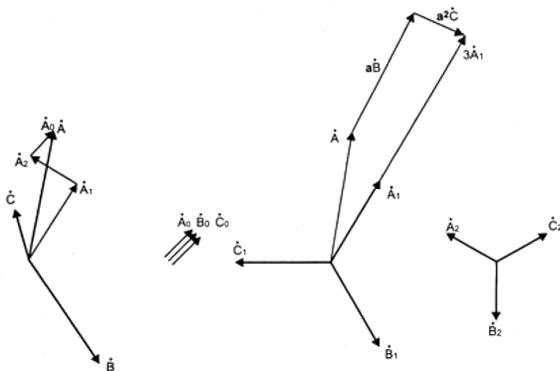


Рис.6.4. Разложение несимметричной системы векторов на симметричные составляющие

Следует отметить, что при таком построении получается вектор утроенной длины ( $3A_1$ , а не  $A_1$ ), и потому найденное значение каждой величины необходимо делить на 3. Симметричным составляющим тока и напряжения соответствуют и сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей – активные  $r_1, r_2, r_0$ , реактивные  $x_1, x_2, x_0$  и полные  $Z_1, Z_2, Z_3$ , причём для несимметричной системы

$$Z^2 = (r_1 + r_2 + r_0)^2 + (x_1 + x_2 + x_0)^2.$$

Активное, индуктивное и полное сопротивления прямой последовательности любого элемента цепи – это его сопротивления при симметричном режиме работы фаз. Для тех элементов цепи, у которых взаимоиנדукция между фазами не зависит от порядка чередования фаз, сопротивления прямой и обратной последовательностей одинаковы, т.е.  $r_1 = r_2, x_1 = x_2$  и  $Z_1 = Z_2$ . К таким элементам относятся воздушные и кабельные линии, реакторы и трансформаторы. Для вращающихся машин в общем случае  $x_1 = x_2$ . Токи нулевой последовательности замыкаются через место повреждения и нулевые точки системы.

## 6.2.2. Повреждения. Обрыв фаз.

### 6.2.2.2. Продольная несимметрия.

Продольная несимметрия наиболее ярко проявляется при кратковременном или длительном обрыве одной или двух фаз. Кратковременные разрывы одной фазы возникают при отключении в случае ОКЗ только повреждённой фазы и её автоматическом повторном включении (ОАПВ). В сетях напряжением выше 1 кВ неустойчивые

КЗ составляют более половины всех случаев и самоликвидируются при отключении, так что АПВ оказывается успешным. Кратковременные разрывы одной или двух фаз могут возникать также в результате одновременного действия фаз выключателя при его включении или отключении, длительные – при пофазном ремонте, отказе отдельных фаз и др. Обрывы фаз, как и КЗ на землю, сопровождаются появлением симметричных составляющих обратной и нулевой последовательностей токов и напряжений.

#### **6.2.2.3. Обрыв фазы.**

В отличие от КЗ, непосредственной опасности для системы не представляет и не требует немедленной ликвидации, однако появление составляющих нулевой и обратной последовательностей может вызвать ряд нежелательных последствий. Например, составляющие обратной последовательности в токе статора генератора могут перегревать ротор, длительная несимметрия напряжений на зажимах асинхронных двигателей может оказаться недопустимой для них, токи нулевой последовательности влияют на линии связи и т.п.

Некоторые типы защит обратной и нулевой последовательностей воспринимают несимметрию при разрыве так же, как и при КЗ. Если их срабатывание нежелательно, принимаются соответствующие меры.

Неполнофазные режимы (передача энергии по двум фазам с возвратом тока через землю) могут создаваться искусственно. В этом случае возникают специфические соотношения электрических величин, которые должны учитываться при выполнении релейной защиты.

#### **6.2.2.4. Обрыв двух фаз.**

Ток неповрежденной фазы возвращается через землю. Хотя полные токи в поврежденных фазах отсутствуют, но составляющие нулевой последовательности имеются, причём сумма фазных токов равна утроенному значению составляющей нулевой последовательности. Напряжение неповрежденной фазы за местом разрыва остаётся неизменным, напряжения поврежденных фаз резко снижаются.

Режимы с разрывом двух фаз реализуются редко и существуют кратковременно. С ними считаются в основном при неодновременном включении или отключении фаз линии в случае, например, установки на них быстродействующих защит нулевой последовательности.

### **6.2.3. Ненормальные режимы работы.**

#### **6.2.3.1. Сверхтоки.**

Сверхтоки оказывают на электрооборудование нежелательное термическое (нагревание) и электродинамическое воздействие, что может привести к ускоренному износу элементов, их повреждению и авариям.

Нагревание проводников и аппаратов происходит вследствие потерь энергии различных видов, к которым относятся: потери в активных сопротивлениях, пропорциональные квадрату тока; потери в диэлектриках, пропорциональные квадрату напряжения; потери в магнитопроводах от вихревых токов и гистерезиса; потери в массивных ферромагнитных частях от индуцированных токов и перемагничивания. Способность аппарата и проводника противостоять кратковременному тепловому действию сверхтока без повреждений называют *термической стойкостью*. Для мед-

ных контактов превышение температуры контактной поверхности над температурой окружающей среды на  $\theta = 180^{\circ}\text{C}$  соответствует началу размягчения металла, на  $1065^{\circ}\text{C}$  – его плавлению. Непосредственно измерить температуру контактной поверхности невозможно, однако её можно определить косвенно путём измерения падения напряжения  $\Delta U$  на контакте по следующим ориентировочным данным:

$\Delta U, \text{В}$	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40
$\theta, ^{\circ}\text{C}$	45	130	370	700	990

Можно также найти температуру из формулы для сопротивления контакта

$$R = R_0(1 + 2/3 \alpha\theta),$$

где  $R_0$  – сопротивление контакта при температуре окружающей среды,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;  $\alpha = 0,0039$  (медь),  $0,0049$  (алюминий),  $0,0062$  (сталь),  $1/\text{град}$ .

Силы взаимодействия проводников с током называют электродинамическими, или электромагнитными, а способность противостоять им – *электродинамической стойкостью*. Эти силы пропорциональны квадрату тока и достигают наибольших значений при коротких замыканиях. Действию их подвержены все элементы электрических систем, в том числе токопроводы и аппараты. Колебания проводников токопроводов под действием электродинамических сил переходят в свободные затухающие колебания после отключения КЗ. При неуспешном АПВ свободные колебания переходят в сложные вынужденные, из-за чего нагрузки на опоры и усилия в проводниках резко увеличиваются. Когда провода проложены в пучках, возникают электродинамические силы, стремящиеся сблизить провода. Вследствие изгиба тяжение проводов увеличивается. В пофазно экранированных токопроводах непрерывная замкнутая система кожухов, охватывающая проводники с током, обеспечивает в рабочем режиме почти полную компенсацию внешнего магнитного поля токопровода, так что в окружающих стальных конструкциях не возникают сколько – нибудь заметные потери мощности и механические напряжения. Электродинамические силы, действующие на проводники при КЗ, обусловлены в основном аperiodической составляющей тока; они в несколько раз меньше, чем при отсутствии кожухов.

#### **6.2.3.2. Колебания напряжений и токов при качаниях.**

Явления, называемые *качаниями*, возникают при нарушении синхронной работы генератора и электрической системы. Кратко сущность их можно пояснить следующим образом. При нормальной работе векторы ЭДС одноимённых фаз генератора и системы вращаются синхронно (с одинаковой частотой вращения) и совпадают по фазе, так что разность их равна нулю и уравнивающие токи отсутствуют. Когда нормальный режим работы генератора почему – либо нарушается и его частота вращения изменяется, эти вектора начинают расходиться, а разность их – возрастать от нуля до максимального значения (суммы ЭДС) по закону синуса. Так же будет изменяться и уравнивающий ток – *ток качания*, достигая максимума при угле между векторами ЭДС, равном  $180^{\circ}$  эл. Напряжение в данной точке сети определяется как разность между ЭДС и падением напряжения от тока качания, а соответствующее сопротивление – как частное от деления напряжения на ток качания. Ток и напряжение имеют пульсирующий характер, изменение сопротивления отображается  $U$  – образными кривыми.

В результате работы регуляторов турбин генератор может продолжить работу в синхронном режиме. Но возможен случай, когда ротор машины начнёт ускоряться,

устойчивость её работы нарушается, машина «выпадает» из синхронизма и переходит в *асинхронный режим*. Напряжение и ток достигают при этом своих предельных значений. Однако и в этом случае под влиянием тормозящего асинхронного момента генератор может втянуться в синхронизм (так наз. ресинхронизация), причём этот процесс носит достаточно длительный характер.

При качаниях и асинхронном ходе возникают условия для неправильных действий релейной защиты – ложных срабатываний или отказа. Большинство защит воспринимают качания как симметричное КЗ. Могут действовать защиты всех типов, реагирующие на фазные или линейные значения напряжений и токов и соотношений между ними, за исключением дифференциальных защит. Поэтому в устройствах РЗ, подверженных влиянию токов качания и асинхронного хода, принимают специальные меры, предотвращающие ложную работу защит, а именно: а) уставка пусковых реле защиты выбирается таким образом, чтобы они не действовали при качаниях; б) вводится выдержка времени на срабатывание порядка 1...2 с; в) применяются блокирующие устройства, выводящие защиту из действия. Блокировки строятся по двум основным принципам: а) использование несимметрии тока или напряжения, появляющейся при КЗ; б) учёт скорости изменения тока и напряжения: при КЗ они возрастают скачкообразно, при качаниях и асинхронном ходе – постепенно, плавно.

#### **6.2.3.3. Броски тока намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов (далее – трансформаторов).**

Как известно, броски тока при включении трансформатора могут кратковременно превышать номинальный ток в несколько раз, особенно при наличии остаточного потока в магнитопроводе, совпадающего по знаку с потоком переходного режима. Физическая сторона этого явления была пояснена в п.3.9. Броски эти, как правило, остаются меньше максимальных переходных токов сквозных КЗ, могут содержать большую апериодическую составляющую и значительный процент высших гармоник, прежде всего второй; затухание броска происходит медленнее, чем токов КЗ. Максимальная токовая защита мгновенного действия (отсечка) должна быть отстроена от броска тока намагничивания трансформатора, для чего уставка отсечки выбирается больше броска тока.

#### **6.2.3.4. Токи самозапуска.**

Сверхтоки возникают, в частности, после отключения повреждённого элемента защитой, после действия АПВ, АВР и т.п. и могут в несколько раз превышать максимальный рабочий ток линии. Это объясняется тем, что большинство электроприёмников при включении под напряжение потребляет больший ток, чем в рабочем режиме при нормальной нагрузке (электродвигатели, лампы накаливания и др.), и, кроме того, одновременно в действие группа электроприёмников. Увеличение тока учитывается при расчёте релейной защиты так наз. коэффициентом пуска, значение которого для электроустановок потребителей колеблется обычно в пределах от полутора до трёх.

При восстановлении нормального питания не отключившиеся от сети, частично заторможенные или остановившиеся двигатели могут самостоятельно восстановить свою частоту вращения. Автоматическое восстановление нормальной работы двигателя после кратковременного нарушения питания называется *самозапуском*. Пусковой ток  $I_n$  остановленного двигателя можно найти в каталоге, заводской документа-

ции или, если известны значения номинального  $s_n$  и критического  $s_k$  скольжения, рассчитать по приближённой формуле:

$$I_K \approx I_N \sqrt{1 + (s_k/s_n)^2},$$

где  $I_N$  – номинальный ток.

Если двигатель включается при пониженном напряжении, пусковой ток пропорционально уменьшается. Считается, что самозапуск двигателя будет успешным, если напряжение будет не меньше 55...65% номинального. Низкий уровень напряжения, большие токи самозапуска, затягивание времени восстановления напряжения могут вызвать срабатывание токовых защит и защит минимального напряжения. Длительное протекание тока самозапуска приводит к перегреву двигателя. Токовые защиты не должны срабатывать при самозапуске и иметь минимальное время на отключение КЗ; время срабатывания АВР должно быть минимальным.

Нарушение устойчивости синхронного двигателя возможно при понижении напряжения сети, перегрузке двигателя или ослаблении возбуждения. При нарушении синхронизма частота вращения двигателя уменьшается и он переходит в асинхронный режим. Токи, появляющиеся в статоре, роторе и пусковой обмотке, вызывают повышенный нагрев их, поэтому длительная работа синхронных двигателей в асинхронном режиме с нагрузкой больше 0,4...0,5 номинальной недопустима. Защита от асинхронного режима должна или осуществить ресинхронизацию двигателя, или отключить его.

При самозапуске синхронных двигателей обмотка возбуждения наглухо подключается к возбuditелю, вследствие чего увеличивается тормозной момент. Самозапуск возможен, если тормозной момент будет меньше асинхронного и входного моментов. На время исчезновения напряжения при АПВ или АВР двигатель работает в генераторном режиме и при восстановлении питания возможно его несинхронное включение. В обоих случаях производится ресинхронизация.

Ток самозапуска трёхфазных двигателей, питающихся через трансформатор или реактор, будет:

$$I_{C3} = \frac{U_C}{\sqrt{3} (x_T + z_n)},$$

где  $x_T$  – сопротивление трансформатора или реактора;  $z_n$  – результирующее сопротивление самозапускающихся двигателей;  $U_C$  – напряжение сети.

Формула даёт несколько завышенное значение тока, так как: не учитывается сопротивление линии, активное сопротивление трансформатора и сопротивление питающей системы; суммирование реактивного и полного сопротивлений производится арифметически. Сопротивление трансформатора мощностью  $S$  находят по выражению:

$$x_T = \frac{e_k \% U_C^2}{100 S},$$

а результирующее сопротивление  $n$  двигателей рассчитывается как параллельное соединение  $n$  сопротивлений  $z_o$ :

$$\frac{1}{z_n} = \frac{1}{z_{o1}} + \frac{1}{z_{o2}} + \dots + \frac{1}{z_{on}}.$$

Сопротивление двигателя можно найти по формуле:

$$z_o = \frac{U_c}{3I_n}.$$

Остаточное напряжение

$$U_{ост} = U_c \frac{z_o}{z_o + z_T}.$$

### 6.3. Виды защит

#### 6.3.1. Токвые и токовые направленные защиты.

##### 6.3.1.1. Основные определения.

*Токowymi* называют защиты, реагирующие на сверхток, проходящий по защищаемому элементу. *Токowymi направленными* называют защиты, реагирующие на ток и направление (знак) мощности КЗ в месте их включения и отличающиеся наличием органа направления мощности. Максимальная токовая защита (МТЗ) состоит из пускового органа, который выявляет появление сверхтока (например, момент возникновения КЗ) и производит пуск защиты, и замедляющего органа (органа выдержки времени), служащего для обеспечения селективности. Такая защита характеризуется определенной зависимостью времени реагирования (срабатывания) от сверхтока, называемой времятоковой характеристикой, или характеристикой время – ток (рис.6.5). При использовании в качестве пусковых органов реле мгновенного действия выдержка времени создаётся отдельными реле времени, а защита такого типа называется МТЗ с *независимой* выдержкой времени (рис.6.5,а).

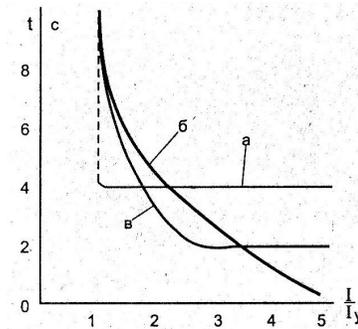


Рис.6.5. Характеристики время-ток максимальной токовой защиты: а – независимая; б – зависимая; в- ограниченно зависимая;  $I/I_y$  – кратность тока, проходящего через реле, по отношению к току уставки  $I_y$ ;  $t$  – время срабатывания .

Некоторые реле содержат встроенный замедляющий орган, благодаря которому время действия зависит от кратности тока: чем больше ток, тем быстрее срабатывает реле; это – защита с *зависимой* характеристикой (рис.6.5,б). Если характеристика МТЗ содержит и зависимую, и независимую части, она называется *ограниченно зависимой* (рис.6.5,в).

#### **6.3.1.2. Защита плавкими предохранителями.**

Широко используется в распределительных сетях. Недостаток – возможность возникновения несимметричного режима вследствие перегорания плавкой вставки только в одной фазе (за исключением мало распространённых предохранителей с открытой плавкой вставкой и управляемых). По своим токовым параметрам плавкие предохранители должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- номинальный ток предохранителя должен быть не меньше номинального тока защищаемой электроустановки;
- номинальный ток отключения должен быть не меньше действующего значения периодической составляющей тока КЗ;
- предохранители не должны перегорать при нормальном включении защищаемого трансформатора или электродвигателя;
- времятоковая характеристика предохранителя должна располагаться ниже кривой перегрузочной способности защищаемого аппарата.

Выпускаются высоковольтные предохранители двух видов: с кварцевым наполнителем (на напряжение 3-35 кВ), где дуга гасится между крупинками кварцевого песка, и выхлопного типа (на 10 – 110 кВ) с трубками из газогенерирующего материала, где гашение электрической дуги обеспечивается высоким давлением выделяющихся газов или продольным дутьем. В быстродействующих предохранителях проявляется эффект токоограничения, когда отключение происходит не при установившемся токе, а при меньшем его значении, определяемом временем плавления плавкой вставки. Такими предохранителями оснащаются, в частности, полупроводниковые приборы в преобразовательных установках.

#### **6.3.1.3. Схемы включения МТЗ.**

Наиболее распространены защиты, выполняемые с помощью максимальных реле тока – первичных реле прямого действия, встраиваемых непосредственно в приводы выключателей, или вторичных с действием на промежуточные реле. В сетях переменного тока 6 – 35 кВ с изолированной нейтралью чаще всего применяется включение вторичных реле тока в две фазы (рис.6.6).

Приведённые схемы отличаются друг от друга чувствительностью к различным видам КЗ. При двойных замыканиях на землю в 2/3 случаев будет отключаться только одно место повреждения.

В комплектных полупроводниковых устройствах МТЗ, а также в полупроводниковых реле тока используется односистемное выполнение исполнительного органа. Комплектные устройства типа ЯРЭ – 2201, например, содержат блоки входных преобразователей с промежуточными трансформаторами тока и выпрямительными мостами, соединёнными последовательно и нагруженными на последовательно соединённые резисторы. С этих блоков подаётся входной сигнал на общий токовый измерительный орган, выполненный на полупроводниковых элементах и реализующий

требуемые характеристики с зависимой или независимой выдержкой времени или без неё (отсечка).

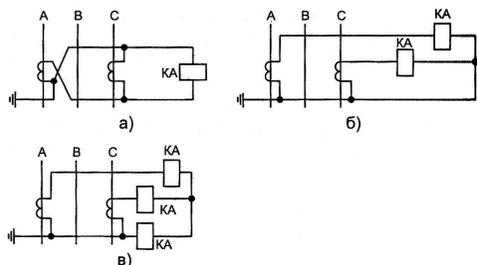


Рис.6.6. Схемы включения реле тока в две фазы: а) на разность фазных токов («восьмёрка»); б) на два фазных тока; в) с включением дополнительного реле на сумму двух фазных токов.

#### 6.3.1.4. Уставки МТЗ.

Ток срабатывания защиты выполняется с учётом следующих условий: 1) защита должна быть отстроена от максимального тока нагрузки, в том числе от токов самозапуска; 2) защита должна надёжно действовать при КЗ на защищаемом участке (коэффициент чувствительности не менее 1,5) и, как правило, на смежном участке (коэффициент чувствительности не менее 1,2).

При определении вторичного тока через реле следует учитывать схему их включения в цепи трансформаторов тока. С этой целью в расчёт вводится коэффициент схемы  $k_{сх}$ , равный 1 при включении реле на фазные токи и  $\sqrt{3}$  при включении на разность фазных токов. Учитывают также погрешности расчёта токов КЗ, погрешности измерительных органов тока, а также схемы включения МТЗ на смежных участках.

Выбор выдержки времени МТЗ производится с таким расчётом, чтобы время действия защиты на каждом последующем участке (в направлении от потребителей электроэнергии к источнику питания) было на ступень  $\Delta t$  больше, чем на предыдущем. При этом всегда с наименьшим временем будет работать защита повреждённого участка. Ступень селективности составляет обычно 0,4...0,6 с.

#### 6.3.1.5. МТЗ с блокировкой минимального напряжения.

Применяется в тех случаях, когда отстройка от броска тока нагрузки приводит к чрезмерному загромождению защиты, при котором не обеспечивается необходимая чувствительность. Типовая схема содержит пусковые токовые реле мгновенного действия и три блокирующих реле минимального напряжения. Защита может действовать на отключение только при условии, если сработают одновременно и токовые, и минимальные реле, что бывает лишь при КЗ. Для обеспечения действия защиты не только при трёхфазных, но также и при однофазных КЗ дополнительно устанавливаются одно реле максимального напряжения, обмотка которого включается на напряжение нулевой последовательности, а контакт – параллельно контактам реле минимального напряжения.

### **6.3.1.6. Токовая отсечка.**

В большинстве случаев действует мгновенно. Селективность достигается не выдержкой времени, а ограничением зоны действия защиты. С этой целью отсечка отстраивается не от тока нагрузки, а от тока при КЗ в конце защищаемой линии или в какой – либо другой, более близкой к источнику питания точке, где отсечка не должна действовать. Принцип действия отсечки основан на том, что ток убывает при удалении места КЗ от источника питания, поскольку увеличивается сопротивление до места КЗ. Токовая отсечка может действовать только при близких КЗ и является дополнительной защитой. Удлинение зоны действия достигается применением неселективной отсечки в сочетании с устройствами АПВ или АВР. После неселективного действия отсечки при внешнем повреждении последующее действие устройств автоматики восстановит питание потребителей, если повреждённый элемент успел отсоединиться. Уставка отсечки выбирается значительно большей, чем у МТЗ.

### **6.3.1.7. Особенности выполнения МТЗ сетей 6 и 10 кВ.**

Защита трансформаторов городских кабельных сетей выполняется главным образом с помощью предохранителей, кабельных линий – на максимальных реле тока с ограниченно зависимыми характеристиками. Токовая отсечка, как правило, не устанавливается. Основную нагрузку составляет бытовая, характеризующаяся малой долей электродвигателей, в связи с чем коэффициент самозапуска принимается обычно равным 1,2...1,3. МТЗ выполняется обычно на переменном оперативном токе. Уровень токов КЗ, как правило, высок, из-за чего могут возникать проблемы надёжной работы контактов токовых реле.

Схемы и аппаратура МТЗ в сетях промышленных предприятий такие же, как и в городских кабельных сетях. Однако наличие двигательной нагрузки вызывает необходимость загробления защит и повышения их быстродействия. При расчётах токов КЗ должна быть учтена возможность подпитки от электродвигателей. Количество операций выключателями существенно больше, чем в городских кабельных сетях, поэтому предпочтение отдаётся наиболее надёжным типам выключателей и приводов.

Основные трудности при выполнении МТЗ в сетях сельской электрификации вызываются большой протяжённостью ВЛ 6 и 10 кВ и малым сечением проводов на удалённых участках, так как в этих случаях ток КЗ оказывается соизмеримым с наибольшим током нагрузки на головных участках ВЛ. Двигательная нагрузка в среднем относительно невелика, и коэффициент самозапуска принимается равным 1,1...1,2 при минимальном времени срабатывания защиты 0,5 с. В сетях, питающих крупные животноводческие комплексы, доля двигательной нагрузки практически та же, что и на промышленных предприятиях.

Токовые отсечки находят, как правило, ограниченное применение. Возможно применение неселективной токовой отсечки, которая может быть исправлена в цикле АПВ.

### **6.3.1.8. Токовая направленная защита.**

Максимальные токовые направленные защиты используются, как правило, для защиты линий и позволяют осуществить достаточно быстрое и селективное отключение повреждений в сетях с двусторонним питанием, кольцевых сетях и некоторых др. Применение органов направления мощности позволяет выполнить две системы

защиты, каждая из которых приходит в действие только при одном направлении мощности. Реле направления мощности могут включаться как на полные токи и напряжения, так и на токи и напряжения отдельных симметричных составляющих.

Составляющие обратной последовательности появляются при всех несимметричных КЗ, а составляющие нулевой последовательности – только при КЗ на землю. В то время как напряжение прямой последовательности в месте КЗ минимально, а мощность направлена от источника к месту повреждения, напряжения обратной и нулевой последовательностей в месте КЗ имеют наибольшее значение, а мощность направлена от места повреждения к источнику. Особенностью составляющих обратной и нулевой последовательностей является также относительно малый диапазон изменения угла сдвига между напряжениями и токами, который практически не зависит от нагрузки, и поэтому реле направления мощности обратной и нулевой последовательностей работают при углах, близких к углу максимальной чувствительности. Использование симметричных составляющих позволяет выполнить односистемные органы направления мощности.

Принцип действия защиты можно пояснить на примере сети, состоящей из цепочки одиночных линий А, Б, В, Г с двусторонним питанием (рис.6.7). Принятое направление срабатывания защит 1 – 6 условно показано стрелками. По направленности действия защиты разбиты на две группы: чётные 2,4,6 и нечётные 5,3,1. Чётные защиты могут срабатывать только при КЗ слева от места их включения, нечётные – только справа от него. Это даёт возможность выбирать параметры (выдержки времени и токи срабатывания) защит для каждой группы независимо одна от другой.

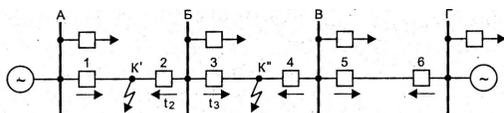


Рис.6.7. Размещение токовых направленных защит в сети с двусторонним питанием;  $t_2$ ,  $t_3$  – выдержки времени защит 2 и 3.

В токовых направленных защитах от *междуфазных* КЗ органы направления мощности включаются, как правило, на полные токи и напряжения. Если включить реле на междуфазное напряжение и соответствующую разность фазных токов, то при близких междуфазных КЗ, когда линейное напряжение повреждённых фаз мало, реле может не сработать. Мощность, подводимая к реле, может оказаться недостаточной для его действия и при неблагоприятном значении угла между током и напряжением. Поэтому в направленных защитах применяются искусственные схемы, где в качестве поляризирующей величины выбирают линейные напряжения, связанные с неповреждённой фазой. Эти схемы именуется по значениям углов между током и напряжением в симметричном трёхфазном режиме при условии, что токи в фазах совпадают с одноимёнными напряжениями. Наиболее удачной считается так наз. 90- градусная схема, в которой используются линейное напряжение двух фаз и ток третьей фазы, например, напряжение  $U_{BC}$  и ток  $I_A$  (рис.6.8).

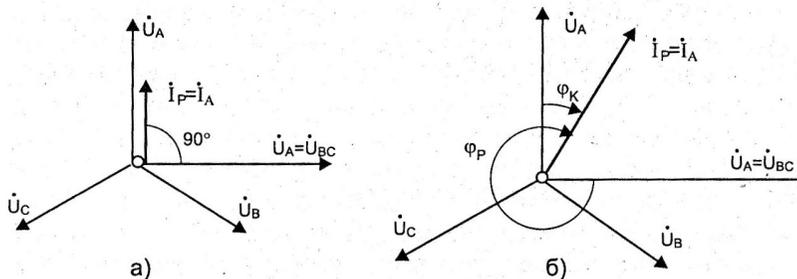


Рис.6.8. 90 – градусная схема включения реле направления мощности:

а) нормальный симметричный режим; б) трёхфазное КЗ;  $\varphi_K$  – угол сдвига между напряжением и током фазы А при КЗ;  $\varphi_P$  – угол сдвига между напряжением и током, подводимыми к реле при КЗ.

Нечувствительность защиты характеризуют мёртвой зоной – длиной защищаемого участка, в пределах которой при металлическом трёхфазном КЗ происходит отказ защиты из – за того, что подводимая к зажимам реле мощность оказывается недостаточной для его срабатывания. Длина мёртвой зоны зависит от чувствительности и типа реле, тока КЗ и параметров защищаемого присоединения. При 90 – градусной схеме включения мёртвая зона может быть только в случае металлического трёхфазного КЗ.

Времятоковые характеристики защиты могут быть как независимыми, так и ограниченно зависимыми или зависимыми. Выбор выдержек времени производится по ступенчатому принципу с учётом направленности действия защиты, т.е. с согласованием их в одном направлении, причём наиболее удалённая от источника питания защита действует мгновенно (отсечка).

## 6.3.2 Дистанционные защиты.

### 6.3.2.1. Назначение и принцип действия.

Дистанционной называется защита, выдержка времени которой автоматически изменяется в зависимости от *дистанции* – расстояния между местом КЗ и местом установок защиты. Эта величина определяется с использованием измерительных *органов сопротивления*, реагирующих на отношение остаточного напряжения на шинах к току КЗ, которое при металлическом КЗ пропорционально дистанции. В качестве измерительного органа используются реле сопротивления, непосредственно реагирующие на полное, активное или реактивное сопротивление. Обычно применяются дистанционные защиты полного сопротивления.

Выдержка времени защиты нарастает плавно или ступенчато с увеличением дистанции. При этом ближайшая к месту повреждения дистанционная защита имеет меньшую выдержку времени, чем более удалённые защиты, благодаря чему автоматически обеспечивается селективное отключение повреждённого участка. Для обеспечения селективности в сетях сложной конфигурации дистанционные защиты

выполняются направленными, действующими только в направлении мощности КЗ от шин в линию, а выдержки времени защит одного направления взаимно согласовываются. Обычно защита осуществляется с тремя ступенями времени, соответствующими трем зонам её действия. Как правило, в первой зоне, охватывающей 85% длины защищаемой линии, отключение производится без дополнительной выдержки времени, чем дистанционная защита выгодно отличается от МТЗ. Направленность действия обеспечивается применением реле направления мощности или иным путём.

### **6.3.2.2. Элементы дистанционной защиты.**

Защита состоит из следующих элементов:

- 1) пускового органа в виде реле полного сопротивления или токовых реле;
- 2) дистанционного органа, определяющего удалённость места КЗ. В ступенчатых защитах выполняется с помощью реле минимального сопротивления. К реле подводится ток и напряжение защищаемой линии, и оно срабатывает при условии  $z_p = \frac{U}{I} \leq z_{cp}$ , где  $z_{cp}$  – наибольшее сопротивление срабатывания реле. Сопротивление  $z_p$  иногда называют фиктивным, так как в некоторых случаях оно не является собственно сопротивлением линии, а зависит от нагрузки и пр.;
- 3) органа выдержки времени, с которой в зависимости от поведения дистанционного органа действует защита; выполняется в виде реле времени;
- 4) органа направления мощности, запрещающего работу защиты при направлении мощности КЗ к шинам подстанции (если пусковые и дистанционные органы не обладают направленностью);
- 5) блокировок, не допускающих действия защиты в тех режимах, где она может ложно сработать при отсутствии повреждения.

*Реле сопротивления* ранее выполнялись на электромагнитном или индукционном принципе, в настоящее время выпускаются полупроводниковые реле. Принцип действия всех типов реле основан на сравнении по абсолютному значению или по фазе двух векторов напряжений, являющихся функциями тока и напряжения сети. В электромагнитных конструкциях осуществляется сравнение соответствующих электромагнитных моментов, напряжений или магнитных потоков, в полупроводниковых используются схемы сравнения на выпрямленном токе, основанные на балансе токов или напряжений.

*Дистанционные органы*, выполняемые с помощью реле сопротивления, должны включаться на ток и напряжение сети по таким схемам, при которых сопротивление  $z_p$  на зажимах реле пропорционально расстоянию до места повреждения и не зависит от вида КЗ. Поэтому дистанционные органы включаются на ток и напряжение цепи короткого замыкания. Для обеспечения правильного действия защиты при двухфазных КЗ устанавливаются три органа, реагирующие на повреждение между фазами, или один орган с переключением его на напряжение и токи соответствующих фаз в зависимости от того, какие из них повреждены. Дистанционные органы, реагирующие на междуфазные КЗ, могут включаться на: междуфазные напряжения и разность фазных токов; междуфазное напряжение и фазный ток; разность токов двух фаз. При двойных замыканиях на землю (в сетях с малым током замыкания на землю) защита должна отключать только одно место повреждения. Один комплект дистанционных органов часто используется для первой и второй зон защиты: нормально реле вклю-

чено с уставкой для первой зоны, а при КЗ за её пределами уставка автоматически изменяется пусковыми реле по истечении времени, необходимого для действия первой зоны.

В односистемных защитах и в защитах с одним комплектом дистанционных (измерительных) органов на две зоны *пусковые органы* подготавливают схему к правильной работе при КЗ, выполняя следующие функции: 1) запускают реле времени всех зон; 2) автоматически изменяют сопротивление срабатывания измерительных органов с первой зоны на вторую; 3) при КЗ подводят к измерительным органам токи и напряжения повреждённых фаз; 4) действуют в качестве резервной зоны защиты. В трёхсистемных защитах с самостоятельными комплектами измерительных органов для каждой зоны специальных пусковых органов не требуется.

В качестве пусковых органов применяются главным образом токовые реле и реле полного сопротивления. Поскольку эти реле реагируют на качания и не полностью отвечают требованиям к пусковым реле, они дополняются блокировками от качаний. Применяются и особые блокирующие реле (называемые иногда «шорами» или фазограничителями), которые позволяют ограничить действие пусковых реле при перегрузках.

### 6.3.2.3. Характеристики срабатывания дистанционных реле.

Так называется зависимость  $z_{cp} = f(\varphi_p)$ , которая определяет значения сопротивления  $z_p$  на зажимах реле при его срабатывании (рис.6.9). Сопротивление  $z$  является комплексной величиной и графически может быть представлено вектором в системе координат  $r - x$  как сумма активной и реактивной (индуктивной) составляющих (рис.6.9,а). Любой участок сети также можно представить в осях  $r - x$  вектором  $z_l$ , имея в виду, что каждая точка линии характеризуется определёнными значениями сопротивлений  $r_l$  и  $x_l$ . При КЗ сопротивление  $z_p$  на зажимах реле равно геометрической сумме сопротивлений линии  $z_k$  до места повреждения К и сопротивления  $r_d$  электрической дуги (рис.6.9,б). Отрезок ОК определяет сопротивление линии, отрезок KB – сопротивление электрической дуги.

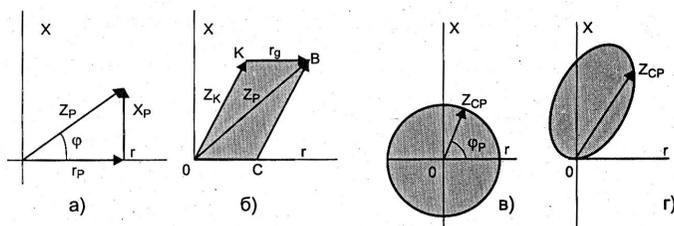


Рис.6.9. Векторные диаграммы и характеристики срабатывания реле сопротивления

Контур ОКВС ограничивает область, в пределах которой может располагаться вектор  $z_p$  при КЗ в различных точках линии. Характеристика срабатывания каждого реле представляет собой геометрическое место точек, удовлетворяющих условию  $z_p = z_{cp}$ . Наиболее распространённые характеристики имеют вид окружности (рис.6.9,в), эллипса (рис.6.9,г), прямой линии, многоугольника. Заштрихованная часть, где  $z_p <$

$z_{cp}$ , соответствует области действия реле, тогда как при  $z_p > z_{cp}$  реле не работает. Таким образом, характеристика срабатывания является пограничной кривой, определяющей условия действия реле. Эту характеристику можно рассматривать как зависимость сопротивления  $z_p$  от угла  $\varphi_p$ . Действие реле при КЗ будет обеспечено, если характеристики срабатывания будут охватывать область, в которой может находиться вектор сопротивления  $z_p$  при КЗ на линии (площадь ОКВС на рис.6.9,б).

#### **6.3.2.4. Схемы дистанционных защит.**

В современных схемах защит используются главным образом направленные реле с характеристикой в виде окружности или эллипса, проходящих через начало координат. Перспективными являются реле с характеристикой в виде четырёхугольника. Ненаправленные дистанционные органы с круговой характеристикой в сочетании с органами направления мощности применяются в односистемных схемах для защиты сетей 35 кВ.

Все реле сопротивления могут неправильно работать при исчезновении напряжения. Поэтому в случае неисправности во вторичных цепях трансформаторов напряжения вводится блокировка, снимающая оперативный ток со схемы защиты. При токовых пусковых органах такая блокировка не применяется.

В *бесконтактных* реле как измерительные органы, так и управляющая часть строятся на полупроводниках, причём управляющая часть выполняется на логических элементах или на базе микропроцессорной техники.

#### **6.3.2.5. Уставки защиты.**

Выдержка времени первой зоны защиты А (рис.6.7) определяется собственным временем срабатывания реле и составляет 0,02...0,15 с. Сопротивление этой зоны выбирается из условия, чтобы дистанционный орган её не мог сработать за пределами защищаемой линии. Поэтому уставка принимается меньше сопротивления защищаемой линии (80...85%), а трансформаторы тока выбираются по кривым 10% – ной погрешности при максимальном токе КЗ в конце линии. Вторая зона должна не только охватывать защищаемую линию, но и выходить за её пределы. Выдержка времени колеблется в пределах 0,3...0,6 с. При выбранном её значении протяжённость зоны не должна выходить за пределы зон быстродействующих защит линий и трансформаторов, питающихся от подстанции Б. Третья зона должна резервировать защиты присоединений, отходящих от шин подстанции Б. Уставки срабатывания этой зоны выбираются, как правило, по условию отстройки от нагрузки, а выдержка времени – по условию селективности.

Уставка реле сопротивления выбирается из условия отстройки от минимального значения рабочего сопротивления, появляющегося на зажимах реле после отключения внешнего КЗ. Это значение будет при максимальном токе нагрузки в фазе и пониженном уровне рабочего напряжения, обычно принимаемого на 5...10% меньше номинального. Пересчёт полученных первичных сопротивлений на вторичную сторону производят по формуле  $z_{cp} = z_{cз} \frac{n_m}{n_n}$ .

Подставляя вместо сопротивления на зажимах реле  $z_{cз}$  значения  $z_I$ ,  $z_{II}$ ,  $z_{III}$ , находят значения вторичных сопротивлений срабатывания в данной зоне.

Все реле сопротивления должны работать в таком диапазоне токов КЗ, чтобы погрешность реле не превышала 10%.

### **6.3.2. Дифференциальные защиты (ДЗ).**

#### **6.3.3.1. Способы выполнения ДЗ.**

*Дифференциальными* называются защиты, непосредственно сравнивающие электрические величины по концам защищаемого элемента (*продольные* защиты) или в цепях одного элемента или подстанции (*поперечные* защиты). Эти защиты обладают *абсолютной* селективностью, т.е. принципиально могут срабатывать только при КЗ на защищаемом элементе, и выполняются без выдержки времени.

В продольных защитах обычно сравниваются мгновенные значения токов, модули и фазы или только фазы токов. В поперечных защитах сравниваются мгновенные значения токов, их фазы или модули, а также мощности. Для продольных защит применяются проводные, ВЧ- и радиоканалы, для поперечных – проводные (вспомогательные провода). ДЗ используются в сочетании с другими, например резервными, защитами, имеющими *относительную* селективность, т. е. срабатывающими при внешних КЗ на смежных элементах.

#### **6.3.3.2. Принцип действия продольных ДЗ.**

Продольная ДЗ рассматривается ниже в исполнении её с проводным каналом. На обоих концах защищаемой зоны устанавливаются трансформаторы тока  $TA_A$  и  $TA_B$  с одинаковыми коэффициентами трансформации, вторичные обмотки которых соединяются либо последовательно согласно (рис.6.10), либо параллельно (рис.6.11). При последовательном соединении обмоток ТА измерительный орган ИО реле подключается параллельно соединительным проводам, при параллельном соединении обмоток – в расщекку одного из проводов. Наиболее распространена схема первого типа.

В такой схеме при нормальном режиме работы, а также при *внешнем*, или *сквозном* КЗ в линии, т.е. за пределами защищаемой зоны (рис.6.10,а), вторичные токи ТА циркулируют по соединительным проводам, а через ИО протекает лишь небольшой ток небаланса  $I_p$ , равный их разности, отчего данную схему называют *схемой с циркулирующими токами*. Если предположить, что трансформаторы тока не имеют погрешностей и вторичные токи  $I_{2A}$  и  $I_{2B}$  равны по значению и противоположны по направлению (сдвинуты по фазе на  $180^0$ ), то их разность будет равна нулю и реле не сработает. В действительности значение тока небаланса зависит от полной погрешности трансформаторов тока, от первичного тока  $I_1$  и от момента КЗ, достигая наибольшего значения в первые периоды КЗ. Так как реле должно быть отстроено от максимального значения тока небаланса, чувствительность защиты получается сравнительно малой.

Для повышения чувствительности используют ТА, не насыщающиеся при протекании максимально возможного тока КЗ, преимущественно с сердечниками типа Д. Применяют также промежуточные быстронасыщающиеся (БНТ), или насыщающиеся (НТТ) трансформаторы тока, которые включаются между цепью ТА и входом ИО. Аперiodическая слагающая тока небаланса, протекающего в первичной обмотке БНТ, вызывает быстрое и сильное насыщение его сердечника, что препятствует трансформации тока во вторичную обмотку. По мере затухания аперiodической слагающей периодическая составляющая тока небаланса начинает трансформироваться, но её наибольшее значение получается существенно меньше, чем при отсутствии

БНТ, а это, в свою очередь, позволяет принимать меньшую уставку защиты и повысить тем самым её чувствительность.

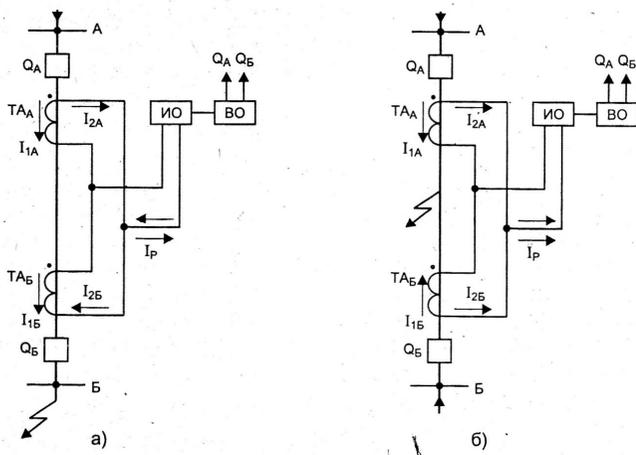


Рис.6.10. Принципиальная схема продольной дифференциальной защиты с циркулирующими токами: а) токораспределение при КЗ вне зоны действия; б) то же при КЗ в зоне действия защиты

При КЗ в зоне действия ДЗ (рис.6.10,б) в случае двустороннего питания направления первичного  $I_{1Б}$  и вторичного  $I_{2Б}$  токов меняется на обратное (на угол  $180^{\circ}$ ) и на вход ИО поступает сумма вторичных токов:  $I_p = I_{2A} + I_{2Б}$ ; реле срабатывает и воздействующий орган ВО подаёт команду на отключение выключателей  $Q_1$  и  $Q_2$ . При одностороннем питании в ИО проходит один из вторичных токов, и защита также срабатывает на отключение повреждённого участка; этот режим является расчётным при оценке чувствительности ДЗ. Если применяется БНТ, то через первичную обмотку его будет протекать не ток небаланса, а гораздо больший трансформированный ток КЗ. Значение периодической составляющей его при этом достаточно велико, и защита надёжно сработает уже через  $1 \dots 1,5$  периода после начала КЗ.

В схеме второго типа (рис.6.11), называемой *схемой с уравновешенными напряжениями*, при нормальной нагрузке и внешнем КЗ вторичные ЭДС трансформаторов тока направлены встречно (рис.6.11,а), ЭДС небаланса недостаточна для срабатывания ИО. При КЗ в зоне защиты (рис.6.10,б) вторичные ЭДС  $E_A$  и  $E_B$  суммируются и вызывают ток  $I_p$ , под действием которого реле срабатывает.

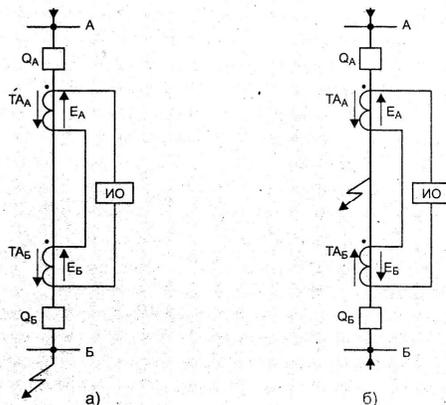


Рис.6.11. Принципиальная схема продольной дифференциальной защиты с уравновешенными напряжениями: а) полярность ЭДС вторичных обмоток ТА при внешнем КЗ; б) то же при КЗ в зоне действия защиты

### 6.3.3.3. Чувствительность защиты.

Поведение ДЗ при внутренних КЗ характеризуется коэффициентом чувствительности – отношением минимального тока КЗ в защищаемой сети к току, при котором срабатывает реле защиты. Согласно ПУЭ, этот коэффициент должен быть не менее 2. В большинстве случаев чувствительность защиты, выполненной по элементарным схемам рис. 6.10 и 6.11, оказывается недостаточной, а неточность определения максимального тока небаланса затрудняет отстройку защиты от внешних КЗ. Среди ряда возможных способов повышения чувствительности и отстроенности защиты наиболее широкое распространение получило использование апериодической составляющей в токе небаланса, преимущественно путём введения в схему промежуточных трансформаторов тока (БНТ, НТТ, или ТАЛТ).

Другим распространённым способом является применение специальных органов защиты с *торможением* (заглублением), ток срабатывания которых возрастает с увеличением тока внешнего КЗ или качаний. Это достигается механическим или магнитным торможением реле за счёт тока повреждения. Поведение защиты в этом случае оценивается коэффициентом торможения, представляющим собой отношение тока срабатывания реле к току в тормозной обмотке:  $k_T = I_{cp} / I_T$ . Вместе с тем при аварии в зоне действия защиты ток срабатывания такого реле оказывается меньше, а чувствительность защиты соответственно выше, чем у реле без торможения. Рабочая обмотка реле включается дифференциально, тормозная – в рассечку соединительного провода. Пример включения электромеханического реле с торможением показан на рис.6.12.

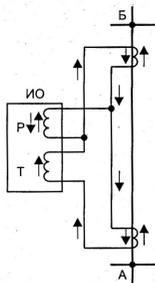


Рис.6.12. Включение электромеханического реле с торможением

При внешнем КЗ в рабочей обмотке появляется ток небаланса, а в тормозной – вторичный ток КЗ, под влиянием которого реле загроубляется и не действует. При КЗ в зоне защиты ток КЗ проходит в обеих обмотках, число витков которых подбирается так, что в этом случае реле срабатывает.

Магнитное торможение осуществляется дополнительным подмагничиванием промежуточного насыщающегося трансформатора TALT током повреждения. Типовой TALT имеет обычно три обмотки: рабочую первичную, рабочую вторичную, питающую максимальный орган тока, и тормозную. Рабочая первичная обмотка включается на сумму токов  $I_A$ , тормозная – на ток одного из плеч защиты. Тормозная система под воздействием тока плеча насыщает магнитопровод, за счёт чего ухудшается магнитная связь между первичной и вторичной обмотками рабочей системы. Поэтому ток срабатывания защиты увеличивается, хотя ток срабатывания ИО (органа тока) остаётся неизменным. При наличии апериодической составляющей тока рассматриваемые TALT глубоко насыщаются, благодаря чему они могут одновременно использоваться как для магнитного торможения, так и для отстройки от токов небаланса. В этом заключается преимущество магнитного торможения по сравнению с механическим.

#### 6.3.3.4. Практическое выполнение схем продольной ДЗ.

Во всех схемах рис.6.10 – 6.12 имеется в виду трёх – или двухфазное (для сетей 35 кВ и ниже) исполнение защит, требующее применения шести (или четырёх) дифференциальных реле и не менее четырёх соединительных проводов. В таком исполнении схемы с циркулирующими токами могут применяться только для линий малой длины, не превосходящей нескольких сот метров (при  $I_A$  с вторичным током 5 А). Если для линий большей длины использовать соединительные провода приемлемых для вторичной коммутации сечений (до 6 мм<sup>2</sup>), то нагрузка  $I_A$ , а следовательно и токи небаланса, получатся очень большими, а чувствительность очень низкой.

С целью сокращения числа жил (до двух) и сечений соединительных проводов, повышения чувствительности и упрощения защиты она выполняется односистемной, причём реле защиты включаются через фильтры симметричных составляющих тока прямой ( $I_1$ ), обратной ( $I_2$ ) или нулевой последовательности. Преимущественное применение находят комбинированные фильтры, основанные на сравнении двух параметров:  $I_1$  и  $kI_2$ . Составляющая прямой последовательности  $I_1$  имеется при всех видах



обмотки  $TAL^II$ , реле  $KA^II$ , секцию обмотки  $TL^II$ , провод А и секцию  $TAL^I$ . Под действием этого тока якоря реле  $KA$  подтянуты.

При обрыве соединительного провода ток контроля исчезает и оба реле  $KA$  отпадают, разрывая оперативную цепь защиты и подавая сигнал о неисправности. При замыкании между проводами А и Б обмотка реле  $KA^II$  шунтируется, реле отпадает, выводя из действия защиты на приёмном конце линии и подавая сигнал. Обычно значение контрольного напряжения составляет 80 В, тока – 5...6 мА. В случае «посадки» напряжения при КЗ на защищаемой линии реле  $KA$  удерживаются током разряда конденсатора С в течение 1...3 с.

Для сигнализации замыкания на землю предусматривается второй выпрямитель, который одним полюсом подключается к земле, другим – к соединительным проводам. При замыкании на землю одного из проводов в цепи выпрямителя возникает ток, вызывающий срабатывание сигнального реле.

Связь между комплектами защиты, расположенными на концах защищаемой линии, осуществляется многожильным бронированным кабелем, обычно телефонным. Жилы кабеля должны иметь как можно меньшее сопротивление и ёмкость. Первое необходимо для ограничения токов небаланса, второе – для повышения чувствительности защиты, так как ёмкость между жилами и на землю шунтирует рабочую обмотку дифференциального реле.

#### **6.3.3.6. Продольные дифференциальные токовые защиты без соединительных проводов.**

В таких ДЗ информация о сравниваемых токах двух сторон участка передаётся по ВЧ или радиоканалу. Наиболее широкое применение нашли защиты с ВЧ каналами, для которых используются блокирующие сигналы с нормально отсутствующими токами ВЧ в канале. Эти сигналы используются на неповреждённых участках для блокирования действия защит последних.

Обычно применяется сравнение фаз токов как наиболее простое и надёжное. Защиты выполняются односистемными; сравниваются токи, получаемые от комбинированных фильтров и представляющие собой векторную сумму токов прямой ( $I_1$ ) и обратной ( $kI_2$ ) последовательностей (так наз. *манипулирующие* токи). В сетях 110 – 220 кВ применяются различные варианты дифференциально – фазной защиты с ВЧ блокировкой, принцип действия которых заключается в следующем. Чувствительные элементы пусковых органов защиты запускают ВЧ приёмопередатчики, а менее чувствительные готовят цепи отключения. В течение каждого положительного полупериода промышленной частоты производится передача фазы манипулирующего тока со стороны данного полукомплекта. Приёмники ВЧ сигналов выполнены так, что выдают токи в органы сравнения фаз только при отсутствии принимаемых сигналов. При внешних КЗ передатчики работают в разные полупериоды, создавая в совокупности непрерывный сигнал и тем самым блокируя защиту. При внутренних КЗ сигнал имеет прерывистый характер, обеспечивающий срабатывание защиты.

#### **6.3.3.7. Поперечные дифференциальные защиты.**

Применяются для параллельных цепей с одинаковыми или не очень различающимися параметрами, присоединяемых к шинам через отдельные или общие выключатели. Принцип действия их основан на том, что токи в этих цепях при нормальной работе и внешних КЗ близки по значению, а при КЗ на одной из цепей резко разли-

чаются. Применяются два вида поперечных ДЗ: для цепей с одним общим выключателем – токовая, для цепей с отдельными выключателями – направленная поперечная дифференциальная защита.

*Токовая* поперечная ДЗ предназначена для параллельных линий с общим выключателем. Схема защиты для одной фазы изображена на рис.6.14. На одноимённых фазах каждой линии устанавливаются трансформаторы тока с одинаковым коэффициентом трансформации. Вторичные обмотки их соединяются по схеме с циркуляцией токов. В нормальном режиме и при внешних КЗ в обмотке реле Т протекает только ток небаланса, обусловленный некоторым различием первичных токов  $I^I$  и  $I^{II}$  и погрешностью трансформаторов тока. Поскольку уставка реле Т выбирается больше тока небаланса, в этих режимах, а также при качаниях защита не работает (рис.6.14,а).

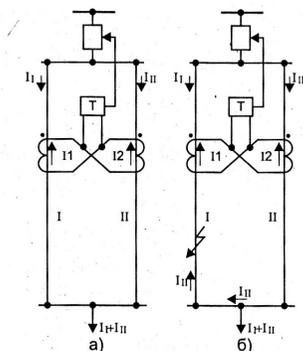


Рис.6.14. Упрощенная принципиальная схема токовой поперечной дифференциальной защиты: а) режим нагрузки и внешнего КЗ; б) режим КЗ на линии I

В случае КЗ на одной из линий, например I (рис.6.14,б), токораспределение изменится. Так как сопротивление линии I (от шин питающей подстанции до точки К) меньше суммарного сопротивления линии II и остальной части линии I, ток  $I_1$  превысит ток  $I_{II}$ . Если при этом разность вторичных токов  $I_1$  и  $I_2$  будет равна или больше уставки реле Т, защита сработает на отключение линии. Но если КЗ произошло вблизи шин приёмной подстанции, токи  $I_1$  и  $I_{II}$  будут отличаться незначительно, а их разность будет недостаточна для действия защиты.

Участок линий вблизи шин приёмной подстанции, при повреждении на котором защита не работает, называется «*мёртвой зоной*». Для действия в этой зоне устанавливается дополнительная защита, обычно максимальная токовая. В режиме работы только одной линии токовая поперечная дифзащита должна быть отключена.

*Направленная* поперечная дифференциальная защита предназначена для двух параллельных линий с отдельными выключателями и может выбирать и отключать только одну повреждённую линию. Защита (рис.6.15) состоит из пускового органа в виде токового реле Т и органа (реле) направления мощности М двустороннего действия (иногда применяются два реле одностороннего действия, срабатывающие при

разном направлении мощности). Токовые обмотки их соединены последовательно и включены на разность токов защищаемых линий, обмотка напряжения реле М подсоединена к шинам подстанции.

Напряжение, подводимое к реле М, изменяется только по значению в зависимости от удалённости места КЗ от шин подстанции, тогда как ток, проходящий через реле мощности, изменяет также и своё направление в зависимости от того, на какой из линий произошло повреждение. Так, при повреждении на линии I ток  $I_I$  в ней будет больше тока  $I_{II}$  в линии II, а их разность будет совпадать по направлению с током  $I_I$ . В результате реле М замкнёт свой верхний (по схеме рис.6.15) контакт и выключатель  $Q_I$  отключит повреждённую линию I. При КЗ на линии II ток  $I_{II}$  будет больше тока  $I_I$ , их разность и ток  $I_P$  в реле изменят направление на обратное (см. векторные диаграммы рис.6.15), замкнётся нижний контакт реле М и выключатель  $Q_{II}$  отключит линию II.

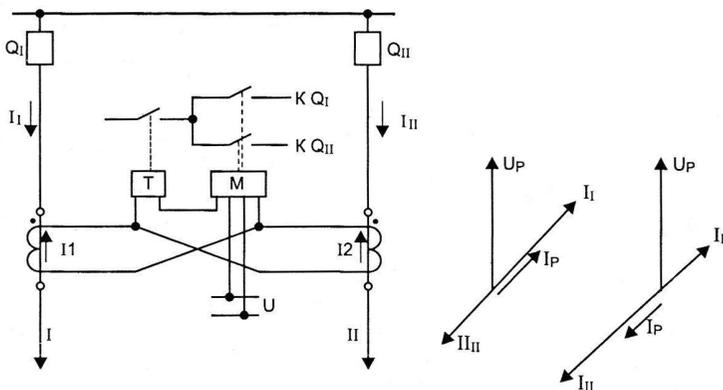


Рис.6.15. Упрощенная принципиальная схема направленной поперечной дифференциальной защиты и векторные диаграммы при КЗ на линиях I и II

Направленная ДЗ правильно действует только при условии, если включены обе линии. Когда одна из них отключается, дифференциальный принцип защиты нарушается, и она превращается в направленную токовую защиту без выдержки времени, что может привести к неселективному отключению второй линии при внешних КЗ. Во избежание этого при отключении выключателя одной из линий поперечные направленные ДЗ выводят из действия путём разрыва цепи оперативного тока.

Направленная поперечная ДЗ так же, как и токовая поперечная ДЗ, имеет «мёртвую зону» при повреждениях вблизи данной подстанции А или противоположной подстанции Б, но не отказывает, как токовая, а действует последовательно. При повреждении, например вблизи подстанции Б на линии II, в реле защиты на подстанции А будет протекать небольшой ток небаланса, пропорциональный разности первичных токов и недостаточный для срабатывания этого реле. Вместе с тем в реле комплекта защиты, установленного на подстанции Б, ток будет пропорционален сумме первичных токов и реле подействует на отключение выключателя линии II со стороны шин подстанции Б. Протекание тока КЗ по линии I прекратится, и ток в реле за-

щиты подстанции А станет равным (точнее, пропорциональным) полному току КЗ, проходящему по линии П. Защита сработает и отключит выключатель этой линии на подстанции А, благодаря чему аварийная линия будет отключена с обоих концов и КЗ на ней полностью ликвидировано. В этом случае питание подстанции Б сохраняется по неповрежденной линии I.

Такое поочередное действие защиты называется *каскадным*, а зона, в пределах которой направленная дифзащита не срабатывает, пока поврежденная линия не отключится с противоположной стороны, называется *зоной каскадного действия* защиты. При каскадном действии полное время отключения КЗ защитой удваивается, что является её недостатком. Сокращение зоны каскадного действия достигается уменьшением тока срабатывания защиты. Кроме того, при близких трёхфазных КЗ образуется мертвая зона по напряжению: значение напряжения, подводимого к органу направления мощности, оказывается недостаточным для его действия, и защита отказывает в работе.

#### **6.3.4. Защита от замыканий на землю.**

Защита линий от КЗ на землю (однофазных и двухфазных) базируется на использовании тока и напряжения нулевой последовательности. Такой принцип осуществляется более просто и имеет ряд преимуществ по сравнению с токовой защитой, реагирующей на полные токи фаз. При КЗ на землю в каждой фазе возникают токи нулевой последовательности  $I_0$ , а в месте замыкания проходит ток КЗ, равный сумме токов нулевой последовательности всех трёх фаз:  $I_k = 3 I_0$ .

В сетях с большим током замыкания на землю токи  $I_0$  проходят по контуру фаза – земля через место повреждения и заземлённые нейтрали трансформаторов. Если трансформаторы с заземлённой нейтралью отсутствуют, токи нулевой последовательности в таких сетях не протекают.

В сетях с малым током замыкания на землю (сети 35 кВ и ниже) токи  $I_0$  проходят по контуру фаза – земля через место повреждения и общую точку ёмкостей фаз сети относительно земли.

##### А. Сети с большим током замыкания на землю.

#### **6.3.4.1. Максимальная токовая защита нулевой последовательности.**

Защита (рис.6.16) состоит из пускового реле КА и реле времени КТ. Реле КА включается на фильтр тока нулевой последовательности, для чего используется параллельное соединение трансформаторов тока. Реле КТ создаёт выдержку времени, требуемую по условиям селективности. Ток  $I_p$  в реле КА равен  $3I_0$ , поскольку сумма симметричных составляющих равна 0. Защита может работать только при одно- и двухфазных КЗ, когда имеется ток  $I_0$ . При междуфазных КЗ (без «земли»), а также при симметричной нагрузке и качаниях защита не действует, так как в этих режимах сумма фазных токов равна нулю. Отстраивать защиту от токов нагрузки не требуется, что позволяет обеспечить более высокую её чувствительность по сравнению с защитами, реагирующими на фазные токи.

Однако равенство  $I_p = 3I_0$  возможно лишь при условии полной идентичности трансформаторов тока и их цепей. В действительности даже при полном равенстве первичных токов в цепи реле КА будет протекать ток небаланса, который вычитается из тока  $3 I_0$ , уменьшая значение тока  $I_p$  и снижая тем самым чувствительность защиты. Для ограничения тока небаланса трансформаторы тока должны: а) удовлетворять

условию 10% – ной погрешности при максимальном значении тока трёхфазного КЗ; б) иметь идентичные характеристики намагничивания; в) иметь одинаковую нагрузку. Чтобы исключить ложное действие защиты, вызванное током небаланса, уставку тока пусковых реле защиты выбирают заведомо больше тока небаланса. Ток небаланса в нормальном режиме определяется измерением. У трансформаторов тока с номинальным вторичным током 5 А его значение составляет от 0,01 до 0,2 А, и поэтому ток срабатывания можно выбрать достаточно малым: 0,5...1 А.

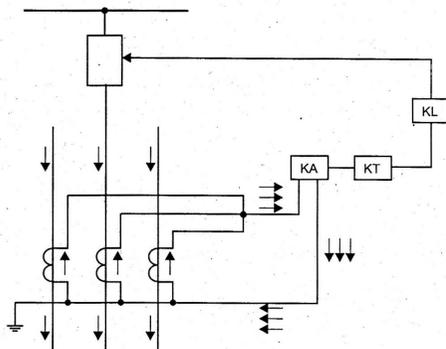


Рис.6.16. Принципиальная схема защиты нулевой последовательности

#### 6.3.4.2. *Токковые направленные защиты нулевой последовательности.*

Защита содержит органы, токовые цепи которых включаются на составляющие нулевой последовательности  $I_0$  (обычно  $3I_0$ ), а цепи напряжения – на составляющие  $U_0$  ( $3U_0$ ) соответственно фазных токов и напряжений. Схема защиты приведена на рис.6.17. Защита состоит из токового реле КА, реагирующего на появление КЗ на землю, реле мощности KW, определяющего направление мощности при КЗ, и реле времени КТ, создающего выдержку времени для обеспечения селективности. Реле КА и токовая обмотка реле KW включены на ток  $3I_0$ , а поляризирующая обмотка (обмотка напряжения) реле KW питается от трансформатора напряжения, обмотки которого соединены по схеме разомкнутого треугольника. При таком включении реле KW реагирует на мощность нулевой последовательности  $S_0 = U_0 I_0$ . Ток  $3I_0$  равен току  $I_k$  замыкания на землю; напряжение  $3U_0$  имеет наибольшее значение (порядка фазного) в месте КЗ.

Принято считать, что мощность нулевой последовательности направлена от места повреждения к заземлённым нейтралям сети. Поскольку мощность  $S_0$  и мощность КЗ в повреждённой фазе  $S_k$  имеют противоположные знаки, обмотки напряжения и тока реле KW должны включаться с разноимённой полярностью.

В некоторых схемах поляризирующая обмотка реле мощности подключается не к трансформатору напряжения, а к специальному трансформатору тока, установленному в цепи заземления силового трансформатора. В таких схемах используются реле, имеющие две токовые обмотки (реле с токовой поляризацией).

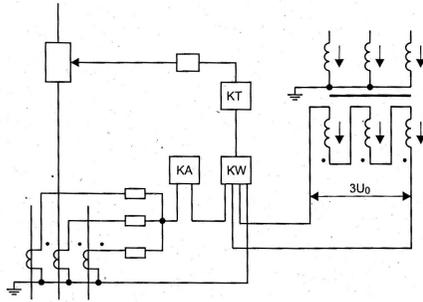


Рис.6.17. Принципиальная схема токовой направленной защиты нулевой последовательности

#### 6.3.4.3. Отсечки нулевой последовательности.

Применяются для ускорения отключения КЗ. Принцип действия их такой же, как и у отсечек, реагирующих на фазный ток. Выполняются простыми токовыми или направленными, мгновенными или с выдержкой времени.

*Токовые* (ненаправленные) отсечки нулевой последовательности применяются на линиях с односторонним прохождением тока  $I_0$  при КЗ на землю, т. е. там, где заземлённые нейтрали трансформаторов расположены с одной стороны линии. *Мгновенные* отсечки отстраиваются от тока  $3I_0$  при КЗ на землю на шинах противоположной подстанции. Отсечки с *выдержкой времени* отстраиваются по току и времени от мгновенной отсечки следующей линии.

Схема *направленной* отсечки нулевой последовательности с *выдержкой времени* аналогична показанной на рис.6.17. Направленная защита с *отсечкой* выполняется по той же схеме, но без реле времени.

Ток срабатывания мгновенных отсечек на параллельных линиях необходимо выбирать с учётом значительной взаимоиндукции, которая увеличивает сопротивление нулевой последовательности соседней линии при одинаковом направлении токов  $I_0$  в линиях, а при различном – уменьшает его. Это обстоятельство учитывается также и при выборе тока срабатывания отсечки с выдержкой времени. Токи нулевой последовательности рассчитываются для того вида КЗ на землю (однофазное или двухфазное), при котором их значение оказывается наибольшим.

Защита нулевой последовательности получила широкое распространение в сетях 110 кВ и выше. Положительными качествами её являются простота схем, высокая надёжность и чувствительность. К недостаткам относят то, что она реагирует на токи в неполнофазных режимах работы и может действовать ложно при обрыве фазного провода во вторичной цепи трансформаторов тока.

#### Б. Сети с малым током замыкания на землю.

##### 6.3.4.4. Токи и напряжения при однофазном замыкании на землю (рис.6.18).

При металлическом замыкании на землю одной из фаз (рис.6.18,а) напряжение её относительно земли снижается до нуля, а напряжение нейтрали становится равным по значению и обратным по знаку ЭДС этой фазы. Напряжения неповреждённых фаз повышаются до междуфазного.

В месте повреждения проходят токи, замыкающиеся через ёмкости фаз. Сумма этих токов равна утроенному значению нормального ёмкостного тока фазы.

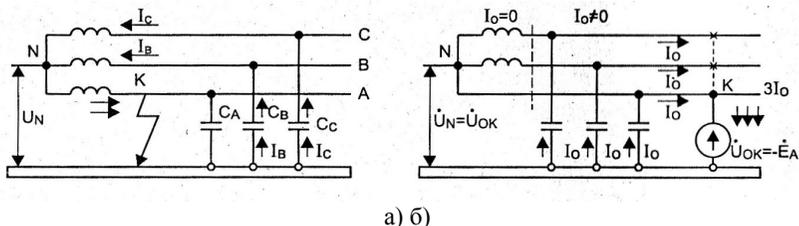


Рис. 6.18. Токи и напряжения при замыкании на землю: а) замыкание фазы А; б) токи нулевой последовательности

Вследствие нарушения симметрии фазных токов и напряжений появляются их составляющие нулевой последовательности (рис. 6.18,б). Напряжение нулевой последовательности равно и противоположно ЭДС повреждённой фазы и равно напряжению в нейтрали сети. Условно принимается, что в точке К замыкания на землю действует источник питания с ЭДС, равной  $U_{0к} = U_N$ . Токи  $I_0$ , возникающие под действием напряжения  $U_{0к}$ , замыкаются через ёмкость фаз и заземлённые нулевые точки. Ток замыкания на землю в месте повреждения равен  $3 I_0$ .

При замыкании через переходное сопротивление на повреждённой фазе появляется напряжение. Напряжение в нулевой точке оказывается меньше, чем при металлическом КЗ. Соответственно уменьшаются напряжения неповреждённых фаз относительно земли, а также ток  $I_0$ . Снижение напряжения и тока нулевой последовательности характеризуется коэффициентом полноты замыкания  $\beta = U_{0к}/U_{ф}$ .

В кабельных сетях, а также в протяжённых воздушных сетях 35 кВ ёмкостные токи замыкания на землю могут достигать десятков и сотен ампер. В таких сетях для улучшения условий гашения дуги и предотвращения перехода замыкания на землю в междуфазное КЗ устанавливаются дугогасящие реакторы, или катушки (ДГР, ДГК), компенсирующие основную гармонику тока замыкания на землю. Такие сети называются *компенсированными*, или с компенсированной нейтралью. При замыкании на землю напряжения во всех точках такой цепи имеют те же значения, что и в сети с изолированной нулевой точкой. Ток в месте повреждения равен разности индуктивной и нулевой составляющих, а при их равенстве – нулю.

#### 6.3.4.5. Принципы выполнения защиты от замыканий на землю.

В компенсированных сетях и в сетях с малыми ёмкостными токами (до 10...20 А в сетях 10 и 6 кВ) замыкания на землю могут оставаться довольно длительное время, не вызывая повреждений и не нарушая работы потребителей. Поэтому защиту от однофазных замыканий в таких сетях выполняют с действием на сигнал, кроме сетей, где по условиям безопасности требуется немедленное отключение (карьеры, торфопредприятия и др.). Защита выполняется селективной и имеет высокую чувствительность, так как должна реагировать на малые токи повреждения: обычно 5...10 А, на торфопредприятиях – менее 0,5 А.

Простейшей защитой является общая *неселективная* сигнализация о возникновении замыкания на землю без указания повреждённого участка. Схема (рис.6.19) содержит три реле минимального напряжения, включённых на напряжение фаз относительно земли (рис.6.19,а), или одно реле, включённое на напряжение нулевой последовательности (рис.6.19,б).

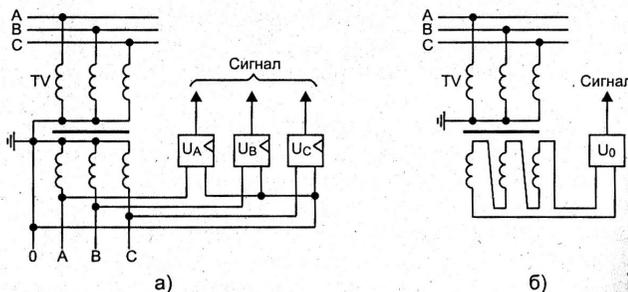


Рис.6.19. Схемы неселективной сигнализации при замыканиях на землю: а – с реле минимального напряжения; б – с реле, включённым на напряжение нулевой последовательности

При появлении сигнала дежурный определяет повреждённый элемент поочерёдным отключением присоединений. Такой способ связан с отключением потребителей, требует много времени и особенно неудобен на подстанциях без обслуживающего персонала.

В качестве *селективных* защит, указывающих повреждённый участок, применяются токовые и направленные защиты, реагирующие на ток и напряжение нулевой последовательности. Для обеспечения селективной работы защиты используется различие в значении и направлении токов на повреждённом и неповреждённом участках.

В некомпенсированных сетях наиболее простым решением является применение токовых защит, реагирующих на ёмкостный ток сети. В компенсированных сетях для действия защиты приходится создавать ток искусственным путём, использовать токи и напряжения переходного режима или остаточные (естественные) токи, в том числе неосновных гармоник.

#### **6.3.4.6. Защиты, реагирующие на искусственно созданные токи нулевой последовательности.**

Одним из способов искусственного создания тока является работа сети в режиме перекомпенсации, при котором ток ДГР превышает ёмкостный ток. Избыточный ток имеет индуктивный характер, его значение не должно превышать 25...15 А для сетей 6 – 10 кВ. Однако расстройка компенсации ухудшает работу сети и потому нежелательна. Другим способом является наложение тока промышленной частоты (например, 100 или 25 Гц), подаваемого в цепь ДГР от постороннего источника.

### 6.3.4.7. Токовая защита, реагирующая на полный ток нулевой последовательности.

Предназначена для радиальных сетей.

В некомпенсированной сети она реагирует на естественный ёмкостный ток, а в компенсированной действует от остаточного тока перекомпенсации. Реагирующий орган защиты состоит из токового реле, питающегося через фильтр нулевой последовательности. В качестве последнего применяют либо трёхтрансформаторный фильтр (рис.6.16), либо специальный трансформатор тока нулевой последовательности (ТНП). В первом случае ток  $3 I_0$  получается суммированием вторичных токов, во втором – первичных. Защита с ТНП обладает значительно большей чувствительностью и является основной для сетей с малым током замыкания на землю.

Магнитопровод ТНП имеет обычно форму кольца или прямоугольника, охватывающего все три фазы защищаемой линии. Проводники фаз А, В и С служат первичной обмоткой трансформатора, вторичная обмотка располагается на магнитопроводе и питает реле тока КА (рис.6.20). В режиме нагрузки, трёх- и двухфазного КЗ (без замыкания на землю) сумма токов фаз близка к нулю (ток небаланса) и реле КА не действует. При замыкании на землю появляется составляющая  $I_0$ , вызывающая срабатывание реле. Однако погрешность ТНП велика, из-за чего, в частности, нельзя вычислять вторичный ток по значению первичного тока и коэффициенту трансформации. Поэтому реле настраивают при подаче тока в первичную цепь.

Через оболочку кабелей (стальную броню и свинец) могут протекать токи, которые появляются в земле замыканиях на землю, при работе сварочных аппаратов и в других случаях.

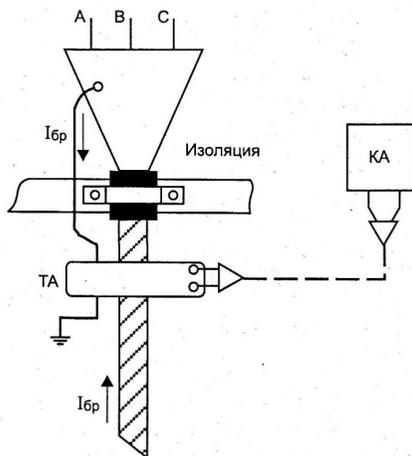


Рис.6.20. Кабельный ТА нулевой последовательности (ТНП)

Прохождение тока  $I_{0р}$  по броне неповреждённого кабеля вызывает вторичный ток в обмотке ТНП, из-за чего возможно неправильное действие защиты. С целью исключения такой возможности броня и оболочка кабеля изолируются от земли на уча-

стке от воронки до ТНП. Заземляющий провод присоединяется к воронке кабеля и пропускается через окно ТНП.

При таком исполнении ток, проходящий по броне кабеля, возвращается по заземляющему проводу в обратном направлении, так что суммарный магнитный поток в сердечнике от тока  $I_{\text{бр}}$  равен нулю.

Чувствительность данного вида защиты невысока. Это объясняется тем, что при замыкании на землю какой – либо линии ток замыкания проходит к шинам подстанции через ёмкости других присоединений, и поэтому защиту каждой линии приходится отстраивать от бросков ёмкостного тока при замыканиях на других линиях, тем самым загроуляя её. На подстанциях с малым числом линий, в компенсированных сетях с малым остаточным током ёмкостный ток неповреждённой линии (от которого отстраивается её защита) бывает соизмерим с током замыкания на землю в повреждённой линии. В сетях торфоразработок применяются реле повышенной чувствительности (с усилителями) и специальные ТНП.

Для грубой оценки средних значений тока замыкания на землю (при отсутствии данных о кабелях сети и конструкции воздушных линий) можно воспользоваться следующими выражениями:  $I = U_{\text{л}} \times l / 10$  для кабельных и  $I = U_{\text{л}} \times l / 350$  (А) для воздушных линий, где  $U_{\text{л}}$  – линейное напряжение сети, кВ;  $l$  – длина линии, км.

#### **6.3.4.8. Наложение токов непромышленной частоты.**

Достаточно просто осуществляется устройство, использующее ток частотой 100 Гц. На сердечнике обычной дугогасящей катушки помещается дополнительная обмотка, цепь которой кратковременно замыкается через однополупериодный выпрямитель при появлении напряжения нулевой последовательности, т.е. при замыкании на землю. В этом случае ток, проходящий через ДГР, будет наводить в дополнительной обмотке ЭДС, а однополупериодный ток в её цепи, в свою очередь, вызовет появление составляющей второй гармоники (100 Гц) в первичном токе ДГР. Поскольку первичный ток замыкается через место повреждения, ток второй гармоники появляется в ТНП только заземлившейся линии, обеспечивая селективную сигнализацию. Устройство, реагирующее на ток второй гармоники, содержит токовое реле, работающее на выпрямленном токе и включённое на ТНП через фильтр токов второй гармоники.

#### **6.3.4.9. Направленная защита.**

В радиальных сетях, когда собственные ёмкостные токи отдельных присоединений соизмеримы с полным ёмкостным током сети, токовая защита неприменима и целесообразно использование направленной защиты. Защита состоит из одного реле мощности, которое включается на ток и напряжение нулевой последовательности.

В некомпенсированной сети защита реагирует на мощность нулевой последовательности, создаваемую ёмкостным током линии. Поскольку направление тока, а следовательно и мощности, на повреждённой и неповреждённой линиях противоположно, направленное реле может определить повреждённую линию по знаку мощности.

В сети, работающей с перекомпенсацией ёмкостного тока, направленная защита неприменима, так как реактивный ток, протекающий в повреждённой линии, и ёмкостный ток в неповреждённой имеют одинаковое направление.

В компенсированной сети реле мощности используется в тех случаях, когда требующийся для действия защиты активный ток создаётся искусственным путём.

Для правильной работы направленной защиты необходима большая угловая точность измерительных трансформаторов и самого реле.

#### **6.3.4.10. Защиты, реагирующие на остаточные токи компенсированной сети.**

Ток замыкания на землю содержит не только основную, но и высшие гармоники, а также активную составляющую основной частоты, которые остаются некомпенсированными.

Активная составляющая тока замыкания обуславливается потерями в сети и дугогасящей катушке и составляет 3...5% тока ДГР. Эта составляющая используется для работы защиты в связи с тем, что активный ток протекает только по повреждённому присоединению. Защита выполняется с помощью реле мощности косинусного типа, реагирующего на активную составляющую мощности нулевой последовательности.

Составляющие высших гармоник в установившемся токе замыкания на землю появляются вследствие несинусоидальности фазных токов и наличия нелинейной нагрузки (печной, тяговой и т.п.). Только за счёт токов намагничивания силовых трансформаторов содержание высших гармоник достигает 5% ёмкостного тока основной гармоники. Ток замыкания на повреждённом присоединении равен сумме собственных ёмкостных токов всех элементов сети и тока ДГР. Поэтому результирующий ток  $I_0$  в повреждённом присоединении содержит значительно больше высших гармоник, чем в неповреждённых.

На этом различии основано выполнение токовой защиты, реагирующей на сумму высших гармоник тока  $I_0$ . Защита осуществляется с помощью токового реле, включённого на ток сети через запирающий фильтр 50 Гц.

#### **6.3.4.11. Защиты, реагирующие на токи неустановившегося режима.**

Различают два вида таких защит, реагирующих либо на появление токов высокой частоты, либо на полярность (знак) волн тока или соответствующей ему мощности.

Токи высокой частоты возникают во время переходного процесса при замыкании на землю, когда ёмкость заземлившейся фазы разряжается, а ёмкости двух других фаз заряжаются до линейного напряжения. Процесс разряда и дозаряда ёмкостей фаз носит характер периодических затухающих колебаний с частотой в пределах от 200 до 3000 Гц и временем затухания 0,01...0,025 с. Максимальное значение переходного тока примерно пропорционально частоте колебаний и может в десятки раз превосходить ток установившегося режима частотой 50 Гц. На повреждённой линии переходный ток имеет наибольшее значение. Защита выполняется с помощью быстродействующих токовых реле и фильтра, пропускающего только высокочастотные составляющие.

Принцип действия защиты, реагирующей на волновые процессы, основан на том, что в момент замыкания на землю появляются волны тока и напряжения нулевой последовательности, распространяющиеся в обе стороны от места повреждения. Направление (или знак) тока и мгновенной мощности в повреждённом и неповреждённом присоединении будет различным. Защита реагирует на знак волны тока или мгновенной мощности на фронте волны. В первом случае в качестве реагирующего органа применяется реле тока, во втором – импульсное реле мощности.

## 6.4. Защита отдельных видов электрооборудования

### 6.4.1. Защита трансформаторов

#### 6.4.1.1. Повреждения и ненормальные режимы трансформаторов и автотрансформаторов.

Основными видами *повреждений* являются:

а) замыкания между фазами внутри кожуха трансформатора и на наружных выводах обмоток; б) замыкания в обмотках между витками одной фазы (так наз. витковые замыкания); замыкания на землю обмоток или их наружных выводов.

Наиболее часто возникают КЗ на выводах и витковые замыкания. При витковых замыканиях ток может быть небольшим, так как значение его пропорционально числу замкнувшихся накоротко витков. В случае замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью ток повреждения определяется ёмкостной проводимостью сети. Защита должна обладать высокой чувствительностью и быстройдействием. Применяются токовая отсечка, дифференциальная и газовая защиты.

К *ненормальным* режимам относится появление сверхтоков, возникающих в трансформаторе при внешних КЗ, качаниях и перегрузках. При *внешнем* КЗ защита должна отключать трансформатор с минимальной выдержкой времени, необходимой для обеспечения селективности. Осуществляется при помощи максимальной токовой защиты, максимальной защиты с блокировкой минимального напряжения, токовой защиты нулевой последовательности и защиты обратной последовательности. Защиты от сверхтоков являются также резервными от повреждений в трансформаторе.

*Перегрузки* допускаются в течение значительного времени, в зависимости от кратности по отношению к номинальному току. Для масляных трансформаторов допускается длительная перегрузка на 5%, если напряжение на данном ответвлении не превышает номинального. В зависимости от режима работы допускаются систематические перегрузки, значение и длительность которых регламентируются документами для конкретных групп и типов трансформаторов, а также инструкциями заводов – изготовителей.

Чаще всего возникают кратковременные, самоликвидирующиеся перегрузки, при которых отключения трансформатора не требуется. Более длительные перегрузки ликвидируются дежурным персоналом или автоматически. Защита от перегрузки осуществляется с действием на сигнал или на отключение в зависимости от наличия на подстанции обслуживающего персонала.

К числу ненормальных режимов относится также *повышение напряжения*. Оно вызывает увеличение магнитной индукции, тока намагничивания и вихревых токов и, как следствие, повышенный нагрев изоляции обмоток и стали сердечника. Допускается продолжительная работа трансформаторов (с мощностью не более номинальной) при напряжении на любом ответвлении обмотки на 10% больше номинального для данного ответвления. При этом напряжение на любой обмотке должно быть не выше наибольшего рабочего.

Для масляных трансформаторов ненормальным режимом является и *понижение уровня* масла ниже допустимого, что можно обнаружить по сигналу газового реле и указателю уровня масла. Для герметичных масляных трансформаторов ненормальным режимом является также повышение давления масла в баке.

### 6.4.1.2. Защита от сверхтоков при внешних КЗ.

Наиболее простой является *максимальная токовая защита*; когда её чувствительность оказывается недостаточной, применяются другие виды защит трансформаторов. Ниже имеются в виду только понижающие трансформаторы.

*Расчёты токов КЗ.* Эти расчёты производятся, как правило, проектной организацией, но в необходимых случаях подлежат проверке при наладке. Для выбора типов и уставок защиты определяют максимальное и минимальное значения токов при КЗ на выводах НН (КЗ за трансформатором).

Максимальное расчётное значение тока соответствует трёхфазному металлическому КЗ за трансформатором. Оно используется для выбора уставок токовых отсечек на стороне ВН, а также аппаратуры и токопроводов на стороне НН трансформатора. Минимальные значения токов КЗ используются при определении коэффициентов чувствительности для всех типов защит трансформатора (кроме газовой).

Наиболее просто максимальное значение тока трёхфазного КЗ (ТКЗ) за трансформатором вычисляется по напряжению КЗ, значение которого указывается в паспорте (паспортной табличке) трансформатора:

$$I_k = \frac{100I_n}{u_k + p},$$

где  $u_k$  – напряжение КЗ,%;  $I_n$  – номинальный ток трансформатора;  $p$  – коэффициент,%,  $p = 100 S_n / S_{п.к}$ , где  $S_n$  – номинальная мощность трансформатора;  $S_{п.к}$  – мощность трёхфазного КЗ питающей энергосистемы, т.е. КЗ на выводах ВН трансформатора; если мощность энергосистемы сравнительно велика («бесконечна»), то  $p = 0$ .

Пусть, например, трансформатор напряжением 10 / 0,4 кВ, мощностью 1 МВ·А, напряжением  $u_k = 5,5\%$  подключён к сети в точке, где мощность  $S_{п.к} = 100$  МВ·А. Тогда имеем: номинальный ток (на стороне 0,4 кВ)  $I_n = 1445$  А, коэффициент  $p = 1\%$  и ток  $I_k = 22,2$  кА; при  $p = 0$  ток  $I_k = 26,3$  кА.

Ток трёхфазного КЗ можно вычислить и по полному сопротивлению трансформатора  $z_T$ :

$$I_{к.3} = U_n / 1,73z_T; z_T = \frac{u_k U_n^2}{100S_n}.$$

Воспользовавшись данными приведённого примера, будем иметь (на стороне 0,4 кВ):  $z_T = 8,8$  мОм;  $I_k = 26,3$  кА, что полностью совпадает с результатами расчёта по напряжению КЗ для питающей сети бесконечной мощности.

Активное сопротивление трансформатора  $r_T$  (Ом) вычисляется по выражению

$$r_T = P_k U_n^2 / S_n^2,$$

где  $P_k$  – потери короткого замыкания; значения  $P_k$  приводятся в каталогах, справочниках, заводской документации.

Индуктивное сопротивление трансформатора вычисляется как

$$x_T = \sqrt{z^2 - r^2}$$

Значения соответствующего сопротивления каждой обмотки можно принять равными примерно половине вычисленного таким образом значения (см., например, табл.3.6).

Минимальное значение тока при трёхфазном КЗ рассчитывается с учётом сопротивления питающей сети и переходного активного сопротивления в месте КЗ, наибольшее значение которого (отнесённое к стороне 0,4 кВ) принимается равным 15 мОм.

Специальные расчёты токов при двухфазных КЗ за трансформатором не производятся, их значения принимаются на 15% меньше, чем тока трёхфазного КЗ.

Расчёт токов  $I_{к.1}$  однофазного КЗ за трансформаторами с глухозаземлённой нейтралью на стороне НН производится по формуле

$$I_{к.1} = \frac{U_{\phi}}{1/3z_T^1},$$

где  $U_{\phi} = 230$  В – фазное напряжение;  $z_T^1$  – полное сопротивление трансформатора в несимметричном режиме однофазного КЗ. Особо следует отметить, что значения сопротивлений трансформатора в симметричном трёхфазном и однофазном (несимметричном) режимах КЗ прямой связи между собой не имеют. Как правило, ток трёхфазного КЗ превышает ток однофазного КЗ. Значения последнего зависят, в основном, от мощности трансформатора и схемы соединения его обмоток (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Расчётные значения сопротивления  $z_{т.1}/3$  трансформаторов 6 – 10 / 0,4 кВ при однофазном КЗ на стороне 0,4 кВ

Номинальная мощность трансформаторов кВА	Схема соединения	Сопротивление мОм
<i>Масляные трансформаторы</i>		
20	Звезда-звезда с нулём	1390
25	Звезда-звезда с нулём	1040
30	Звезда-звезда с нулём	900
40	Звезда-звезда с нулём	650
50	Звезда-звезда с нулём	540
63	Звезда-звезда с нулём	413
100	Звезда-звезда с нулём	260
160	Звезда-звезда с нулём	162
180	Звезда-звезда с нулём	150
250	Звезда-звезда с нулём	104
320	Звезда-звезда с нулём	85
400	Звезда-звезда с нулём	65
400	Треугольник-звезда с нулем	22
560	Звезда-звезда с нулём	48
630	Звезда-звезда с нулём	43

630	Треугольник-звезда с нулем	14
1000	Треугольник-звезда с нулем	9
750	Звезда-звезда с нулём	36
1000	Звезда-звезда с нулём	27
<i>Сухие трансформаторы</i>		
160	Треугольник-звезда с нулем	55
180	Звезда-звезда с нулём	150
250	Треугольник-звезда с нулем	35
400	Треугольник-звезда с нулем	22
320	Звезда-звезда с нулём	35
560	Звезда-звезда с нулём	48
630	Треугольник-звезда с нулем	14
750	Звезда-звезда с нулём	36
100	Звезда-звезда с нулём	27
1000	Треугольник-звезда с нулем	9

Примечание: При вторичном напряжении 230/133 В значения сопротивлений, указанные в таблице, следует уменьшить в три раза.

При отсутствии в табл.3.6 данных для какого – либо типа обмотки ориентировочно можно считать, что сопротивление  $Z_{т.1}$  при схеме треугольник – звезда в 3...3,5 раза меньше, чем при соединении обмоток трансформатора по схеме звезда – звезда. Сопротивление трансформаторов мощностью 1000 кВ·А и более не учитывают.

По минимальным значениям токов однофазного КЗ на стороне НН определяются коэффициенты чувствительности специальных токовых защит нулевой последовательности, а также максимальных токовых защит, установленных на стороне ВН.

*Защита плавкими предохранителями.* Трансформаторы 10 / 0,4 кВ мощностью до 0,63 МВ·А в сельских и городских электрических сетях защищаются плавкими предохранителями, иногда – в сочетании с автоматическими выключателями на стороне 0,4 кВ. Время перегорания плавкой вставки тем меньше, чем выше кратность тока КЗ относительно её номинального тока (зависимая времятоковая характеристика). Рекомендуется выбирать номинальные токи предохранителей (плавких вставок) следующими:

$$I_{н.п} \approx 2 I_{н.т} - \text{на стороне ВН,}$$

$$I_{н.п} \approx I_{н.т} - \text{на стороне НН,}$$

где  $I_{н.п}$  и  $I_{н.т}$  – номинальный ток предохранителя или трансформатора соответственно.

Селективность между предохранителями на сторонах 10 и 0,4 кВ обеспечивается, если время плавления предохранителя 10 кВ при всех реально возможных токах КЗ оказывается больше времени плавления предохранителя 0,4 кВ с учётом коэффициента запаса (обычно 2,5...3). Проверка селективности между предохранителями на стороне 10 кВ и автоматическими выключателями на стороне 0,4 кВ производится путём сравнения времятоковых защитных характеристик этих аппаратов.

*Токовая максимальная защита.* В сети с глухозаземлённой нейтралью защита выполняется по трёхфазной схеме, с изолированной – по схеме неполной звезды.

Включение одного реле на разность токов двух фаз на трансформаторах со схемой соединения обмоток звезда – треугольник не рекомендуется, так как при некоторых видах КЗ такая защита не действует. Схема неполной звезды по сравнению с трёхфазной имеет меньшую чувствительность при КЗ за трансформатором с соединением обмоток звезда – треугольник. Для повышения чувствительности устанавливают третье реле в общем проводе трансформаторов тока, в котором будет проходить сумма токов повреждённых фаз.

Ток срабатывания защиты должен быть больше, чем максимально возможный ток перегрузки. Для предотвращения излишних (неселективных) срабатываний при КЗ на отходящих элементах защита выполняется либо с обратнoзависимой от тока выдержкой времени (с зависимой или ограниченно зависимой характеристикой), либо с независимой. Защита с ограниченно зависимой характеристикой предпочтительна в тех случаях, когда она позволяет ускорить отключение повреждения. Выдержка времени выбирается из условий селективности на ступень (0,3...1с) выше наибольшей выдержки времени защит присоединений, питающихся от трансформатора. Применяются электромеханические, электронные (статические) реле, а также элементы микропроцессорной техники.

*Токовая защита обратной последовательности.* Защита реагирует на ток обратной последовательности, возникающий при несимметричных КЗ. Содержит токовое реле, включённое через фильтр обратной последовательности, и реле времени.

Ток срабатывания защиты выбирается из условий а) отстройки от тока небаланса фильтра и б) согласования по чувствительности с защитами присоединений. Считается, что при токе срабатывания (0,5...0,7)  $I_n$  оба эти условия обеспечиваются. Таким образом, защита обратной последовательности при несимметричных КЗ оказывается более чувствительной, чем максимальная защит, для которой ток срабатывания выбирает больше  $I_n$ .

*Специальная токовая защита нулевой последовательности.* Защита реагирует на ток нулевой последовательности  $I_0$ , возникающий при одно – и двухфазных замыканиях на землю и в трансформаторе. Устанавливается на вторичной стороне трансформаторов с соединением обмотки в звезду с глухозаземлённой нейтралью и содержит токовое реле, включённое на ток нулевой последовательности. Ток  $3I_0$  получается от фильтра нулевой последовательности или от трансформатора тока в цепи, соединяющей нейтраль защищаемого трансформатора с землёй.

Селективность защиты обеспечивается реле времени. Применение реле с зависимой характеристикой не рекомендуется ввиду того, что при малых кратностях тока выдержка времени оказывается чрезмерно велика, тогда как она должна быть минимальной. Если на отходящих элементах имеется дополнительная защита нулевой последовательности без выдержки времени, то защиты нулевой последовательности на вводах трансформатора могут иметь выдержку времени 0,3...0,4 с, а в нейтрали на ступень выше, т.е. 0,6...0,7 с.

На трёхобмоточных трансформаторах защиты нулевой последовательности выполняются направленными, чтобы обеспечить селективность.

Защита автотрансформаторов имеет следующие особенности: 1) По общей части обмотки автотрансформатора протекают встречно направленные токи, и ток в заземляющем проводе может оказаться недостаточным. Поэтому защиту включают на трёхтрансформаторный фильтр нулевой последовательности, устанавливаемый на

стороне высшего и среднего напряжения (ВН и СН). 2) Ввиду электрической связи между обмотками ВН и СН защиты нулевой последовательности на выводах этих обмоток выполняются направленными, так чтобы каждая из них действовала только при КЗ в сети «своего» напряжения. 3) Связь между сетями ВН и СН требует согласования выдержек времени защит нулевой последовательности этих сетей. Как правило, эта защита выполняется двухступенчатой: первая – в виде отсечки, вторая – как резервная для следующего участка цепи.

*Токовая защита с блокировкой (пуском) по напряжению.* Блокировка осуществляется либо с помощью трёх реле минимального напряжения, либо с реле напряжения обратной последовательности и одного реле минимального напряжения, включённого на линейное напряжение. Применяется преимущественно вторая схема как более чувствительная. В связи с тем, что при перегрузках защита не действует, можно не отстраивать токовые реле от аварийных нагрузок и получить большую, чем у простой максимальной защиты, чувствительность.

*Защита от перегрузки.* На подстанциях с дежурным персоналом защита от перегрузки трансформаторов действует на сигнал. Токовое реле устанавливается в одной фазе. Чтобы избежать появления сигналов при КЗ и кратковременных перегрузках, предусматривается реле времени.

На подстанциях без дежурного персонала защита выполняется трёхступенчатой: первая ступень срабатывает при малых перегрузках с действием на сигнал, который передаётся на центральный пункт, вторая – действует на отключение части потребителей при больших перегрузках, третья – резервирует вторую и действует на отключение трансформатора.

Защита от перегрузки трёхобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов осуществляется так, чтобы она реагировала на перегрузку любой из обмоток.

#### **6.4.1.3. Токовая отсечка.**

Это – быстродействующая токовая защита с ограниченной зоной действия. В зону действия отсечки входят ошиновка, выводы и часть обмотки трансформатора со стороны, где установлена защита. В этой зоне отсечка отключает повреждения без выдержки времени.

Достоинством защиты являются простота и быстродействие; она позволяет понизить выдержки времени защиты линий, питающих шины, к которым присоединён защищаемый трансформатор.

#### **6.4.1.4. Дифференциальная защита.**

Защита предназначена для отключения трансформатора при КЗ между фазами, на землю и при замыкании между витками одной фазы. В соответствии с принципом действия дифференциальной защиты трансформаторы тока устанавливаются с обеих сторон защищаемого трансформатора и соединяются по схеме с циркулирующими токами. В дифференциальной защите трансформаторов возможно возникновение больших токов небаланса по следующим причинам:

1) имеется ток намагничивания, значение которого может достигать 5% номинального; особенно может сказаться бросок этого тока при включении трансформатора; 2) значения номинального тока обмоток ВН и НН защищаемого силового трансформатора не совпадают со шкалой первичных номинальных токов измерительных трансформаторов, вследствие чего заметная разность вторичных токов име-

ется даже при рабочей нагрузке трансформатора, а при КЗ возрастает пропорционально току; 3) при всех группах соединения обмоток трансформатора, кроме нулевой, вторичные токи различаются также и по фазе; 4) трансформаторы тока на сторонах ВН и НН, как правило, неидентичны; 5) баланс токов нарушается при регулировании напряжения.

Поэтому принимаются специальные меры по выравниванию вторичных токов как по значению, так и по фазе. Для отстройки от броска тока намагничивания (БНТ) учитывают то обстоятельство, что этот ток быстро затухает (до 1 с), и применяют грубую, но быстродействующую защиту – так наз. дифференциальную отсекку. Используют следующие особенности формы БНТ (рис. 6.21):

- преимущественно однополярный характер тока (с аperiodической составляющей);
- наличие бестоковых пауз длительностью до 7...10 мс;
- наличие переменной составляющей промышленной частоты.

При использовании первой особенности исполнительный орган (реле тока) включается в дифференциальную цепь защиты через промежуточный трансформатор тока, работающий с повышенной индукцией в магнитопроводе. Аperiodическая составляющая броска тока вызывает глубокое насыщение стали, ток во вторичную обмотку практически не трансформируется и реле во вторичной цепи насыщенного трансформатора тока не срабатывает. Такой трансформатор называют быстронасыщающимся (БНТ) или насыщающимся (НТТ).

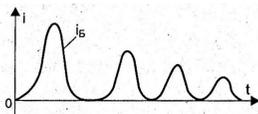


Рис. 6.21. Форма броска кривой тока намагничивания  $i_b$  одной из фаз при включении трансформатора под напряжение .

Если происходит КЗ в зоне действия защиты, то синусоидальный ток трансформируется и обеспечивает срабатывание исполнительного органа защиты. Хотя ток КЗ может иметь аperiodическую составляющую, насыщающую НТТ, но она быстро затухает, после чего реле срабатывает. Полное время срабатывания защиты с НТТ не превышает 0,12 с.

Вторая особенность БНТ используется, например, в работе времяимпульсного реле (защита ДЗТ – 20), бесконтактной приставке УБ, представляющей собой детектор искажённой формы тока, и др.

Третья особенность использована, в частности, в реле типа РСТ – 15 производства Чебоксарского завода.

Для устранения фазового сдвига между вторичными токами защиты принято вторичные обмотки ТА на стороне ВН соединять по той же схеме, что и обмотка НН, а вторичные обмотки ТА на стороне НН – по схеме соединения обмотки ВН защищаемого трансформатора. В микропроцессорных защитах фазовый сдвиг учитывается при настройке.

Устранение неравенства абсолютных значений вторичных токов достигается в основном одним из двух путей:

- выравнивание вторичных токов с помощью промежуточных трансформаторов тока, включаемых в плечи дифференциальной защиты;
- выравнивание магнитодвижущих сил (МДС) в самом дифференциальном реле.

Широко применяется второй способ, для чего в типовых реле предусматриваются секционированные обмотки. Поскольку, однако, при этом может быть выбрано лишь целое число витков, точного равенства добиваются не всегда.

Для дифференциальных защит допускается полная погрешность трансформаторов тока не более 10% при максимальном значении тока внешнего КЗ. Снижения погрешности ТА можно достигнуть путём уменьшения сопротивления вторичной нагрузки или последовательного включения двух трансформаторов тока, однако полностью устранить эту погрешность невозможно. Ток небаланса должен учитываться при выборе уставок защиты.

Отстройка от тока небаланса осуществляется в основном двумя способами:

- 1) выбор уставки тока срабатывания защиты большим, чем максимальное расчётное значение тока небаланса;
- 2) торможение (загрубление) дифференциальной защиты вторичным током внешнего КЗ.

Применение микроэлектронной элементной базы дало возможность повысить чувствительность и упростить традиционные схемы защиты с дифференциальными реле. В отечественном устройстве ЯРЭ – 2201 для блокировки дифференциальной защиты при БТН используется составляющая промышленной частоты напряжения, пропорционального производной выпрямленного дифференциального тока. Сущность метода заключается в следующем. При БТН форма дифференциального тока резко отличается от синусоидальной (рис.6.22): из-за наличия аperiodической составляющей и (или) чётных гармоник положительный и отрицательный полупериоды оказываются неодинаковыми (рис. 6.22,а), и в выпрямленном токе появляется составляющая промышленной частоты с периодом  $T$  (рис.6.22,б). Это и позволяет отличить режим БТН от КЗ: в режиме КЗ основная гармоника выпрямленного синусоидального тока имеет двойную частоту с периодом  $T/2$ , а составляющая промышленной частоты отсутствует. Производная выпрямленного тока используется потому, что дифференцирование позволяет ослабить аperiodическую составляющую и подчеркнуть основную.

За рубежом наибольшее распространение получили защиты с торможением или блокировкой от чётных гармоник дифференциального тока.

Наилучшие результаты достигаются применением цифровой микропроцессорной техники.

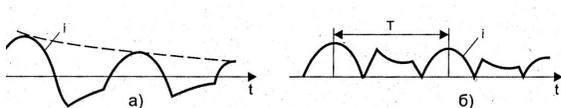


Рис.6.22. Формы кривой дифференциального тока: а) дифференциальный ток  $i$ , содержащий аperiodическую составляющую (пунктир) и чётные гармоники; б) тот же ток  $i$  после выпрямления;  $T$ - период основной гармоники тока  $i$

### 6.4.1.5. Газовая защита.

Устанавливается на трансформаторах (автотрансформаторах, масляных реакторах) с масляным охлаждением, снабжённых расширителями. Действие её основано на том, что всякие, даже незначительные повреждения, а также повышенный нагрев внутри бака трансформатора вызывают разложение масла и органической изоляции и, как следствие, выделение летучих газов почти в самом начале возникновения повреждения. Будучи легче масла, газы поднимаются в расширитель 2 (рис.6.23), который сообщается с атмосферой. При значительных повреждениях бурно расширяющиеся газы приводят в движение масло, которое также перемещается в сторону расширителя. Газовое реле 1 реагирует на эти явления так, что при медленном газообразовании (например, при перегреве, витковом замыкании) подаётся предупредительный сигнал, а при бурном (в случае КЗ) производится отключение трансформатора. Кроме того, газовая защита действует на сигнал и на отключение или только на сигнал при опасном понижении уровня масла в баке.

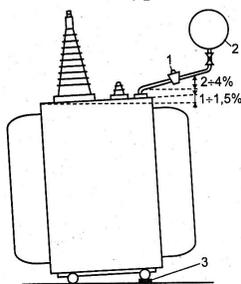


Рис. 6.23. Установка газового реле на трансформаторе.

1 – газовое реле; 2 – расширитель;  
3 – подкладка для создания уклона

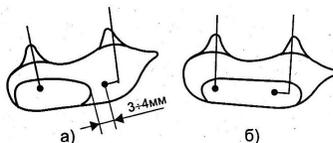


Рис.6.24. Ртутный контакт:

а) разомкнут; б) замкнут

С этой целью в корпусе реле обычно устанавливаются два элемента – отключающий и сигнальный, у каждого из которых имеется свой ртутный контакт («свинка», рис.6.24). Сигнальный элемент располагается в верхней части корпуса реле и его контакт разомкнут, если реле заполнено маслом. При выделении воздуха или при слабом газообразовании газы, поднимающиеся к расширителю, вытесняют масло из верхней части реле, уровень масла понижается и сигнальный контакт замыкается. Отключающий элемент располагается в нижней части реле, против входного отверстия маслопровода, и реагирует на скорость движения масла в последнем. При медленном газообразовании отключающий элемент не действует, так как газ заполняет только верхнюю часть реле, после чего начинает проходить в расширитель.

По конструкции различают реле поплавковые, лопастные и чашечные. У поплавковых реле внутри кожуха укреплены два поплавка в виде полых металлических цилиндров. На торце каждого поплавка расположен ртутный контакт, представляющий собой стеклянную колбочку с впаянными в неё контактами и небольшим количеством ртути внутри, которая при определённом положении колбочки переключает кон-

такты. Один поплавок находится в верхней части кожуха реле, другой – на уровне соединительной трубы к расширителю. Контакты верхнего поплавка действуют на сигнал, нижнего – на отключение трансформатора.

Отечественная промышленность выпускала поплавковые реле типов ПГ – 22, РГ – 2А, РГЗ – 22, ПГЗ – 61 и др. Чувствительность некоторых из них можно регулировать специальными грузиками. Сигнальный поплавок настраивается на срабатывание при заданном объёме газа, скопившегося в верхней части реле, обычно 300...500 мл. Отключающий поплавок должен срабатывать при скорости потока масла не менее 0,5...0,6 м/с.

Сигнальный элемент лопастного реле выполнен в виде поплавка, нижний отключающий – в виде поворотной лопасти (пластины) или поплавка и лопасти. Под воздействием потока жидкости или газов лопасть поворачивается, вызывая срабатывание связанных с ней контактов. Изменяя начальный угол наклона реле, можно регулировать чувствительность реле.

Сигнальный и отключающий элементы чашечных реле представляют собой открытые плоскостонные алюминиевые чашки, которые закреплены на оси и могут поворачиваться вокруг неё. С корпусом каждой чашки связан подвижный контакт, замыкающийся с неподвижным при опускании чашки. При понижении уровня масла срабатывает верхний, сигнальный элемент, при более глубоком понижении (например, в случае утечки масла из бака) – также и нижний, отключающий элемент. При бурном газообразовании отключающий элемент срабатывает с помощью закреплённой на нём лопасти.

Чашечные реле лишены существенного недостатка поплавковой конструкции, которой свойственна возможность ложного действия при нарушении герметичности поплавков, и меньше реагируют на вибрацию, чем реле с ртутными контактами. Они имеют удобную регулировку чувствительности и высокое быстродействие: так, чувствительность нижнего элемента реле типа РГЧЗ – 66 регулируется в пределах от 0,6 до 1,2 м/с, время действия при работе лопасти от 0,5 до 0,05 с в зависимости от скорости движения масла.

Надёжной работе газовой защиты способствует правильное выполнение монтажа трансформатора и газового реле. Крышка трансформатора должна иметь подъём в сторону расширителя на 1...1,5%, а маслопровод – на 2...4% (см. рис. 6.23). Крышка газового реле должна быть строго горизонтальна. При пуске и останове масляных насосов и вентиляторов не должны возникать толчки и вибрации, вызывающие срабатывание газового реле. Трансформаторы рекомендуется оборудовать стационарными лестницами и площадками, установленными с одной стороны от токоведущих частей на безопасном расстоянии от них.

Провода и контрольные кабели, присоединяемые к газовому реле, должны иметь маслостойкую изоляцию или защиту от попадания масла из трансформатора, так как оно разъедает резиновую оболочку жил кабеля. Воронки устанавливаются несколько выше газового реле. Жилы, выведенные из воронки, должны подсоединяться к нему с изгибом вниз (для стока воды или масла). Для защиты от механических повреждений кабели рекомендуется прокладывать в трубах, которые позволяют осуществить также и защиту от влаги, или закрывать угловым железом. В газовом реле с ртутными контактами обычно применяются колбочки с контактами, впаянными сверху. При этом постоянный оперативный ток должен подводиться «плюсом» к контакту, по-

гружёному в ртуть. В конструкциях, где контакты впаяны в торец колбочки, полярность подводимого к ним тока может быть произвольной.

При включении нового или отремонтированного трансформатора возникает опасность скопления в газовом реле воздуха, выделившегося из свежего трансформаторного масла. Во избежание ложного срабатывания газовой защиты некоторое время после первого включения трансформатора (до 3 суток) следует обеспечить контроль за объёмом скопившегося воздуха и своевременный выпуск его из газового реле.

#### 6.4.1.6. Особенности защиты трансформаторов без выключателей на стороне высшего напряжения.

Одно – и двухтрансформаторные подстанции часто подключаются к сети без выключателей – с помощью ответвлений от линий или по блочной схеме (рис.6.25).

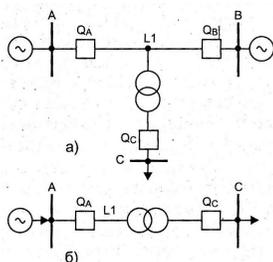


Рис.6.25. Схемы подключения трансформаторов без выключателей на стороне высшего напряжения: а) от одной линии; б) по блочной схеме; А, В, С – шины подстанций; Q<sub>A</sub>, Q<sub>B</sub>, Q<sub>C</sub> – выключатели на концах питающей линии L1

В обоих случаях автоматическое отключение трансформатора при его повреждении должно осуществляться выключателями на питающих концах линий. Эта операция выполняется с помощью специального канала связи или посредством короткозамыкателя, который при срабатывании защиты трансформатора устраивает искусственное КЗ. В схеме с ответвлением дополнительно применяется АПВ и отделитель.

Отсутствие выключателей на стороне ВН вынуждает использовать особые конструкции трансформаторов тока, не связанные непосредственно с выключателями: встроенные ТА устанавливаются внутри кожуха на вводах трансформаторов 110 кВ и выше, у накладных трансформаторов тока сердечник надевается на выводы силового трансформатора (35 кВ и выше) снаружи.

На подстанциях без выключателей на стороне ВН обычно применяется переменный оперативный ток, так как отсутствуют электромагниты выключателей, потребляющие большую мощность.

Защита должна действовать на короткозамыкатель и отделитель так, чтобы обеспечить срабатывание отделителя в бестоковую паузу АПВ линии. Команда на его срабатывание должна поэтому подаваться после срабатывания короткозамыкателя, когда питающая линия отключилась и ток КЗ прекратится.

В схеме рис.6.26 импульс на отключение отделителя подаётся реле времени КТ после срабатывания короткозамыкателя QN и отключения питающей линии (тока в обмотке

реле КА нет). Выдержка времени реле КТ должна превосходить возможную разновре-  
 менность замыкания ножа и блок – контактов короткозамыкателя (0,2...0,3 с). Источни-  
 ком питания оперативных цепей короткозамыкателя и отделителя во время бестоковой  
 паузы на однострансформаторной подстанции служат аккумуляторы или предвари-  
 тельно заряженные конденсаторы. Время АПВ должно быть больше времени включения  
 короткозамыкателя и отключения отделителя, чтобы за время бестоковой паузы повре-  
 ждённый трансформатор успел отключиться. Иногда применяется и другая, несколько  
 менее надёжная схема, где отключение отделителя производится с помощью встро-  
 енного токового реле. Реле включается после появления тока КЗ, а при его исчезновении  
 отключается, воздействуя на отключение отделителя.

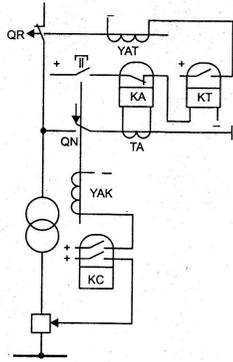


Рис.6.26. Схема отключения отделителя

## 6.4.2. Защита электродвигателей.

### 6.4.2.1. Асинхронные двигатели.

Наибольшую часть всех работающих электродвигателей представляют трёхфазные асинхронные двигатели, преимущественно – с короткозамкнутым ротором. Самым частым и опасным видом повреждений являются междуфазные короткие замыкания в обмотках статора, приводящие к значительным разрушениям обмоток и стали машины. Менее опасным, но также распространённым повреждением является однофазное замыкание обмотки статора на землю (на корпус). Защита от замыкания на землю устанавливается в тех случаях, когда ток замыкания достигает 5 А (для двига-  
 телей мощностью более 2000 кВт) или 10 А (менее 2000 кВт).

Наиболее частым ненормальным режимом является перегрузка током. Ориентиро-  
 вочно допустимое время перегрузки можно оценить по следующему выражению:

$$t = \frac{A}{k^2 - 1},$$

где  $t$  – время, с;  $k$  – кратность тока электродвигателя по отношению к номиналь-  
 ному;  $A$  – коэффициент, зависящий от типа и исполнения машины: можно прини-  
 мать его равным 150 для открытых и 250 для закрытых крупногабаритных двигате-

лей. Защита от перегрузки может действовать на сигнал, разгрузку приводимого механизма или на отключение электродвигателя, в зависимости от условий работы и обслуживания машины.

Сверхтоки возникают также при пуске и самозапуске асинхронных двигателей, когда ток может превышать номинальный в 5...7 раз. Остановленный двигатель подобен трансформатору с большим воздушным зазором. Ток статора при номинальном напряжении велик, и только с появлением значительной противо ЭДС вращения (при частоте вращения 75...90% номинальной) уменьшается от максимального до значения, соответствующего нагрузке (рис.6.27). Кроме того, аналогично трансформатору, при включении двигателя под напряжение возникает бросок тока намагничивания ( $I_{п.б}$ ), существенно превышающий максимальное значение установившегося пускового тока ( $I_{п.м}$ ). Максимальная токовая защита не должна срабатывать при пуске двигателя, в частности, уставка отсечки не должна превышать возможный бросок тока намагничивания.

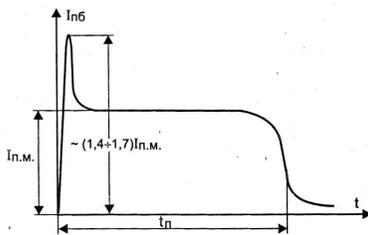


Рис.6.27. Зависимость пускового тока асинхронного электродвигателя от времени.

*Самозапуск* – это самостоятельное, без команды, восстановление нормальной работы двигателя после остановки его из – за кратковременного отключения или глубокого снижения напряжения. Наиболее часто такие провалы напряжения происходят при КЗ или автоматическом переключении питания асинхронного двигателя посредством АВР. Защита электродвигателей должна обеспечить возможность их самозапуска, т.е. не отключать их при кратковременном понижении напряжения и при его восстановлении, сопровождаемом возникновением сверхтоков.

Перегрузка возможна и при обрыве одной из фаз обмотки статора двигателя. В этом случае его нельзя запустить с места, но вращающийся двигатель может продолжать работать. Частота вращения при этом несколько понижается, а ток в обмотках неповрежденных фаз возрастает в 1,5...2 раза. Защита от *обрыва фазы* устанавливается лишь в случае, если неполнофазный режим работы может привести к повреждению двигателя.

Защита от *понижения напряжения* выполняется с помощью реле минимального напряжения и служит для облегчения условий восстановления напряжения после отключения КЗ и обеспечения самозапуска электродвигателей ответственных механизмов. Защита должна отключать неответственные двигатели как при полном исчезновении напряжения, так и при длительном КЗ в сети, вызывающем значительное падение напряжения. При исчезновении напряжения отключение может быть бес-

печено посредством одного реле минимального напряжения, включённого на линейное напряжение. Такая защита надёжно реагирует на понижение напряжения лишь в случае трёхфазного КЗ, а также двухфазного КЗ между теми фазами, например А и В, на линейное напряжение  $U_{AB}$  которых оно включено и которое резко падает при этом. Напряжения же  $U_{AC}$  и  $U_{BC}$  уменьшаются только до значения 1,5 фазного, т.е. на 15%, что для срабатывания минимальных реле недостаточно. В необходимых случаях устанавливают три реле минимального напряжения.

Недостатком защиты является возможность ложного действия её при обрыве цепей напряжения. Поэтому для защиты ответственных двигателей применяются схемы с двумя комплектами реле, включёнными на разные трансформаторы напряжения.

#### **6.4.2.2. Свои отличия имеет защита блоков трансформатор – двигатель:**

- повышенная чувствительность защиты от многофазных КЗ, поскольку ток КЗ уменьшается из – за внесения сопротивления трансформатора;
- требуется отстройка защит блока от бросков тока намагничивания трансформатора при включении;
- отсутствие необходимости в защите от замыкания на землю и некоторые др.

**6.4.2.3. Наиболее важными особенностями синхронных двигателей с точки зрения их защиты являются следующие:**

1. При асинхронном пуске двигатель потребляет из сети повышенный ток и защиты его, так же как и у асинхронного двигателя, должны быть отстроены от токов пуска и самозапуска.

2. Момент синхронного двигателя зависит от напряжения сети, ЭДС двигателя и угла сдвига между ними, значение которого определяется нагрузкой. Если в случае понижения напряжения сети, перегрузки или снижения возбуждения момент двигателя станет меньше момента сопротивления приводимого механизма, устойчивая работа синхронного двигателя нарушается, возникают качания и двигатель выходит («выпадает») из синхронизма. Токи, появляющиеся в статоре, роторе и пусковой обмотке двигателя, работающего в асинхронном режиме, вызывают повышенный нагрев машины. Защита от асинхронного хода осуществляет ресинхронизацию двигателя или отключает его.

*Ресинхронизация* заключается в том, что возбуждение двигателя отключается и через некоторое время включается снова. Тогда как в синхронном режиме момент двигателя пропорционален приложенному напряжению, в асинхронном режиме он пропорционален квадрату напряжения, благодаря чему двигатель может снова втянуться в синхронизм.

3. После отключения КЗ или срабатывания АВР многие синхронные двигатели могут самозапускаться, т.е. вновь втягиваться в синхронизм под влиянием возросшего асинхронного момента. Возможность самозапуска зависит от параметров электродвигателя, его нагрузки и уровня напряжения.

Защита от междуфазных повреждений выполняется так же, как и для асинхронных двигателей, с тем отличием, что вместе с выключателем отключается АПП (автомат гашения поля).

Защита от замыканий на землю обмотки статора применяется при токах замыкания больше 10 А с действием на отключение, как и у асинхронных двигателей.

Защита от перегрузки осуществляется токовым реле в одной фазе, с выдержкой времени, превышающей время затухания пусковых токов. Может применяться защита с тепловыми реле, действующими на отключение. Желательно, чтобы времятоковая характеристика защиты была близка к тепловой характеристике двигателя, приведённой в документах или рассчитанной по допустимому времени перегрузки.

Защита от асинхронного режима реагирует на колебания тока в статоре или роторе двигателя (качания), возникающие в этом режиме (рис.6.28).

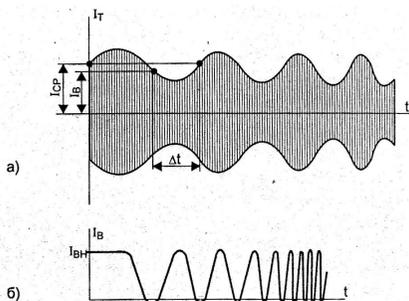


Рис.6.28. Ток качаний синхронного электродвигателя при выходе из синхронизма: а) в обмотке статора; б) в обмотке ротора;  $I_{ст}$ ,  $I_{cp}$ ,  $I_B$  – соответственно ток статора и токи срабатывания и возврата защиты;  $t$  – время спада тока между циклами качаний

Наиболее просто защита выполняется при помощи токового реле с зависимой характеристикой, которое включается на ток статора и может одновременно использоваться для защиты от перегрузки двигателя. Действие этой защиты основано на том, что индукционное реле имеет сравнительно большое время возврата (до 0,5 с), из-за чего не успевает возвращаться после каждого толчка тока за время  $t$  и только через несколько периодов качаний срабатывает на отключение. Достаточно малое время  $t$  обеспечивается в том случае, если максимальное значение тока качаний не менее чем в 2...3 раза превышает ток срабатывания реле, т. е. в 2,5...4,5 раза – номинальный ток двигателя. В свою очередь, ток качаний зависит от возбуждения и от значения ОКЗ – *отношения короткого замыкания*, которое обратно пропорционально реактивному сопротивлению машины и находится в пределах 0,6...1,5. Поэтому применение защиты от асинхронного режима с индукционным реле (РТ-80) допускается только для электродвигателей, имеющих  $ОКЗ \leq 1$ .

Более чувствительна к асинхронному режиму токовая защита с независимой характеристикой, содержащая токовое реле мгновенного действия и выходное реле времени для отстройки от времени пуска. Здесь реле тока срабатывает с частотой тока качаний асинхронного режима, а для предотвращения сброса реле времени служит промежуточный релейный элемент с задержкой отпущения  $t_{отп}$ . Расчёт показывает, что защита надёжно подействует при скольжении, %:  $s = 2/t_{отп}$ , т.е. при  $t_{отп} = 0,5$  с, например,  $s = 4\%$ . Для срабатывания достаточно, чтобы максимальный ток качаний превышал уставку токового реле защиты в 1,3...1,5 раза, так что её можно применять

для электродвигателей с любым значением ОКЗ. Желательно, чтобы защита срабатывала при возможно меньшем скольжении.

Основными недостатками защит, реагирующих на ток статора, являются: недостаточное быстродействие, возможность срабатывания при допустимых перегрузках по току, недостаточная чувствительность. Более совершенной является защита, реагирующая на появление переменного тока в цепи ротора. Схема её отличается от предыдущей тем, что токовое реле питается от трансформатора тока, введённого в цепь возбуждения. Вместо трансформатора тока может применяться дроссель. В нормальном режиме в этой цепи протекает только постоянный ток, и так как он не трансформируется и не создаёт падения напряжения на индуктивности дросселя, защита не действует. При качаниях в обмотке ротора индуцируется переменный ток (см. рис.6.28,б) и появляется ток во вторичной цепи ТА или значительное падение напряжения на дросселе, чем обеспечивается работа защиты.

Возможно также осуществить защиту от асинхронного хода, реагирующую на изменение фазы тока статора относительно напряжения на его зажимах, например, с помощью реле направления мощности. При проворотах ротора относительно вращающегося магнитного поля реле будет срабатывать с частотой биений тока статора, а действие защиты должно наступить после отсчёта заданного числа срабатываний. Последняя функция легко реализуется стандартными счётными устройствами цифровой электроники.

Защита от понижения напряжения является вспомогательной и выполняется так же, как и у асинхронных двигателей.

Для защиты от обрыва цепи возбуждения двигателя служит реле обрыва поля (РОП), действующее на отключение при исчезновении тока возбуждения у работающей машины.

Для контроля состояния изоляции цепей возбуждения устанавливается вольтметр с переключателем, позволяющий измерять напряжение полюсов относительно земли.

### **6.4.3. Защита воздушных и кабельных линий электропередачи и шин.**

#### ***6.4.3.1. Защита воздушных и кабельных линий.***

Линии электропередачи (ЛЭП) подвержены повреждениям в большей степени, чем другое электрооборудование. Воздушные ЛЭП повреждаются от ударов молний, от гололёда, сильного ветра, загрязнения изоляторов и пр. Кабельные линии часто повреждаются землеройными машинами, а также из-за коррозии оболочек кабеля, осадки почвы и др. Повреждения ЛЭП, находящихся под напряжением, опасны возможностью электропоражения людей и короткого замыкания фаз между собой и на землю.

В электрических сетях, работающих с заземлёнными нулевыми точками трансформаторов, защита должна действовать как при междуфазных, так и при однофазных КЗ, а в сетях с изолированными нейтральными – только при междуфазных КЗ. Защита от замыканий на землю в сетях с изолированными нейтральными устанавливается с действием на сигнал.

Для защиты линий с односторонним питанием применяются: максимальная токовая защита, токовая отсечка, поперечная дифференциальная защита и направленная токовая поперечная дифференциальная защита параллельных линий. Кроме того, для защиты линий с двусторонним питанием применяются также: максимальная направ-

ленная защита, направленная отсечка, продольная дифференциальная защита, дистанционная защита, высокочастотная защита.

Максимальная токовая защита используется преимущественно для радиальных линий с односторонним питанием. В кольцевой сети, в сети с двусторонним питанием и особенно в сложных сетях с несколькими источниками питания эта защита не может обеспечить селективность; в таких сетях применяется максимальная направленная защита.

Одна из особенностей продольной дифференциальной защиты линии состоит в том, что для отключения её с обеих сторон необходимо устанавливать два дифференциальных реле – на подстанциях А и Б, каждое из которых должно действовать на отключение линии со стороны «своей» подстанции выключателем  $Q_A$  или  $Q_B$  соответственно (рис.6.10, 6.11). Однако при этом снижается чувствительность защиты, так как в каждом реле будет проходить только часть полного тока КЗ. Другой особенностью является повышенная нагрузка трансформаторов тока сопротивлением соединительных проводов при большой длине линий. Эти особенности, а также необходимость отстройки от токов небаланса вынуждают существенно усложнять практическое исполнение схем защиты.

Токковая поперечная дифференциальная защита предназначена для защиты параллельных линий, подсоединённых к шинам подстанции через общий выключатель и имеющих одинаковые сопротивления. На линиях с односторонним питанием защита устанавливается только со стороны источника питания, на линиях с двусторонним питанием – с обеих сторон линий. Недостатком защиты является необходимость установки дополнительной защиты от повреждений в «мёртвой зоне», а также на шинах противоположной подстанции. Кроме того, она не может определять, на какой из параллельных линий произошло повреждение. Поэтому для параллельных линий, присоединяемых к шинам через отдельные выключатели, применяется направленная поперечная дифференциальная защита.

В сетях сложной конфигурации с несколькими источниками питания максимальные и направленные защиты не могут обеспечить селективного отключения КЗ. Наряду с необходимыми быстродействием и чувствительностью, достичь этой цели в сетях любой конфигурации позволяет дистанционная защита. В распределительных сетях напряжением выше 6 кВ дистанционные защиты линий от междуфазных КЗ используются в тех случаях, когда конфигурация сети и требования быстродействия и чувствительности не позволяют применять максимальные защиты. На линиях напряжением 35 кВ и выше дистанционные защиты выполняются трёхступенчатыми, причём в первой зоне отключение осуществляется без выдержки времени. Преимущественное распространение дистанционные защиты получили в сетях 35 кВ и выше для отключения междуфазных КЗ, в том числе и при двойных замыканиях на землю в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью. В сетях с глухозаземлённой нейтралью дистанционные защиты дополняются ступенчатой токовой защитой нулевой последовательности.

Наиболее распространённым видом повреждения линий являются однофазные замыкания на землю. В сетях с изолированными или заземлёнными через компенсирующие катушки нейтралью (сети 35 кВ и ниже) ток замыкания на землю невелик и непосредственной опасности не создаёт. Однако повышение напряжения «здоровых» фаз относительно земли в 1,73 раза и длительное протекание даже сравнительно не-

большого тока замыкания может привести к пробое изоляции и двухфазному КЗ. Поэтому быстрого отключения не требуется (за исключением линий, питающих передвижные механизмы карьеров, торфопредприятий и т.п.), но повреждённый участок должен быть выявлен и через определённое время (до 2 ч) отключён. Отыскание места замыкания на землю производится с помощью устройств сигнализации, наиболее простым из которых является включение трёх вольтметров на фазные напряжения.

В сетях с глухозаземлёнными нейтралью составляющие нулевой последовательности тока КЗ замыкаются через все заземлённые точки и проходят поэтому не только по повреждённой, но и по неповреждённым линиям, что осложняет организацию защиты. Максимальная токовая защита от однофазных КЗ в большинстве случаев состоит из двух или трёх ступеней. Первой ступенью является обычно мгновенная отсечка, защищающая часть линии. Второй ступенью является максимальная токовая защита с ограниченной зоной действия, третьей – максимальная токовая защита с током срабатывания, отстроенным от тока небаланса, и выдержкой времени, выбранной по условиям селективности.

В большинстве случаев селективность обеспечивается применением направленной защиты нулевой последовательности, действующей только при КЗ на защищаемой линии и на линиях, отходящих от шин противоположной подстанции. Она выполняется обычно с несколькими ступенями выдержек времени и токов срабатывания и с общим органом направления мощности. Первой ступенью служит обычно направленная отсечка мгновенного действия, которая, в отличие от токовой отсечки, отстраивается только от тока нулевой последовательности, направленного от шин подстанции. Второй ступенью является направленная защита ограниченной чувствительности, третьей – чувствительная направленная защита, отстроенная от тока небаланса трансформаторов тока.

#### **6.4.3.2. Защита шин.**

*Назначение и особенности защиты шин. Дифференциальная защита.*

На шинах могут возникать такие же замыкания, как и на линиях. Причинами их могут быть: перекрытие шинных изоляторов и вводов выключателей; повреждение трансформаторов напряжения и трансформаторов тока; поломка изоляторов разъединителей и выключателей, ошибки обслуживающего персонала и др. В общем случае КЗ на шинах могут быть отключены защитами на питающих их генераторах, трансформаторах и линиях, а также резервными защитами линий на соседних подстанциях. Однако эти защиты действуют с выдержкой времени, иногда значительной, а в ряде случаев неселективно. Для ускорения отключения повреждений и обеспечения селективности применяется специальная защита шин.

*Дифференциальная защита* выполняется по тому же принципу, что и дифзащита трансформаторов и линий, т.е. производится сравнение значений и фаз токов, входящих к защищаемому элементу и уходящих от него. Первичные обмотки трансформаторов тока всех присоединений подключаются к шинам одноимёнными зажимами, а вторичные обмотки соединяются одноимёнными выводами параллельно и к ним подключается дифференциальное реле (рис.6.29).

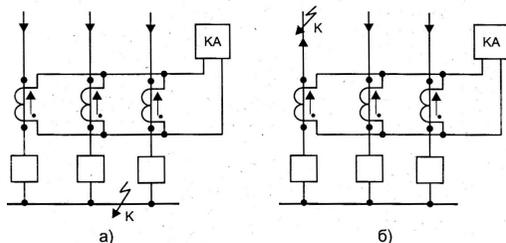


Рис. 6.29. Распределение токов во вторичных цепях дифференциальной защиты шин: а) при КЗ на шинах; б) при внешнем КЗ

При КЗ на шинах (рис.29,а), в зоне действия защиты по всем присоединениям ток направляется к месту повреждения (точка К), т.е. к шинам подстанции. В обмотке реле проходит сумма вторичных токов, и оно срабатывает. При внешнем КЗ, вне зоны (рис.29,б) ток, идущий от шин к месту повреждения (точка К), равен сумме токов, притекающих к шинам от источников питания. Сумма токов равна нулю, и реле не действует.

Однако фактически при внешнем КЗ в реле проходит ток небаланса, обусловленный главным образом различием нагрузки на трансформаторы тока повреждённого и неповреждённых присоединений. Действительно, через каждый из трансформаторов тока неповреждённых присоединений проходит только часть тока КЗ, на повреждённом же присоединении трансформаторы тока обтекаются полным током КЗ. Разные условия намагничивания и приводят к появлению тока небаланса даже при идеальном совпадении характеристик трансформаторов тока.

Ток небаланса может вызвать ложное срабатывание защиты, поэтому принимаются меры к его ограничению путём уменьшения разности между намагничивающим током трансформаторов тока на присоединении с наибольшим током КЗ и суммой намагничивающих токов ТА на остальных присоединениях. Эта цель достигается при работе всех ТА в ненасыщенной (близкой к линейной) части характеристики намагничивания, для чего необходимо:

а) применять трансформаторы тока, у которых насыщение происходит при возможно большем токе (класс Д);

б) уменьшать кратность тока КЗ относительно номинального тока ТА, выбирая последние с возможно большим коэффициентом трансформации;

– за счёт увеличения сечения и сокращения длины соединительных проводов, второе – применением ТА с номинальным вторичным током 1 А.

Общая погрешность не должна превосходить 10%.

Лучшую отстройку от токов небаланса обеспечивают дифференциальные защиты с торможением и дифференциально – фазная защита, применяемые для шин 110 кВ и выше.

Для отстройки от повышенных токов небаланса в неустановившемся режиме применяют быстронасыщающиеся трансформаторы тока.

В случае неисправности вторичной цепи ТА какого-нибудь присоединения баланс токов в дифференциальном реле может нарушиться и вызвать ложное срабатывание защиты. Поэтому дифференциальное реле отстраивается от тока нагрузки наиболее загруженного присоединения. Кроме того, в нулевом проводе устанавливается чувствительное токовое реле и миллиамперметр. При обрыве или шунтировании фазы вторичной цепи это реле выводит из действия защиту, а миллиамперметр позволяет обнаружить не только обрыв, но и ухудшение контакта в цепи или витковое замыкание в ТА.

*Схемы дифференциальной защиты шин.*

а) Схема для подстанций с одной рабочей и одной резервной системами шин. Наиболее просто схема дифференциальной защиты шин выполняется в том случае, когда подстанции нормально работают на одной системе шин, в то время как вторая находится в «холодном» резерве, без напряжения. При переводе присоединений с рабочей системы шин на резервную обе системы шин жёстко связываются шиносоединительным выключателем и входят в зону действия защиты. Трансформаторы тока шиносоединительного выключателя к защите не подсоединяются, так как в нормальном режиме он отключён. При подаче напряжения на резервную систему шин для опробования она попадает в зону действия защиты. Предусматривается блокировка, которая в это время запрещает действие защит всех присоединений, кроме шиносоединительного выключателя, с тем, чтобы при КЗ на шинах защита не отключила всю подстанцию. Когда шиносоединительный выключатель используется вместо ремонтируемого выключателя одного из присоединений, токовые цепи его подключаются к цепям дифференциальной защиты шин (с помощью испытательного блока). Блокировка выполняется посредством промежуточного реле с замедлением на возврат порядка 1...2 с.

б) Схема для подстанций с двумя рабочими системами шин. На таких подстанциях в работе нормально находятся две системы шин, связанные секционными или шиносоединительными выключателями, для каждой из которых предусматривается отдельная дифференциальная защита. При КЗ на одной системе шин сработает только её защита и отключит все выключатели, подключённые к данной системе шин.

Существенные особенности имеет дифференциальная защита при неизменном (фиксированном) подключении каждого присоединения к определённой системе шин. В этом случае схема с двумя самостоятельными защитами не обеспечит селективности в случае внешних КЗ а) при включении всех присоединений на одну из систем шин и б) при вынужденном нарушении фиксации присоединений. С учётом этих режимов применяется схема с тремя комплектами защиты: два индивидуальных комплекта для каждой системы шин и третий – для защиты обеих систем шин.

в) Схема с двумя выключателями на каждом присоединении. На подстанции с двумя системами шин каждое присоединение подключается к обоим системам шин, каждая из которых оборудуется отдельным комплектом защиты, действующей на отключение своих шин. При КЗ на шинах защита неповреждённой системы шин не действует, и от них будут получать питание все присоединения.

г) Неполная дифференциальная защита шин. На подстанциях с реактированными линиями и несколькими источниками питания 6 – 10 кВ применяется упрощённая дифференциальная защита с помощью токовых реле, включённых на сумму токов всех источников питания. Трансформаторы тока отходящих линий к защите не под-

ключаются, что упрощает схему и является её преимуществом. При внешних КЗ защита не действует и может выполняться без выдержки времени, являясь по существу токовой отсечкой.

#### *Другие виды защит.*

Шины подстанций 6 – 10 кВ с реактированными линиями потребителей могут быть защищены с помощью токовой отсечки, включённой на ток питающего трансформатора. Отсечка выполняется с двумя реле, включёнными в две фазы, или одним реле, включённым на разность токов двух фаз. Ток срабатывания отсечки отстраивается от максимального тока при повреждении за реактором отходящих линий.

Применяется также дистанционная защита, которая устанавливается на трансформаторах, связывающих защищаемые шины с системой. Защита состоит из пусковых реле и реле сопротивления. Уставка срабатывания последних выбирается меньше сопротивления реакторов линии и трансформатора связи с тем, чтобы защита не работала при КЗ за реактором или трансформатором. При металлическом КЗ на защищаемых шинах напряжение и сопротивление на зажимах омметра снижаются до нуля и защита отключает трансформатор, отделяя тем самым повреждённые шины от системы.

### **6.4.4. Электроавтоматика.**

#### **6.4.4.1. Управление коммутационными аппаратами.**

##### *Управление выключателями.*

Дистанционное включение – отключение выключателей осуществляется обычно с помощью ключей управления (типов ПМО, МК и др.). При большом разнообразии конструкции все они имеют оперативные (включить – отключить) и фиксированные положения и выполняются с самовозвратом из оперативного в фиксированное положение. Состояние контактов при различных положениях рукоятки характеризуется диаграммой ключа, приводимой в табличной или схемной форме. В качестве примера на рис. 6.30 приведены фрагменты схем управления выключателями с электромагнитным приводом с помощью ключей управления ПМОВФ (рис.6.30,а) и МКВ (рис.6.30,б).

Электромагнит включения УАС потребляет большую мощность и поэтому получает питание от отдельных шин через замыкающие контакты промежуточного контактора КМ (на рис. 6.30 не показано). Электромагнит отключения УАТ потребляет небольшой ток и питается от шинок управления ШУ непосредственно через контакты ключа SA или реле защиты и управления. Для снижения вероятности ошибочных действий персонала команда на включение подаётся ключом в два приёма: сначала рукоятку его устанавливают в положение «предварительно включено» (В<sub>1</sub>), а затем переводят в положение «включить» (В<sub>2</sub>), из которого она после освобождения переходит в фиксированное положение «включено» (В). Команда на отключение также подаётся в два приёма – «предварительно отключено» (О<sub>1</sub>) и «отключить» (О), после чего освобождённая рукоятка переходит в положение «отключено» (О). Те же команды «включить» и «отключить» могут быть поданы и от реле автоматики КТ и защиты КС. Вспомогательные контакты SQT и SQC связаны с валом выключателя и размыкают цепь управления после выполнения соответствующей операции, обеспечивая тем самым кратковременность протекания тока по обмоткам электромагнитов и бестоковое размыкание контактов ключа и реле (рис.6.30,а).

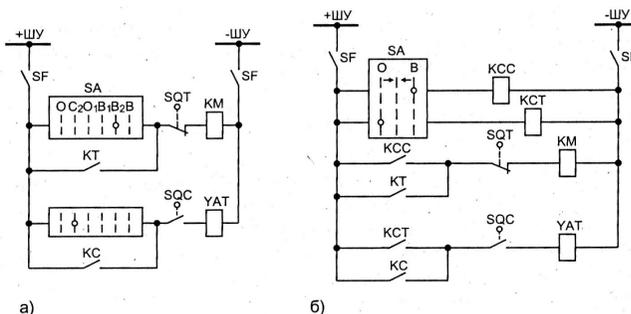


Рис.6.30. Схемы управления выключателем с ключами типов ПМОВФ (а) и МКВ (б):

SA – ключ управления; YAT – электромагнит отключения; KM – промежуточный контактор; KT, KC – контакты выходных реле дистанционного управления и защиты; SQT, SQC – блок – контакты выключателя, замыкающиеся после его включения или отключения соответственно; KCT и KCC – реле команд «отключить» и «включить»

Схема с малогабаритными ключами МКВ (рис.6.30,б) отличается только тем, что в неё дополнительно введены промежуточные реле KCC и KCT, так как контакты ключа не рассчитаны на коммутацию цепей управления непосредственно; предварительных положений ключа не предусмотрено.

Схемы управления воздушными выключателями содержат ещё блокировку, не допускающую исполнения команд на включение и отключение при пониженном давлении воздуха в резервуаре. Давление контролируется электроконтактным манометром и промежуточным реле, размыкающие контакты которого введены в цепь управления выключателем. Для того, чтобы начавшаяся операция не прерывалась из-за некоторого падения давления воздуха в процессе её выполнения, контакты этого реле шунтируются блок – контактами привода.

Если при включении выключателя на КЗ ключ будет задержан оператором или останется в положении «включить» из-за неисправности, то может возникнуть ситуация, когда одновременно будут действовать команды на включение (от ключа) и на отключение (от защиты). Чтобы исключить возможность многократного включения – отключения выключателя, применяется так наз. блокировка от «прыгания» – механическая или электрическая. Электрическая схема блокировки выполняется либо с помощью блок-контактов электромагнита отключения, либо посредством специального двухобмоточного реле, последовательная обмотка которого включается в цепь отключающей катушки, а параллельная – на шины управления через собственный замыкающий контакт. Поэтому реле срабатывает одновременно с отключением выключателя и самоудерживается в этом состоянии, запрещая своим размыкающим контактом повторное включение выключателя.

*Отключение отделителя.*

Отделитель, как и разъединитель, не может самостоятельно отключать ток нагрузки, и тем более ток короткого замыкания. Автоматическое отключение отделителя только при отсутствии тока в линии наиболее просто обеспечивается с помощью специального блокирующего реле, встроенного в привод отделителя (БРО). Реле представляет собой электромеханическое устройство, содержащее электромагнит и пружинный механизм. Обмотка подключается к трансформатору тока в цепи короткозамыкателя; в нормальном режиме сердечник находится в равновесии. При включении короткозамыкателя сердечник подтягивается вверх, сжимая упорную пружину, а после отключения питания линии освобождается, воздействуя через систему пружин и рычагов на механизм отключения отделителя.

Однако схема автоматики с реле БРО имеет существенные недостатки. Так, в случае КЗ на стороне ВН трансформатора одновременно подействуют быстродействующая защита линии и защита трансформатора. Очевидно, что при этом выключатель линии отключится и протекание тока прекратится раньше, чем включится короткозамыкатель. Реле БРО не успеет сработать и в бестоковую паузу отделитель не отключится, АПВ будет неуспешным и выключатель отключится вновь. Этот недостаток может быть преодолён применением двукратного АПВ. После первого цикла АПВ под действием тока через короткозамыкатель сработает реле БРО и заведёт упорную пружину. После отключения линии защитой, во время второй бестоковой паузы отделитель будет отключён.

Вторым недостатком является возможность отказа реле при каскадном отключении линии, если ток в реле окажется меньше уставки. Так может произойти, например, при КЗ на линии с двусторонним питанием, когда после отключения ближайшего к месту аварии источника питания ток КЗ резко снизится. При этом возможен либо отказ отделителя, либо отключение его под током. В этой связи следует проверить расчётное значение тока КЗ при каскадном отключении линии, имея в виду, что для надёжного действия БРО ток через него должен в полтора – два раза превышать ток срабатывания реле.

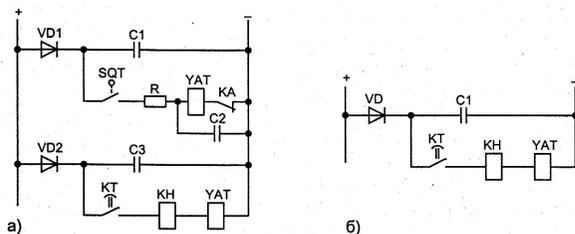


Рис. 6.31. Схема автоматического отключения отделителя: а) с реле времени; б) с часовым механизмом

Автоматическое отключение отделителя на линиях с однократным АПВ может осуществляться по схеме рис. 6.31,а. Здесь в качестве независимого источника оперативного тока используются предварительно заряженные конденсаторы С1 и С3, так как при отключении отделителя может быть отключено и питание оперативных

цепей. Для того чтобы отделитель не отключился раньше выключателей на питающих подстанциях, в схему введены контакты токового реле КА, обмотка которого подключена к трансформатору тока в цепи короткозамыкателя. После прекращения тока КЗ конденсатор С1 разряжается на обмотку реле КТ через замкнувшиеся блок-контакты SQT короткозамыкателя и контакты реле КА. Конденсатор С2 и резистор R обеспечивают увеличение выдержки времени реле КТ до 0,3 – 0,4 с, так чтобы она была заведомо больше времени замыкания силовых контактов короткозамыкателя. Срабатывание электромагнита отключения УАТ при разряде конденсатора С3 индицируется посредством сигнального реле КН. Более простая и надёжная схема рис. 6.31,б работает аналогично, но вместо реле времени содержит встроенный в привод короткозамыкателя часовой механизм, который заводится при включении короткозамыкателя и отключает его по истечении заданной выдержки времени (0,5...1,0 с).

*Дистанционное управление разъединителем* (рис. 6.32).

На рис. 6.32,а показан узел схемы дистанционного управления разъединителем с приводом от электродвигателя трёхфазного переменного тока, который включает или отключает разъединитель в зависимости от направления вращения. Пуск и реверс двигателя осуществляется пускателями КМ1 и КМ2 при нажатии кнопок управления SBC и SBT. По окончании операции цепь пускателя разрывается вспомогательными контактами SQS разъединителя – размыкающими (после включения) или замыкающими (после отключения). Блокировочные контакты KB исключают возможность операций с разъединителем под нагрузкой.

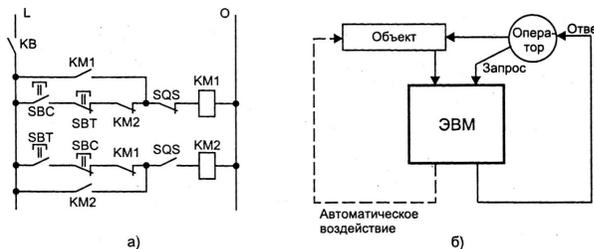


Рис.6.32. Автоматическое управление разъединителем: а) дистанционное управление; б) управление с помощью ЭВМ

На рис. 6.32,б приведена скелетная схема управления переключением разъединителя в системе АСУ. Оператор с помощью клавиатуры запрашивает указания о порядке переключений, а ЭВМ на основе имеющейся информации об оперативной схеме подстанции и о текущем состоянии объекта формирует бланк переключений, соответствующих поставленной задаче. Результатом этой работы может быть распечатка для оператора на первом этапе и автоматизация переключений – на втором.

#### 6.4.4.2. Блокировки.

По назначению различают блокировки безопасности и оперативные блокировки, по выполнению – механические, электромагнитные, электрические. Блокировки

безопасности запрещают несанкционированное проникновение людей в действующие электроустановки и опасное приближение их к частям электрооборудования, находящимся под напряжением. Оперативные блокировки препятствуют неправильным действиям персонала при производстве переключений. Наиболее распространены оперативные блокировки от неправильных действий с разъединителями.

Механическая блокировка осуществляется с помощью стальных штырей или замковых конструкций и применяется в тех случаях, когда приводы отключающих аппаратов расположены рядом. Так, упор запирает привод разъединителя при включении выключателя, а замки взаимно блокируют приводы выключателя и разъединителя. При отключённом выключателе замок запирает привод и освобождает ключ, которым можно воспользоваться для отпирания привода разъединителя.

Механически заблокированы и основные и заземляющие ножи разъединителей, так что основной нож нельзя включить, если замкнут заземляющий, и наоборот, нельзя включить заземляющий нож при замкнутом основном.

Электрическая блокировка предусматривается на приводах аппаратов с дистанционным управлением. Например, размыкающий вспомогательный контакт выключателя в цепи управления разъединителя запрещает операции с последним при включённом выключателе. Эта блокировка не исключает возможность ручного управления приводом разъединителя.

Наиболее часто применяется электромагнитная блокировка. Она выполняется с помощью механических блокировочных замков на приводах аппаратов и деблокирующего переносного ключа со встроенным электромагнитом. В корпусе замка на разъединителе размещены подвижный стальной стержень с пружиной и контактные гнёзда. Оперативное напряжение 110 – 220 В поступает на гнёзда замка разъединителя через замкнутые вспомогательные контакты отключённого выключателя. Когда оператор вставляет ключ в замок, это напряжение подаётся на обмотку электромагнита и сердечник его намагничивается. Стержень замка, притягиваясь к сердечнику, выходит из отверстия в механизме привода разъединителя и даёт возможность отключить или включить его. После завершения операции цепь питания обмотки электромагнита размыкают кнопкой и стержень под действием пружины запирает привод в новом положении выключателя.

В качестве блокирующих устройств камер РУ применяют электромагнитные замки, которые отпираются лишь после снятия напряжения с оборудования. Цепи питания источников повышенного напряжения в испытательных камерах оснащаются вспомогательными контактами, автоматически размыкающимися при открытии дверей.

#### ***6.4.4.3. Сигнализация.***

На подстанции предусматриваются следующие виды сигнализации: положения коммутационных аппаратов; аварийного отключения выключателей; действия РЗиА; предупреждающая о ненормальном режиме работы оборудования.

Световая сигнализация осуществляется лампами, которые горят ровным светом при нормальном положении и оперативных переключениях аппаратов, а при аварийных отключениях, работе автоматики и в положениях «Несоответствие» подключаются к шинке мигающего света. Лампы присоединяются к шинкам сигнализации через ключи управления, контакты реле РЗиА, вспомогательные контакты коммутационных аппаратов.

Сигнализация положения информирует персонал о состоянии главных цепей в нормальных и аварийных режимах. Конкретное выполнение схемы сигнализации зависит от применяемой аппаратуры. При использовании, например, в схеме управления выключателем ключа типа ПМОВФ подготовительные переключения в цепях сигнализации производятся контактами ключа одновременно с подачей команды, а изменение положения выключателя фиксируется его вспомогательными контактами. Если положение рукоятки ключа соответствует состоянию этих контактов (и, следовательно, положению выключателя), горит ровным светом красная лампа в положении выключателя «включено», зелёная – в положении «отключено». При автоматическом включении или отключении выключателей эти лампы горят мигающим светом.

В случае несоответствия положений ключа и выключателя мигает зелёная лампа, когда ключ находится в положениях «включено», «предварительно включено», а выключатель отключён, или красная лампа, когда ключ установлен в положении «отключено», «предварительно отключено», а выключатель включён. Таким образом, горящая лампа всегда указывает фактическое положение выключателя. При использовании ключей типа ПМОВ, МКВ и т.п., которые имеют только одно фиксированное положение – нейтральное, для сигнализации применяют двухпозиционное реле фиксации команды.

Для получения мигающего света используются схемы с электромеханическими реле (так наз. пульс-пары) и бесконтактные (рис. 6.33), которые базируются на тиристорах или логических элементах.

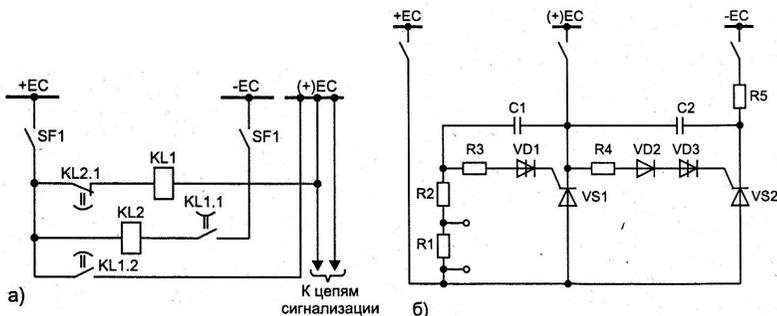


Рис. 6.33. Схемы устройств мигающего света: а) релейная; б) на тиристорах

Когда возникает несоответствие положения выключателя, замыкается цепь сигнальной лампы (на схеме рис.6.33 цепи ламп не показаны), и через эту цепь «минус» шинки управления подаётся на шинку мигания (+) EP. Релейная схема пульс – пары (рис. 6.33,а) строится на двух реле с выдержкой времени на размыкание (KL1) и на замыкание (KL2) контактов. При подаче напряжения реле KL1 срабатывает, но лампа, включённая с ним последовательно, практически не горит. Без выдержки времени замыкаются контакты KL1.1 и KL1.2, подавая напряжение на реле KL2 и «плюс» с шинки сигнализации на шинку мигания. Сигнальная лампа загорается с полным на-

калом, а реле KL2 также без выдержки времени размыкает свой контакт KL2.1 в цепи реле KL1. Выдержка времени на возврат этого реле определяет время горения лампы, а реле KL2 – длительность паузы. Далее циклы повторяются до тех пор, пока ключ или реле фиксации положения выключателя не будут приведены в положение «отключено» (*квитирование* сигнала), соответствующее положению выключателя.

В некоторых схемах оба реле выполнены с замедлением и на срабатывание, и на возврат. Основное отличие этих схем от описанной выше заключается в том, что здесь контакты реле KL2 не разрывают цепь питания катушки KL1, а шунтируют её, благодаря чему сигнальная лампа включается на полное напряжение.

Бесконтактная схема с тиристорами показана на рис. 6.33,б. При возникновении несоответствия ток в цепи сигнальной лампы ограничивается сопротивлением резисторов R1 и R2 на уровне, недостаточном для её свечения, и по мере заряда конденсатора C1 уменьшается. Когда напряжение на конденсаторе превысит значение напряжения пробоя динистора VD1, на управляющий электрод тиристора VS1 поступит положительное (относительно катода) напряжение, вследствие чего тиристор открывается и загорается сигнальная лампа. Конденсатор C2 оказывается под напряжением шин EC и начинает заряжаться через резистор R5. В конце заряда отпираются динистор VD3 и тиристор VS2, после чего разрядом конденсатора C2 запирается тиристор VS1 и лампа гаснет. Снова заряжается конденсатор C1 и цикл повторяется. Частоту переключений можно изменить шунтированием резистора R1.

Одновременно с индивидуальной световой сигнализацией запускается и общая для всех выключателей звуковая сигнализация, для которой используются электрические сирены, гудки и звонки. На рис. 6.34 приведена схема аварийной сигнализации с повторностью действия и сохранением принятых и действующих сигналов, построенная на базе реле импульсной сигнализации типа РИС-Э2М.

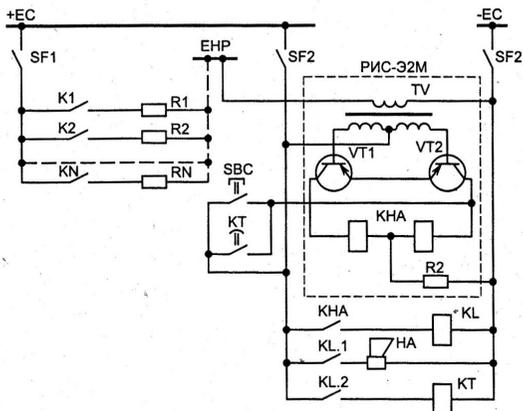


Рис. 6.34. Принципиальная схема звуковой аварийной сигнализации с реле РИС-Э2М

Это реле состоит из трансформатора напряжения TV, поляризованного двухобмоточного реле КНА и двух транзисторов VT1 и VT2, работающих в ключевом режиме. Обмотки реле КНА создают магнитные потоки противоположного направления, одно из которых совпадает с направлением потока постоянного магнита. Таким образом, положение якоря реле зависит от того, в какую обмотку подан ток. Когда срабатывает защита и замыкается, например, контакт К1, в первичной обмотке трансформатора возникает ток, установившееся значение которого определяется суммарным сопротивлением этой обмотки и резистора R1. При изменении этого тока от нуля до установившегося значения на вторичной обмотке трансформатора наводится ЭДС, вызывающая отпирание транзистора VT1, благодаря чему получает питание соединённая с его коллектором катушка реле КНА. Реле срабатывает, замыкая свой контакт КНА в цепи промежуточного реле KL, а это последнее, в свою очередь, замыкает контакт KL.1 и приводит в действие сирену HA.

Снимается звуковой сигнал тем же контактом реле KL, которое отключается после подачи тока в другую катушку реле КНА – либо кнопкой центрального съёма сигнала SBC, либо автоматически через контакт реле времени КТ. Это реле включается контактом KL.2 реле KL одновременно со звуковым сигналом и, действуя с замедлением на возврат, обеспечивает ограничение длительности сигнала. Снятие сигнала осуществляется также при квитировании ключа управления, когда цепь несоответствия разрывается контактом К1 и импульс тока противоположной полярности открывает транзистор VT2. Если до квитирования аварийно отключится ещё один выключатель и замкнётся, например, контакт К2, сигнал будет подан повторно, так как резисторы R1 и R2 окажутся включёнными параллельно, сопротивление цепи несоответствия уменьшится и ток в цепи первичной обмотки трансформатора TV скачкообразно возрастет. Процесс повторится вплоть до отключения N-го выключателя, причём число повторных включений N ограничивается насыщением трансформатора.

#### **6.4.4.4. Автоматическое повторное включение (АПВ).**

Статистические данные показывают, что большая часть повреждений на линиях (70...80%) носит неустойчивый характер: они либо быстро самоустраняются, либо ликвидируются после действия защиты. На ВЛ это – атмосферные перенапряжения, схлёстывание проводов, перекрытие их вследствие набросов, на КЛ – заплывающие пробой изоляции, КЗ на кабельных сборках и др. Кроме того, отключение потребителей может произойти при кратковременных толчках нагрузки в сети, вследствие ошибочных действий персонала или защиты и т.п. Отключившуюся линию целесообразно вновь включить под напряжение сразу же после аварии, не ожидая выяснения ее причин, путём *автоматического повторного включения* (АПВ). Если после этого линия остаётся в работе, АПВ принято называть успешным. Устойчивые повреждения (обрыв проводов, тросов или гирианд изоляторов, падение опор ВЛ, обрыв кабеля при строительных работах и т.п.) происходят значительно реже и не самоликвидируются. АПВ при таких повреждениях называют неуспешным. В необходимых случаях устройствами АПВ оснащаются не только ЛЭП, но и шины подстанций, трансформаторы.

АПВ могут быть однофазными (ОАПВ) или трёхфазными, последние, в свою очередь, простыми (ТАПВ), быстродействующими (БАПВ), с проверкой отсутствия или

наличия напряжения (АПВОН или АПВНН) и др. Все устройства АПВ должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Схемы АПВ должны приходить в действие при аварийном отключении по сигналу от контактов релейной защиты, от блок – контактов привода выключателя или от реле положения. В последнем случае команда на включение подаётся в результате несоответствия последней заданной операции «включить» действительному отключённому положению выключателя.

2. Схемы АПВ не должны приходить в действие: а) при оперативном отключении выключателя персоналом; б) при отключении его релейной защитой сразу же после включения персоналом, так как повреждения в таких случаях обычно бывают устойчивыми; в) при срабатывании отдельных защит, например, газовой, дифференциальной.

3. Должно обеспечиваться действие АПВ с заданной кратностью. Наибольшее распространение получили АПВ однократного действия, на линиях 35 кВ и выше применяются АПВ двухкратного и даже трёхкратного действия.

4. Время действия АПВ должно быть по возможности минимальным. Наименьшая выдержка времени составляет обычно 0,2...0,3 с, выдержка времени второго цикла 10...15, третьего 60...120 с.

5. Должен обеспечиваться автоматический возврат в исходное положение после успешного АПВ.

Для того, чтобы сократить период отсутствия напряжения и избежать развития аварии при повторном включении линии на устойчивое повреждение, применяют ускорение действия защиты – автоматическое снижение её выдержки времени до определённого значения, включая и нулевое. При выполнении ускорения защиты после АПВ, кроме селективного действия максимальной токовой защиты с выдержкой времени, предусматривается ускоренное, но неселективное действие от мгновенного контакта, цепь которого нормально разомкнута контактом промежуточного реле ускорения с замедлением на возврат. Это реле срабатывает перед повторным включением выключателя и держит свой контакт замкнутым в течение 0,7...1 с. Поэтому, если повторное включение произошло на устойчивое КЗ (неуспешное АПВ), второй раз защита сработает без выдержки времени по цепи контакта ускорения. В случае успешного АПВ линия кратковременно остаётся включённой с неселективной защитой.

Ускорение защиты до АПВ позволяет ускорить отключение КЗ и обеспечить селективное отключение повреждений. С этой целью защита линии выполняется так, что первый раз она действует по цепи ускорения, без выдержки времени. После АПВ, если повреждение устранено, линия остаётся в работе, если же повреждение оказалось устойчивым, защита вновь отключит линию, но уже с нормальной выдержкой времени.

Иногда применяют поочерёдное АПВ, обеспечивающее и селективное, и быстрое отключение повреждённой линии при помощи ускоренной неселективной защиты. Однако такие схемы сложны и, поскольку АПВ линий производится, начиная с головного участка, перерыв питания потребителей получается тем длиннее, чем больше номер ступени АПВ.

Схемы АПВ выключателей с электромагнитным приводом строятся на базе типовых комплектных устройств – чаще всего реле РПВ-58 и РПВ- 258 (рис. 6.35). В

комплект РПВ-58 входят: реле времени КТ1; промежуточное реле КЛ1 с параллельной КЛ1(1) и последовательной КЛ1(2) обмотками; конденсатор С, обеспечивающий однократность действия АПВ; зарядный R2 и разрядный R3 резисторы.

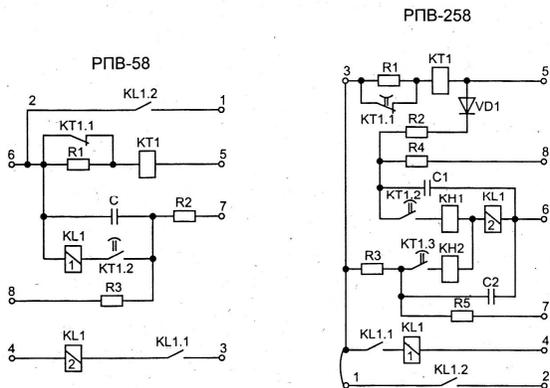


Рис. 6.35. Комплектные устройства типов РПВ-58 и РПВ-258 для схем АПВ однократного и двукратного действия

При включении выключателя конденсатор С заряжается через резистор R2. Пуск АПВ происходит при аварийном отключении выключателя, когда ключ управления остаётся в положении «включено»: тогда замыкается вспомогательный контакт выключателя и получает питание обмотка реле времени КТ1. По истечении выдержки времени это реле замыкает свой контакт КТ1.2, током разряда конденсатора С на параллельную обмотку КЛ1(1) включается промежуточное реле КЛ1 и подаёт импульс на включение выключателя. Благодаря обмотке КЛ1(2), соединённой последовательно с контактором включения выключателя, реле самоудерживается на время, необходимое для срабатывания привода выключателя.

Если повреждение было неустойчивым, то линия остаётся в работе. Размыкается вспомогательный контакт выключателя, разрывается цепь питания реле времени, конденсатор С начинает заряжаться вновь и спустя 20...25 с схема АПВ будет автоматически подготовлена к повторному действию. Если же повреждение было устойчивым, то включённый при АПВ выключатель снова отключится защитой. Затем, как и ранее, сработает реле КТ1, но реле КЛ1 второй раз не включится, так как конденсатор С зарядиться не успеет, – АПВ действует однократно. При отключении выключателя ключом управления положение несоответствия не создаётся и оперативное напряжение на схему АПВ не поступает.

Схема реле РПВ-258, в отличие от РПВ-58, содержит два конденсатора. Хотя при неуспешном АПВ конденсатор С1 зарядиться не успевает, реле КЛ1 тем не менее включается разрядом конденсатора С2; включается и выключатель. Если второй цикл АПВ оказывается успешным, схема возвращается в исходное состояние и начинается заряд конденсаторов. Если же неуспешен и второй цикл, то реле КТ1 сраба-

тывает вновь и остаётся под напряжением, пока не будет квитирован ключ управления (снят «+» с вывода 3). Контакты КТ1.2 и КТ1.3 замыкают цепи конденсаторов С1 и С2, но так как они ещё не заряжены, АПВ не происходит. Зарядиться они не могут, так как конденсатор С1 замкнут на резистор R2, а конденсатор С2 – на обмотки реле. Диод VD препятствует разряду конденсатора С1 во время первого цикла.

Находят применение также реле типа РПВ-358, РПВ-69Т. Реле РПВ-358 обеспечивает однократное действие АПВ для линий с одно- и двусторонним питанием, но может применяться на подстанциях с оперативным переменным или постоянным током напряжением 24 и 48 В, оборудованных выключателями с дистанционным управлением.

Взамен реле РПВ-58 и РПВ-258 предназначены статические реле РПВ-01 и РПВ-02. Номинальное оперативное напряжение переменного тока 220 или 110 В, номинальный ток удерживающей (токовой) обмотки от 0,25 до 4 А, регулировка уставки – ступенями. Потребляемая мощность в длительном режиме – до 7 Вт. Диапазоны выдержки времени на включение: 0,5...10 с (РПВ-01 и первое включение РПВ-02) и 5...100 с (второе включение РПВ-02). Время повторной готовности после каждого цикла 15...60 с (РПВ-01) и 30...120 с (РПВ-02).

Реле построены на базе интегральных микросхем серии К176. Генератор колебаний регулируемой частоты на операционном усилителе и счётчик импульсов образуют орган измерения выдержки времени, которую можно изменять подбором параметров РС – цепи генератора. Выходные цепи реле гальванически не связаны с основной схемой реле.

В схемах присоединений с воздушным выключателем предусматривается запрет действия АПВ при недостаточном давлении сжатого воздуха. При включении выключателя расход воздуха незначителен и снижение давления несущественно, но при отключении давление в резервуарах резко понижается. Поэтому для дистанционного управления должен быть обеспечен запас воздуха в расчёте на одну операцию отключения, а для однократного АПВ – на две таких операции, с тем, чтобы при повторном включении на неустранившееся КЗ выключатель был готов к отключению. Двукратное АПВ на воздушных выключателях применяется редко, так как для трёхкратного отключения КЗ (один раз до АПВ и два раза после неуспешного АПВ) объём воздуха в резервуарах может оказаться недостаточным и потребуются установка дополнительных бачков.

Неустойчивыми оказываются большинство повреждений на шинах подстанции, и эффективность использования АПВ здесь весьма высока. Выполняется АПВ с действием от защиты шин (обычно дифференциальной) и осуществляется двумя способами: а) использование устройств АПВ присоединений, подключённых к шинам подстанции (линий и трансформаторов), и б) установка отдельных комплектов АПВ. Если подстанция питается от нескольких линий, может осуществляться АПВ не одной, а нескольких или всех линий. В случае успешного АПВ первой линии поочерёдно включаются выключатели других линий. Если первая линия включилась на устойчивое КЗ, то снова сработает защита шин. При этом действие АПВ других линий блокируется и их выключатели не включаются.

АПВ трансформатора применяется как для одиночных трансформаторов, отключение которых может привести к ущербу или аварии, так и для параллельно работающих трансформаторов, установленных на подстанциях без обслуживающего пер-

сонала. На подстанциях с односторонним питанием и одним трансформатором АПВ этого трансформатора является обязательным. При наличии двух или нескольких трансформаторов АПВ выполняют в том случае, когда отключение одного из них может привести к нарушению питания потребителей.

При повреждении внутри трансформатора АПВ может увеличить тяжесть аварии, и потому действие АПВ запрещается. Схема с реле РПВ-58, например, строится так, что при срабатывании дифференциальной или газовой защиты трансформатора конденсатор С, обеспечивающий однократное действие реле, быстро разряжается. Применяются схемы пуска от максимальной токовой защиты и от несоответствия положений ключа управления и выключателя.

#### **6.4.4.5. Устройства автоматического включения резервного источника питания (АВР).**

Все схемы АВР должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Схема должна приходить в действие при исчезновении напряжения на шинах потребителей по любой причине, в том числе и при КЗ.
2. Для уменьшения перерыва питания потребителей включение АВР должно производиться сразу же после отключения рабочего источника.
3. Действие АВР должно быть однократным.
4. Должно предусматриваться ускорение защиты резервного источника после АВР.
5. Схема не должна приходить в действие до отключения рабочего источника.

6. Пусковые органы минимального напряжения не должны действовать при неисправностях в цепях напряжения. С этой целью применяют включение минимальных реле на разные трансформаторы напряжения, используют реле минимального тока рабочего источника, трёхфазный выпрямительный мост и др.

Большое количество подстанций с двумя или более источниками питания работает по схемам одностороннего питания. В одной из схем один источник (рабочий) включён, а другой (резервный) отключён, во второй схеме включены все источники, но каждый работает раздельно на своих потребителях. Деление осуществляется на одном из выключателей. Недостатком одностороннего питания является то обстоятельство, что при аварийное отключение рабочего источника приводит к прекращению питания потребителей. Этот недостаток может быть во многих случаях преодолен путём быстрого автоматического включения резервного источника или включения выключателя, на котором производится деление сети.

*АВР трансформатора.* Пусть, например, питание потребителей нормально производится от рабочего трансформатора Т1, а трансформатор Т2 находится в резерве. При отключении трансформатора Т1 блок-контакты его выключателя дают команду на включение обоих выключателей (ВН и НН) трансформатора Т2. Благодаря тому, что этот сигнал подаётся через контакты промежуточного реле с выдержкой времени на возврат 0,4...0,6 с, обеспечивается однократность действия АВР: если Т2 включился на неустранившееся КЗ и отключился своей защитой, его повторного включения не произойдёт, так как контакты реле будут разомкнуты.

Подобная схема не подействует, если при отсутствии КЗ по той или иной причине исчезнет напряжение на шинах ВН рабочего трансформатора, так как выключатели трансформатора останутся включёнными. АВР в этом случае обеспечивается спе-

циальным пусковым органом, выполненным на двух реле минимального напряжения. При исчезновении напряжения эти реле замкнут свои контакты в цепи реле времени, действующего в конечном счёте на отключение обоих выключателей рабочего трансформатора.

*АВР секционного выключателя.* Пусть, например, питание секций шин подстанции осуществляется от двух рабочих трансформаторов Т1 и Т2. Секционный выключатель нормально отключён. При отключении любого из трансформаторов Т1 или Т2 происходит автоматическое включение секционного выключателя средствами АВР. На случай включения на неустранившееся КЗ предусмотрено ускорение защиты секционного выключателя после АВР. В отличие от АВР трансформатора пусковой орган минимального напряжения здесь не нужен, так как оба источника питаются от общих шин высшего напряжения и при исчезновении напряжения на них действие АВР будет бесполезным.

*АВР линий.* Пусть, например, участок сети имеет двустороннее питание от источников I и II, промежуточные же подстанции получают одностороннее питание. Схема АВР обеспечивает восстановление питания всех потребителей в случае аварийного отключения одного из этих источников. Действие АВР обычно увязывается с АПВ линий, что обеспечивает наибольшую эффективность работы автоматики.

Некоторую специфику имеет АВР на переменном оперативном токе. Простейшей является схема АВР одностороннего действия для подстанции с выключателями, имеющими грузовые или моторные приводы без автоматического завода груза или пружин. Нормально подстанция питается от рабочего источника, резервный же находится под напряжением, а его выключатель отключён. Груз или пружины этого выключателя должны быть заведены, т.е. груз поднят, а пружины натянуты.

Пусковым органом АВР является реле минимального напряжения прямого действия, встроенное в привод рабочего выключателя. При исчезновении напряжения на шинах подстанции реле срабатывает и с заданной выдержкой времени отключает выключатель. Блок – контакт последнего подаёт напряжение на включающую катушку выключателя резервного источника, которая освобождает механизм зацепления, удерживающий груз или пружины в заведённом состоянии. Если включение произошло на установившееся КЗ, то резервная линия отключается.

Когда выключатель резервного источника оборудован грузовым или пружинным приводом с автоматическим заводом, реле минимального напряжения действует на отключающую катушку выключателя рабочего источника питания. Однократность действия АВР обеспечивается тем, что для подготовки включившегося выключателя резервной линии к новому действию происходит автоматическое натяжение пружины или подъём груза с помощью вспомогательного двигателя, питание которого осуществляется через замыкающий блок – контакт рабочего выключателя. Таким образом, если резервный выключатель отключился при включении на устойчивое КЗ, то повторно включиться он не сможет, так как цепь питания двигателя будет разомкнута и груз или пружины привода заведены не будут.

Напряжение срабатывания реле напряжения принимается равным

$$U_{cp} = (0,25 \dots 0,40)U_{ном.}$$

В схемах пусковых органов применяются реле напряжения, которые имеют пределы уставок 15...60 В и допускают длительное включение на напряжение 100 и 220 В.

#### **6.4.4.6. Автоматическая разгрузка трансформаторов.**

Для предотвращения повреждения трансформаторов при перегрузке применяются схемы автоматической разгрузки трансформаторов. При значительной перегрузке часть потребителей отключается, с тем, чтобы с оставшейся нагрузкой трансформатор мог работать 1...2 ч. Автоматика действует однократно.

Наиболее простая схема содержит токовое реле и многопозиционное реле времени. Токовое реле, срабатывающее при перегрузке, включает реле времени, которое, спустя первую выдержку времени, отключает первую группу потребителей. Если недопустимая перегрузка будет продолжаться и токовое реле не возвратится в исходное положение, реле времени отключит вторую группу потребителей с выдержкой времени второй ступени и так до 4 – 5 ступеней. Уставка срабатывания токового реле принимается порядка  $(1,3...1,4)I_{ном}$  трансформатора. Выдержка времени первой ступени принимается 5...10 мин, а каждой последующей ступени на 0,5 мин больше предыдущей.

Иногда дополнительно используется электроконтактный термометр, измеряющий температуру верхних слоёв масла в трансформаторе. Цепь реле времени замыкается при срабатывании как токового реле, так и термометра, уставка которого принимается  $70...80^{\circ}\text{C}$ . Схема может быть дополнена вторым токовым реле с уставкой  $(1,5...1,6) I_{ном}$ , действующим на реле времени без температурного контроля.

#### **6.4.4.7. Автоматическое регулирование напряжения и коэффициента мощности.**

*Принципы регулирования.* Регулирование напряжения и коэффициента мощности часто осуществляется одними и теми же средствами, поэтому соответствующие мероприятия рассматриваются совместно.

Поддержание напряжения на уровне, близком к номинальному, имеет особое значение для потребителя: снижение его хотя бы на 5...10% может привести к недоотпуску продукции (электродвигатели, электропечи) и даже браку (контактная сварка, высокочастотная закалка), а повышение – к ускоренному износу изоляции, снижению срока службы электрооборудования (срок службы ламп накаливания, например, сокращается втрое при повышении напряжения на 10%).

Потерю напряжения можно рассчитать как

$$U = \frac{Pr + Qx}{n_{\tau} U_{\text{нн}}},$$

где  $U_{\text{нн}}$  – напряжение на шинах потребителя;

$P, Q$  – активная и реактивная составляющие мощности, передаваемой по линии;

$r, x$  – активное и реактивное сопротивление питающей линии и трансформатора;

$n_{\tau}$  – коэффициент трансформации силового трансформатора.

Из приведённого выражения видно, что изменить напряжение с помощью установленного на подстанции оборудования можно двумя способами: а) изменением коэффициента трансформации трансформатора посредством переключающих устройств и б) компенсацией реактивной мощности с помощью синхронных конденсаторов (двигателей) или статических конденсаторов (применяется и для повышения коэффициента мощности). Компенсирующая ёмкость подключается параллельно индуктивности сети (*поперечная* компенсация), а иногда – последовательно в сеть (*продольная* компенсация), что позволяет также уменьшить колебания напряжения. Обычно подключение осуществляется в точке, к которой подсоединены наиболее мощные потребители, а также электроустановки, вызывающие существенное искажение кривой напряжения питающей сети (вентильные преобразователи, дуговые электропечи).

Устройства автоматического регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой (РПН) путём изменения коэффициента трансформации были рассмотрены в п. 3.7.

Отключение статических конденсаторов, когда напряжение на шинах повышено, и включение их при снижении напряжения позволяет уменьшить колебания напряжения, стабилизировать его. Автоматическое управление режимом осуществляется в функции напряжения на шинах подстанции, тока нагрузки или направления мощности в линии. Применяется также управление по заданной программе, например, с помощью электрических часов.

Способы регулирования мощности конденсаторных батарей (КБ) можно разделить на три группы:

а) ступенчатое регулирование путём включения или отключения отдельных секций КБ или изменения схемы соединений;

б) плавное изменение реактивной мощности с помощью специальных устройств, например, тиристорных;

в) регулирование путём изменения индуктивности, включённой параллельно или последовательно с ёмкостью.

*Ступенчатое регулирование конденсаторных батарей.* Одноступенчатое регулирование (т.е. одновременное отключение – включение всех секций КБ) является грубым и не всегда приемлемым, поэтому преимущественное распространение получило многоступенчатое регулирование. В качестве примера на рис. 6.36 показана структурная схема многоступенчатого регулятора типа АРКОН.

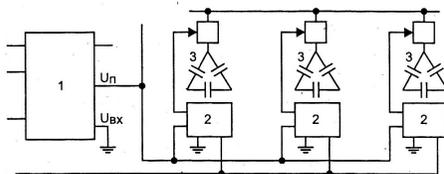


Рис.6.36. Структурная схема регулятора АРКОН

Регулирование здесь осуществляется по напряжению (линейному или фазному) или по напряжению с коррекцией по току нагрузки и углу между ними. При регулировании по напряжению на командный блок 1 подаются напряжение питания  $U_n$  и входное напряжение  $U_{вх}$ , для коррекции по току подключается ток свободной фазы от трансформатора тока ввода и от трансформатора тока КБ. Командный блок 1 с выдержкой времени 1...3 мин посылает программному блоку 2 команду на включение или отключение секции 3 батареи, – в зависимости от значения входного сигнала.

В качестве коммутационных аппаратов для изменения числа рабочих секций КБ целесообразно использовать тиристорные выключатели, которые допускают большое число срабатываний, позволяют снизить бросок тока при включении, исключить переходный процесс при отключении и сократить время включения и отключения КБ. Наиболее благоприятным для включения КБ является момент перехода через нуль напряжения сети, для отключения – момент перехода тока через нулевое значение.

*Плавное изменение мощности КБ.* Тиристорные регуляторы позволяют плавно изменять ток, а, следовательно, и реактивную мощность КБ. Изменение значения протекающего тока достигается изменением угла проводимости (времени открытого состояния) тиристор: чем меньше угол проводимости, тем меньше действующее значение первой гармоники тока, протекающего через КБ. Для уменьшения угла проводимости тиристоры гасят ранее точки естественной коммутации, применяя искусственную коммутацию. С этой целью параллельно КБ подключают сторонний источник импульсов тока. Когда напряжение импульса станет больше коммутирующего напряжения сети, ток в проводящем вентиле снизится до нуля и тиристор закроется. Существенным недостатком такого регулятора является искажение формы кривой тока, тем более сильное, чем меньше угол проводимости. Тиристорные вентили с успехом заменяются приборами IGBT, не требующими искусственной коммутации.

*Плавное регулирование с помощью индуктивности.* Наиболее высокое качество регулирования достигается применением постоянно включённых конденсаторов (фильтров гармоник) и реакторов, управляемых тиристорами (рис. 6.37).

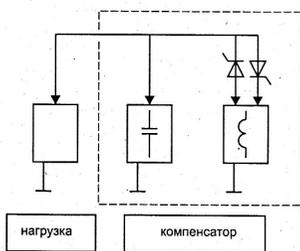


Рис.6.37. Структурная схема компенсатора с ёмкостью и регулируемой индуктивностью

Такие установки используются в сетях напряжением 6 – 20 кВ. Если напряжение сети меньше заданного, то вся реактивная мощность, генерируемая конденсаторами, поступает в сеть. Когда напряжение сети возрастает выше номинального, часть мощ-

ности потребляется реакторами до их номинальной загрузки. Управление реактивной мощностью осуществляется с помощью тиристорov. Для регулирования напряжения кабельных линий используются компенсаторы, содержащие только реакторы, так как КЛ имеют значительную собственную ёмкость.

Система управления компенсатором измеряет напряжение сети и несколько других параметров: переток реактивной мощности по одной или нескольким линиям либо через компенсатор; мощность или её изменение по линиям; изменение угла между током и напряжением; изменение частоты сети. Компенсаторы подключаются на стороне НН (до 20 кВ), так как из-за отсутствия единичных вентилях на напряжение выше нескольких кВ создание тиристорных регуляторов на более высокое напряжение технически сложно и экономически не оправдано. Измерительные устройства устанавливаются на стороне ВН с целью контроля напряжения и перетока реактивной мощности в линиях высокого напряжения, поскольку другие устройства регулирования напряжения (РПН трансформатора) находятся на стороне ВН подстанции. Регулятор использует измеренные параметры для установления требуемой выходной мощности компенсатора. Выходной сигнал регулятора поступает на блок формирования управляющих импульсов тиристорov. Угол управления которыми и определяет компенсируемую реактивную мощность.

Компенсаторы могут работать в функции напряжения или реактивной мощности в линии, с уставками соответственно по значению напряжения или по значению и направлению перетока реактивной мощности. При регулировании напряжения в линии регулятор компенсатора должен выдавать сигнал также и в систему РПН трансформатора для обеспечения работы обоих устройств. Компенсатор имеет набор защит, действующих при внутренних и внешних отклонениях параметров нормальной работы.

#### ***6.4.4.8. Источники питания релейной защиты и автоматики.***

Источники электропитания чрезвычайно разнообразны и различаются по назначению, принципу устройства, конструкции, мощности, роду тока и пр.

*Постоянный ток.* Аккумуляторные батареи. Наиболее надёжным, «классическим» источником оперативного постоянного тока для питания цепей релейной защиты, автоматики, управления и сигнализации является аккумуляторная батарея (АКБ), собираемая обычно из свинцово – кислотных аккумуляторов. Однако ввиду дороговизны, необходимости специального помещения и квалифицированного обслуживания АКБ устанавливаются лишь на электростанциях и крупных подстанциях. Как компромисс, более широко применяются АКБ небольшой ёмкости для питания слаботочных оперативных цепей.

Для обеспечения нормальной работы аккумуляторов используются зарядно – подзарядные агрегаты, чаще всего в виде регулируемых (тиристорных) выпрямителей. Если выпрямитель предназначен для питания нагрузки на время отключения АКБ, он снабжается индуктивным фильтром (дросселем). При работе только на аккумулятор форма тока роли не играет и фильтр не требуется. Когда АКБ и выпрямитель работают параллельно, отдельный фильтр также не требуется, так как аккумулятор сам по себе представляет большую фильтрующую ёмкость.

Применяются и комплектные устройства – шкафы управления оперативным постоянным током (ШУОТ), в которых смонтированы АКБ и подзарядное устройство

на тиристорах. Выходное напряжение подзарядного устройства сглаживается и стабилизируется. В нормальном режиме мощность в нагрузку отдаёт подзарядное устройство, а при понижении питающего напряжения – АКБ.

Номинальное напряжение оперативного постоянного тока составляет обычно 110 – 220 В. Использование меньших значений напряжения нежелательно ввиду того, что при этом контакты и контактные соединения часто оказываются ненадёжными.

Для преобразования напряжения 110 – 220 В к значениям, необходимым для питания схем с полупроводниковыми приборами (5; 9; 15 В и др.), применяют делители напряжения АКБ и полупроводниковые преобразователи напряжения. В схемах делителей напряжения одновременно осуществляется и стабилизация выходного напряжения. Недостаток делителей напряжения на резисторах, транзисторах – большая рассеиваемая мощность..

Широко распространены схемы защиты, не требующие применения аккумуляторов.

*Переменный оперативный ток.* Применяется в операциях с дешунтированием электромагнитов управления (отключение выключателя или включение короткозамыкателя). Источником питания служит трансформатор тока (ТА). При срабатывании выходного реле защиты сначала замыкается цепь электромагнита управления и лишь затем размыкается контакт реле, шунтирующий электромагнит (реле тока серии РТ80, промежуточные реле типа РП-341). В отсутствие замыкающего контакта возможно было бы срабатывание электромагнита при максимальных токах внешних КЗ даже в том случае, если бы выходное реле не сработало. Резкое увеличение нагрузки ТА при введении в его цепь обмотки мощного электромагнита может вызвать возврат измерительных органов защиты. Поэтому необходимо проверять отсутствие возврата выходного реле после дешунтирования и допустимость максимального тока КЗ для контактов реле.

Находят также ограниченное применение схемы с промежуточными насыщающимися трансформаторами (ПНТ) во вторичных цепях ТА, являющимися источником переменного оперативного напряжения для питания реле и электромагнитов.

*Выпрямленный оперативный ток.* Выпрямленное напряжение получается из переменного посредством полупроводниковых выпрямительных мостов: однофазного (так наз. мостик Греца), трёхфазного с нулём (мост Миткевича, трёхфазная пульсация) или трёхфазного моста Ларионова (шестифазная пульсация). Выпускаются типовые выпрямительные блоки (регулируемые и нерегулируемые) со стабилизаторами и фильтрами выходного напряжения. Наибольшее распространение получили комбинированные источники – с выпрямительными блоками тока и напряжения, питающимися соответственно от трансформаторов тока и от трансформаторов напряжения или собственных нужд. В нормальном режиме выпрямленное выходное напряжение обеспечивает блок напряжения (БПН), а при КЗ – токовый блок питания (БПТ), либо оба блока, работающие параллельно. В последнем случае надо иметь в виду, что даже при одинаковом среднем значении выходного напряжения каждого из блоков результирующее значение может существенно от него отличаться вследствие разницы по фазе питающих напряжений переменного тока. Этот недостаток можно устранить применением регулируемого БПН или БПТ с обратной связью по результирующему напряжению.

Выпрямленное напряжение заданного значения можно получить и из постоянного напряжения другого уровня с помощью преобразователей, называемых *инверторами*. Преобразователь представляет собой прерыватель постоянного тока, осуществляющий поочерёдное подключение к его выходным зажимам положительного и отрицательного полюсов источника питания. Получаемое импульсное напряжение трансформируется и выпрямляется.

*Автономным* инвертором называют вентиляльный преобразователь постоянного тока в переменный, отдающий энергию автономной нагрузке, которая не имеет других источников питания. На выходе автономного инвертора может быть получено переменное напряжение с необходимой амплитудой и частотой.

Прерывание тока осуществляется ключами на транзисторах или тиристорах, управляемых импульсами от независимого источника заданной частоты (мультивибратора, блокинг-генератора и др.) или поступающими с частотой, зависящей от параметров нагрузки (инвертор с самовозбуждением). Транзисторные ключи применяются для мало-мощных преобразователей (до нескольких сотен Вт), тиристорные же переключатели могут быть изготовлены для блоков питания любой мощности. Однако для записывания тиристоров путём искусственной коммутации дополнительно требуются источники коммутирующего напряжения, которыми обычно служат конденсаторы.

Упрощённая схема автономного инвертора на тиристорах представлена на рис. 6.38,а. Батарея коммутирующих конденсаторов  $C$  присоединена к вентиляльной обмотке трансформатора  $T$  с тиристорами  $VS1$  и  $VS2$  в её цепи. Пусть в данный момент проводит ток вентиль  $VS1$ , а вентиль  $VS2$  заперт. Коммутирующий конденсатор  $C$  заряжается от источника постоянного напряжения таким образом, что его левая по схеме обкладка приобретает отрицательный потенциал. В момент, когда вентиль  $VS1$  ещё проводит ток, на вентиль  $VS2$  подаётся отпирающий импульс, и конденсатор  $C$  оказывается замкнутым через оба вентиля. Возникающий при этом ток разряда конденсатора уменьшает ток вентиля  $VS1$  и увеличивает ток вентиля  $VS2$ . Когда ток через вентиль  $VS1$  становится меньше тока удерживания, вентиль закрывается и отрицательный полюс источника питания через  $VS2$  соединяется с правой обкладкой конденсатора, который начинает перезарядаться. Далее отпирается управляющим импульсом вентиль  $VS1$ , происходит коммутация тока с вентиля  $VS2$  на  $VS1$  и т.д.

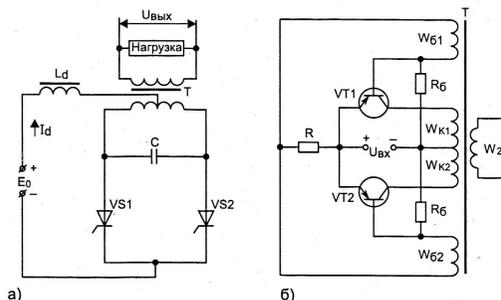


Рис. 6.38. Упрощённые схемы автономного инвертора на тиристорах (а) и транзисторного автогенератора (б)

Процесс перезарядки конденсатора повторяется периодически, а переменное напряжение на его обкладках, приложенное к вентильной обмотке трансформатора Т, наводит ЭДС в нагрузочной обмотке последнего. Форма кривой выходного напряжения зависит от параметров нагрузки и в общем случае не является синусоидальной.

Коммутирующие конденсаторы можно подключать и со стороны нагрузочной обмотки – параллельно или последовательно с нагрузкой; описанное устройство относится к числу параллельных инверторов.

Схемы источников управляющих импульсов чрезвычайно разнообразны. Получили распространение схемы генератора на базе насыщающегося трансформатора, который одновременно может служить и выходным трансформатором (рис. 6.38,б). При подаче напряжения на схему один из транзисторов, например VT1, отпирается. Ток в коллекторной обмотке  $w_{k1}$  вызывает ток в базовых обмотках  $w_{61}$  и  $w_{62}$ , который увеличивает отпирающий ток в транзисторе VT1 и запирает VT2. После насыщения магнитопровода трансформатора Т, обусловленного постоянным током через обмотку  $w_{k1}$ , ЭДС базовых обмоток резко снижается и ток через транзистор VT1 уменьшается. При этом ЭДС базовых обмоток меняет свой знак и начинается переманчивание магнитопровода трансформатора. Знакопеременный магнитный поток вызывает появление на всех обмотках трансформатора импульсов ЭДС прямоугольной формы.

Недостатком такого преобразователя являются большие потери в трансформаторе, соизмеримые с мощностью нагрузки. В серийно выпускаемых преобразователях, устроенных по аналогичному принципу, например, в блоках питания устройства ЯРЭ-2201, насыщающийся трансформатор и выходной трансформатор выполнены раздельно.

Схемы с *предварительно заряженными конденсаторами*. Конденсаторы как источники питания используются для подачи достаточно мощного, но кратковременного импульса, или для питания схем с малым собственным потреблением (например, схем на полупроводниковых приборах), т.к. энергия, которая может быть накоплена в конденсаторах серийного изготовления, сравнительно невелика. Как известно, заряд (количество электричества) пропорционален силе тока и времени его протекания. Время заряда обычно не лимитируется, так что его можно производить от маломощного источника, в частности, от измерительных трансформаторов. Зарядные устройства, питаемые от трансформаторов напряжения, состоят из промежуточных трансформаторов с выпрямителями на выходе. Токовые зарядные устройства выполняются аналогично БПТ.

Применяются, в основном, групповые зарядные устройства. Для того, чтобы при разряде конденсаторов одной из групп не разряжались остальные, прибегают к разделению конденсаторных батарей посредством реле или диодов. В первом случае каждая группа конденсаторов заряжается через размыкающий контакт реле, а разряжается через его замыкающий контакт, во втором – каждая группа подключается к зарядному устройству через развязывающие диоды. Схемы с диодным разделением более просты и надёжны.

*Стабилизаторы*. Стабилизаторы напряжения переменного тока строятся обычно на феррорезонансном принципе, т.е. с использованием явления резонанса в цепи, содержащей ферромагнитный элемент (дроссель или трансформатор). Пояснить действие феррорезонансного стабилизатора можно с помощью эквивалентной схемы, со-

стоящей из последовательно соединённых насыщающегося дросселя и конденсатора. Параметры этих элементов подобраны таким образом, что при частоте питающей сети в цепи устанавливается режим резонанса напряжений, характеризующийся следующими особенностями: падения напряжения на индуктивности дросселя (трансформатора) и ёмкости конденсатора равны; ток в цепи определяется только входным напряжением и активным сопротивлением дросселя; при рабочих значениях тока магнитопровод дросселя находится в состоянии насыщения. При изменении входного напряжения и тока (в определённых пределах) падение напряжения на насыщенном дросселе изменяется незначительно и, следовательно, достигается стабилизация напряжения на нагрузке, подключённой к дросселю.

Простейшим стабилизатором напряжения постоянного тока является стабилитрон, используемый как самостоятельно, так и в составе полупроводниковых стабилизаторов различных типов и сложности. Самая простая схема стабилизации (рис. 6.39) состоит из стабилитрона VD и балластного резистора  $R_S$ , ограничивающего ток через прибор. Ввиду того, что на резисторе бесполезно расходуется значительная часть мощности, применяется такая схема только для маломощной нагрузки. Такой стабилизатор относится к числу параллельных, параметрических: стабилизирующий элемент включён параллельно нагрузке, выходное напряжение не регулируется.

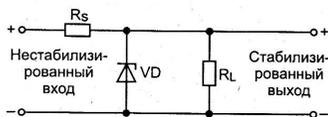


Рис. 6.39. Параметрический стабилизатор на стабилитроне

К разряду параллельных стабилизаторов относится и устройство по схеме рис. 6.40,а с регулируемым стабилизирующим элементом на транзисторе VT. Стабилитрон выполняет здесь роль источника опорного напряжения. Когда входное напряжение возрастает, положительный потенциал базы транзистора увеличивается, его коллекторный ток растёт и соответственно увеличивается падение напряжения на балластном резисторе, компенсируя изменение входного напряжения. При уменьшении входного напряжения коллекторный ток транзистора и падение напряжения на балластном резисторе уменьшаются, а выходное напряжение приближается к заданному значению. Значение выходного стабилизированного напряжения определяется положением движка потенциометра R1. Как и во всех параллельных стабилизаторах, потери мощности велики. Однако по сравнению с параметрическим стабилизатором стабильность выходного напряжения здесь значительно выше благодаря усилительным свойствам транзистора.

В последовательном стабилизаторе (рис. 6.40,б) регулирующий транзистор (иногда его называют проходным) включён последовательно с нагрузкой. Он работает как регулируемое балластное сопротивление, выполняя то же назначение, что и в параллельном стабилизаторе, и так же неэкономично расходует большую мощность. Напряжение на базе транзистора VT фиксировано стабилитроном VD. Когда входное напряжение возрастает, потенциал эмиттера транзистора становится более отрица-

тельным, проводимость транзистора уменьшается, а падение напряжения на нём увеличивается. При уменьшении входного напряжения все указанные зависимости изменяются в обратную сторону.

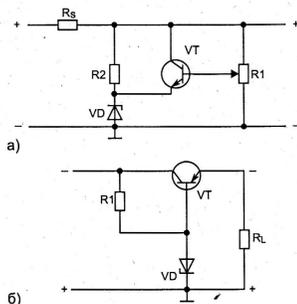


Рис. 6.40. Параллельный (а) и последовательный (б) стабилизаторы с регулирующим транзистором

Более экономичны стабилизаторы импульсного действия. Здесь транзистор работает в ключевом режиме так, чтобы среднее значение выходного напряжения оставалось постоянным.

Выпускаются и стабилизаторы в микросхемном исполнении (например, типа К142ЕН), которые используются как в отдельности, так и в составе более сложных схем с усилителями, защитой и пр. (например, стабилизатор ПО210 в устройстве ЯРЭ-2201).

*Блоки питания.* Выходное напряжение блоков питания стабилизируется. В БПТ стабилизация обеспечивается с помощью ПНТ, насыщение которых до известной степени ограничивает рост напряжения. Но так как напряжение может всё же нарастать и при насыщении ПНТ, дополнительно устанавливают нелинейные резисторы или включают параллельно с вторичной обмоткой ПНТ конденсаторы для образования феррорезонансного контура.

Блоки БПН содержат промежуточные трансформаторы, предназначенные для электрического разделения цепей оперативного тока и трансформаторов напряжения, а также нормирования выходного напряжения. Стабилизация его достаточно просто осуществляется с помощью дросселей насыщения, но такие стабилизаторы инерционны, громоздки и неэкономичны. Этих недостатков лишены тиристорные стабилизаторы, которые, однако, искажают форму кривой напряжения и потому требуют применения сглаживающих фильтров, вносящих свою долю инерционности.

Надёжность питания от выпрямительных блоков характеризуется значениями тока  $I_{н.р}$  и напряжения  $U_{н.р}$  надёжной работы, которые для блоков БПТ и БПН задаются изготовителем. Надёжность питания от комбинированных блоков оценивается по их входной характеристике – зависимости напряжения от тока, который надо подать соответственно на БПТ и на БПН, чтобы выходное напряжение было не ниже допустимого (0,80...0,85 номинального). Предельная входная характеристика представляет собой прямоугольник со сторонами  $I_{н.р}$  и  $U_{н.р}$ . Ток на входе блока, при котором вы-

ходное напряжение равно минимально допустимому, называют током надёжной работы блока.

Блоки питания серии БП11 рассчитаны на питание нагрузки мощностью до 50 Вт. Блок содержит феррорезонансный стабилизатор и однофазный выпрямитель (мостик Греца). Обмотки ПНТ выполнены с отпайками. Уставки на ток наступления резонанса составляют 5; 7,5 и 10 А. Ток наступления феррорезонанса измеряют при плавном увеличении первичного тока ПНТ, без нагрузки. Момент наступления резонанса определяют по резкому броску напряжения на выходе БП.

Длительно допускаемый первичный ток 9,5 А. При этом значении тока в последовательно соединённых обмотках ток нагрузки блока не должен превышать 0,10; 0,20 и 0,35 А при номинальном выходном напряжении соответственно 220, 110 и 24 В.

Блоки питания БПТ 1002 и БПН 1002 рассчитаны на мощность 800...1500 Вт в кратковременном режиме. Блок тока состоит из ПНТ и однофазного выпрямительного моста, феррорезонансный контур образуется с помощью конденсатора и дросселя. В зависимости от нагрузочной способности трансформаторов тока, к которым подключается блок, отдельные секции первичной обмотки ПНТ соединяются последовательно посредством перемычек. Вольт–амперная характеристика (ВАХ) трансформатора тока сравнивается с ВАХ ненагруженного блока, снятой со стороны входа. Число витков первичной обмотки ПНТ выбирается таким образом, чтобы ВАХ трансформатора тока проходила выше ВАХ блока при токах больше 5 А.

Длительно допустимый ток нагрузки 7 А для работы на уставке номинального выходного напряжения 110 В и 3,5 А – для 220 В. При плавном увеличении тока в первичной обмотке и отсутствии нагрузки на выходе блока феррорезонанс наступает при МДС  $840 \pm 100$  Ав.

Блок напряжения состоит из трёхфазного трансформатора и двух выпрямительных мостов Ларионова, которые соединяют параллельно или последовательно для получения выходного напряжения 110 или 220 В. Номинальные входные напряжения от 100 до 440 В. При номинальном напряжении потребление блока не превышает 25 В·А на фазу при отсутствии нагрузки; 1500 В·А при нагрузке 5 и 20 Ом (уставки выходного напряжения 110 и 220 В соответственно); 750 В·А при нагрузке 10 и 40 Ом (110 и 220 В). При напряжении 110% номинального длительный ток нагрузки не должен превышать 6,4 А (110 В) или 3,2 А (220 В).

Блоки питания стабилизированного напряжения БПНС-2. На входе блока установлен трёхфазный трансформатор, обмотки которого могут быть соединены по схеме треугольник – звезда или звезда – звезда. Выходная мощность блока: номинальная длительно допустимая – 1000 Вт, в течение 30 с – 1800 Вт. Блок обеспечивает напряжение на выходе в пределах 0,85...1,1 номинального значения (220 В) и имеет два исполнения: со сглаживающим фильтром и без него.

Блок содержит трёхфазный магнитный усилитель с отрицательной обратной связью по напряжению выхода. Этот усилитель и схема на стабилитронах осуществляют стабилизацию выходного напряжения блока.

Блоки питания и заряда БПЗ-401, БПЗ-402 могут использоваться как для питания оперативных цепей защиты непосредственно, так и для заряда конденсаторов, используемых в качестве источников питания электромагнитов приводов и реле.

Блок БПЗ-401 состоит из промежуточного трансформатора напряжения и выпрямительного моста на выходе, блок БПЗ-402 – из промежуточного насыщающегося

трансформатора тока и выпрямительного моста. Оба блока содержат на выходе резистор, через который можно подключать батареи конденсаторов для медленного заряда. Одновременное использование блока в качестве зарядного и блока питания возможно только при малой нагрузке по оперативным цепям, в противном случае технические характеристики блоков не гарантируются.

Номинальное напряжение заряда конденсаторов – 400 В; потребляемая мощность при длительно допустимой нагрузке 200 Вт (БПЗ-401) или 550 Вт (БПЗ-402); МДС наступления резонанса  $1020 \pm 100$  Ав; уставки по току от 4,65 до 17 А; номинальное выходное напряжение 110 или 220 В (при уставке 110 В функции заряда не выполняются).

*Блоки конденсаторов.* Как правило, от одного зарядного устройства заряжаются несколько групп (блоков) конденсаторных батарей. Чтобы при разряде одной из них остальные не разряжались, осуществляют контактное или диодное разделение групп конденсаторов. Согласно первому методу каждая группа заряжается через замыкающий контакт выходного реле, а разряжается через его замыкающий контакт. При диодном разделении каждая группа подключается к зарядному устройству через силовые диоды, которые и препятствуют одновременному разряду нескольких блоков конденсаторов. Преимущественное распространение получили диодные схемы как более простые и надёжные.

# Глава 7.

## Органы релейной защиты и автоматики (РЗА) и их элементная база.

### 7.1. Электромеханические реле.

Электромеханические реле составляют основную долю находящихся в эксплуатации устройств РЗА. Ниже рассматриваются вторичные реле, у которых воспринимающий орган (обмотка) включается во вторичные цепи измерительных трансформаторов тока и напряжения.

#### 7.1.1. Реле прямого действия.

Реле прямого действия встраиваются в приводы выключателей и действуют на их отключение непосредственно.

Реле максимального тока типа КАМ появились в довоенное время. Реле содержит латунную гильзу с неподвижным полюсом, сердечник, механизм выдержки времени и катушку с отпайками. Сердечник выполнен в виде пустотелого цилиндра, внутри которого расположена пружина. Через сердечник и неподвижный полюс проходит ударник, оключающий выключатель. Ударник соединён с механизмом выдержки времени, которая регулируется путём изменения взаимного положения рейки и сцеплённого с ней зубчатого колеса. Минимальная выдержка времени составляет 0,5 с, максимальная – 4 с. Шкалу выдержек времени можно изменить положением грузика на оси анкера, ток срабатывания реле регулируется путём изменения числа витков катушки в пределах 5...10 А через 1 А. При необходимости верхний предел может быть повышен до 89 А путём пересоединения отпайек на катушке.

Различают следующие режимы работы реле в зависимости от кратности тока в его обмотке относительно тока срабатывания:

а) кратность не более 2...3. В этом режиме сердечник начинает двигаться вверх, причём пружина сжимается незначительно. Усилие от сердечника передаётся на ударник посредством пружины, так что скорость движения последнего зависит от значения тока. Это – режим работы в зависимой части характеристики.

б) более 3...4. Сердечник быстро поднимается вверх до упора и сразу сжимает пружину, которая, стремясь вернуться в исходное положение, толкает ударник вверх. Скорость его движения зависит только от упругости пружины и тормозящих усилий механизма выдержки времени. Это – режим работы в независимой части характеристики.

Коэффициент возврата реле при работе его в зависимой части характеристики составляет 0,7...0,8, в независимой 0,9...0,95.

Реле типа РТВ конструктивно отличается от реле КАМ тем, что изменение выдержки времени производится перемещением установочного винта, связанного с рычагом часового механизма; погрешность не превышает 0,2 с.

Основные характеристики реле РТВ (приводов ПП) приведены на рис. 7.1. Здесь видно, что у реле типополнения РТВ I, II, III независимая часть характеристики наступает при кратности тока в реле ( $I_{\text{р}}$ ) 1,2...1,7 от тока срабатывания ( $I_{\text{ср}}$ ), у реле

РТВ IV, V, VI – при кратности 2,5...3,5. Реле РТВ разных заводов имеют различные пределы и ступени регулирования тока срабатывания.

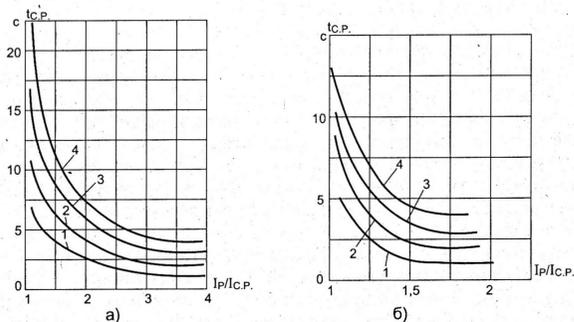


Рис. 7.1. Зависимость времени срабатывания  $t_{cp}$  от кратности тока  $I_p / I_{cp}$  для реле РТВ на уставках 1,2,3 и 4 с: а – реле РТВ IV, V, VI; б – реле РТВ I, II, III.

Коэффициент возврата реле не регулируется и является величиной переменной, зависящей от кратности тока и длительности протекания тока КЗ; его определяют для момента времени, соответствующего отключению КЗ нижестоящей защитой. Так, если защита действует без выдержки времени, коэффициент возврата достигает 0,85...0,9, при времени отключения КЗ около 3 с снижается до 0,65...0,75, а если реле работает в зависимой части характеристики – примерно до 0,6.

Реле максимального тока типа РТМ по конструкции мало отличается от описанных, но не содержит механизма выдержки времени. Из рис. 7.2 видно, что практически мгновенное действие реле обеспечивается лишь при кратности тока не менее 2.

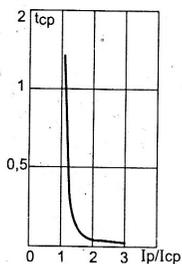


Рис. 7.2. Зависимость  $t_{cp}$  ( $I_p / I_{cp}$ ) для реле РТМ (привод ВМП-10П). Обозначения те же, что на рис. 7.1.

Реле РТМ применяются в основном в схемах токовой отсечки линий и трансформаторов, как токовые реле в дифференциальной защите трансформаторов и в схемах с дешунтированием как электромагнит отключения.

Во всех этих случаях необходимо согласование времени срабатывания реле с выдержкой времени защит, расположенных ближе к источнику питания.

Некоторые модификации реле РТМ допускают плавную регулировку тока срабатывания изменением воздушного зазора между сердечником и неподвижным полюсом.

Реле максимального тока с выдержкой времени типа РМВ имеют независимую характеристику и предназначены для максимальных токовых защит в тех случаях, когда реле с ограниченно зависимой характеристикой неприменимы. Реле выполнено в корпусе реле типа РТВ и с использованием его часового механизма. При токе срабатывания сердечник сжимает пружины, под действием которых начинает работать часовой механизм; при токе возврата и ниже сердечник опускается вниз, возвращая часовой механизм в исходное положение.

Реле минимального напряжения типа РН применяется для защиты без выдержки времени. Для подготовки реле к работе оно должно быть заведено специальным механизмом при включении привода. В заведённом реле катушка находится под напряжением и удерживает сердечник в верхнем положении. При исчезновении напряжения или снижении его до 65% номинального значения и ниже сердечник падает и приводит в действие механизм отключения выключателя. При восстановлении напряжения до 65...85% номинального сердечник вновь подтягивается вверх, но для возвращения в исходное положение реле требует дополнительной заводки.

Реле минимального напряжения с выдержкой времени типа РНВ конструктивно представляет собой сочетание реле РН с часовым механизмом от реле РТВ. Применяется для защиты минимального напряжения высоковольтных двигателей и в схемах автоматики (АВР, АПВ) для отключения или включения выключателей. Пределы изменения выдержки времени 0...5 с.

Реле типа РМНВ – 1 отличается от РНВ тем, что для создания выдержки времени в нём используется часовой механизм от реле времени типа ЭВ –121, работающий под действием пружины. Завод пружины осуществляется вручную. Реле можно вывести из работы путём запирания механизма заведённого реле.

Действие реле типа РНВЛ аналогично. Напряжение срабатывания регулируется пружиной в пределах 35...65% номинального. При снижении напряжения ниже 35% гарантируется безотказное срабатывание реле. Напряжение возврата может быть от 65 до 85%; при напряжении свыше 85% гарантируется включение выключателя. Выдержка времени может регулироваться от 0,5 до 9 с. Следует иметь в виду, что завод гарантирует работу реле с заданным временем только при полном снятии напряжения «скачком»; при плавном снижении напряжения или снижении в пределах 35...65% время работы реле неопределённо. Реле РНВЛ применяется преимущественно для отключения электродвигателей, самозапуск которых недопустим по условиям безопасности, технологии или обеспечения самозапуска других двигателей.

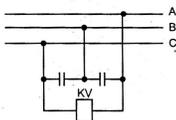


Рис. 7.3. Схема включения реле минимального напряжения РНВЛ и РМНВ-1 с конденсаторами.

Во избежание ложного срабатывания реле при повреждении цепей трансформатора напряжения, в основном, при перегорании предохранителей или обрыве, применяется трёхфазная схема с конденсаторами, собранными в неполную звезду.

Принцип действия схемы заключается в том, что при обрыве одной из фаз А или С реле удерживается за счёт напряжения между фазой В и «здоровой» фазой (С или А), подводимого к его обмотке через конденсатор (рис. 7.3).

### 7.1.2. Реле косвенного действия.

Вторичные реле косвенного действия воздействуют на привод выключателя посредством промежуточных элементов. Обозначения устаревших типов реле отечественного производства приводятся ниже в скобках.

Электромагнитные реле тока и напряжения типов РТ (ЭТ) и РН (ЭН). Магнитная система реле состоит из стального сердечника с двумя обмотками и поворотного якоря. Электромагнитный момент, втягивающий якорь, пропорционален квадрату тока в обмотке и изменению магнитной проводимости в зависимости от угла поворота якоря. Максимальное значение момент имеет при определённых значениях угла, в связи с чем крайние положения якоря ограничиваются упорами, а полный ход его – небольшим углом порядка  $10^\circ$ . Избыточный момент, т.е. разность между электромагнитным и противодействующим механическим моментами, обеспечивает движение якоря и в конце хода его – достаточное давление на контакты. Увеличение давления ведёт к снижению коэффициента возврата, так как для компенсации избыточного момента требуется большее снижение тока в обмотке реле. Обратно, чем меньше избыточный момент, тем выше коэффициент возврата.

Динамические усилия, которым подвергается реле при токах КЗ, пропорциональны квадрату тока в обмотке или, иначе, квадрату отношения тока в обмотке к току срабатывания. По соображениям динамической устойчивости, а также потому, что абсолютное значение усилия в начале шкалы весьма мало, нежелательно выбирать уставки в начальной части шкалы. Рекомендуется, чтобы рабочие уставки токовых реле располагались не ниже одной трети шкалы, реле минимального напряжения – не ниже половины шкалы, так как эти реле постоянно находятся под номинальным напряжением и в большей степени подвержены износу от вибрации.

Электромагнитная сила, действующая на якорь, всегда направлена в сторону притяжения его к сердечнику, независимо от направления тока в обмотке. Поэтому электромагнитный момент пульсирует, изменяясь от нуля до максимума два раза в течение одного периода, т.е. 100 раз в секунду при частоте тока в обмотке 50 Гц. Эти колебания являются причиной *вибрации* подвижной системы реле, которая может возникнуть при любых значениях тока (напряжения), превышающих уставку срабатывания. Для предотвращения или снижения такого эффекта применяют механические демпферы или выпрямители переменного тока, которые при значительной индуктивности обмотки реле позволяют питать её выпрямленным током со сглаженными пульсациями. Вибрации могут возникнуть и при работе на несинусоидальном токе, в частности, в случае насыщения тонкого стального якоря при большой кратности тока в обмотке реле по отношению к току срабатывания (порядка 10 по отношению к начальной уставке по шкале и более) или из – за искажения формы кривой вторичного тока трансформатора тока. В этих случаях применяют реле специального исполнения, меньше подверженные вибрации.

Кроме вибрации подвижной системы, обусловленной характером электромагнитного момента, наблюдается ещё вибрация собственно контактов, имеющая механическое происхождение: в момент касания подвижного и неподвижного контактов возникает отскок контакта. Надёжность работы контактов реле защит определяется чётким однократным срабатыванием и возвратом промежуточного реле или реле времени, на которое действуют эти контакты. При вибрации возможно подгорание контактов и сбой в работе всей схемы защиты. Вибрация реле не допускается независимо от её происхождения.

Уставки срабатывания реле можно изменять вдвое за счёт последовательного или параллельного соединения обмоток путём перестановки перемычек на его зажимах. Цифры, нанесённые на шкале, соответствуют последовательному соединению. Уставки основных типов реле серии ЭТ520 можно изменять в пределах 0,05...200 А, серии ЭН520 и ЭН60 – в пределах 15...400 В.

Разрывная мощность контактов для реле ЭТ и ЭН при напряжении 220 В и токе 2 А составляет 50 Вт на постоянном и 250 В·А на переменном токе. Собственное время срабатывания максимальных реле от момента включения обмотки до замыкания контактов не превосходит 0,15 с для реле ЭТ и ЭН и 0,10 с для реле РТ и РН при токе (напряжении) 120% уставки, а для минимальных реле ЭН500 и РН – не более 0,15 с при снижении напряжения до 80% уставки. Потребляемая мощность реле ЭН и РН на минимальной уставке по шкале составляет 1 В·А, кроме реле РН53/60Д – до 5 В·А. Уставки тока срабатывания реле РТ40 можно изменять в пределах 0,15...200 А, напряжение срабатывания реле серий РН53 и РН54 – в пределах 15...400 В.

### **7.1.3. Электромагнитные токовые реле РТ 40/Ф, РТ 40/Р, РТ 40/1.**

Обмотки реле получают питание через промежуточные трансформаторы, два последних типа – с выпрямителем. Грубое изменение уставок производится переключением отпаек на первичной стороне трансформатора, плавное – поводком реле.

Реле тока мгновенного действия фильтровое РТ 40/Ф обеспечивает заглубление защиты при возникновении высших гармоник тока, в частности, в схемах поперечной дифференциальной защиты генераторов. Отклонение формы кривой переменного тока от синусоиды может происходить по следующим причинам: а) искажение формы кривой ЭДС генераторов; б) наличие в цепях нелинейных элементов, т.е. таких, сопротивление которых зависит от значений приложенного напряжения или тока; наличие регулируемых вентильных преобразователей. Для отстройки реле от токов высших гармоник параллельно обмоткам реле подключены конденсаторы, ёмкость которых выбрана так, чтобы через них протекала большая часть токов высших гармоник. Так, при частоте третьей гармоники токи срабатывания реле возрастают примерно в 8 раз.

Реле имеет 4 диапазона уставок от 1,75 до 17,6 А. Коэффициент возврата на любой уставке не менее 0,8. Мощность, потребляемая реле на минимальной уставке каждого диапазона, не превышает 1 В·А. Изоляция между обмотками выдерживает испытательное напряжение 500 В переменного тока.

Реле РТ 40/Р применяется в схемах устройств резервирования отказа выключателей (УРОВ) для выявления фаз выключателя, не отключившихся при КЗ от релейной защиты. Реле применяется и в других схемах РЗиА, где требуется контроль наличия или отсутствия тока. С этой целью промежуточный трансформатор выполнен в виде

насыщающегося трансформатора тока с тремя первичными обмотками, которые подключаются к трансформаторам тока фаз сети, и одной вторичной, питающей обмотку исполнительного органа – реле РТ 40. Количество витков первичных обмоток выбрано таким образом, что их суммарная МДС оказывается достаточной для срабатывания реле при различных случаях отказа выключателей и видах КЗ. Реле выпускаются на номинальные токи 1 и 5 А. Пределы токов срабатывания от 65 до 260 мА (РТ 40/Р1) и от 325 до 1300 мА (РТ 40/Р2), коэффициент возврата на любой уставке – не менее 0,7.

Реле РТ 40/1 Д применяется в случаях, когда через реле может длительно проходить ток, многократно превышающий уставку срабатывания, и когда применение обычных реле РТ40 невозможно по условиям термической стойкости обмоток. При сверхтоках в первичной обмотке трансформатора сердечник его насыщается, благодаря чему ток в обмотке реле возрастает незначительно. Пределы уставок от 0,15 до 1 А. Время срабатывания при токе 120% уставки не более 0,15 с, при 300% уставки – 0,05 с. Коэффициент возврата реле на любой уставке не менее 0,7. Номинальный ток реле 6 А.

Реле максимального тока РТ81 – РТ86 применяются для защиты электрических машин, трансформаторов и линий передачи при перегрузках и коротких замыканиях. Действуют мгновенно при КЗ и с выдержкой времени при перегрузках. Номинальный ток 5 и 10 А, ток срабатывания от 2 до 10 А, время срабатывания от 1 до 16 с, кратность отсечки 2...8.

Реле максимального тока РТ91, РТ95 отличаются от реле серии РТ80 времятоковой характеристикой.

Реле максимального тока РСТ11 – РСТ14 предназначены в основном для работы в условиях, требующих повышенной устойчивости к механическим воздействиям.

Реле РТФ-7 рассчитаны на срабатывание при токах обратной последовательности 0,2...0,4 номинального тока установок.

Реле тока нулевой последовательности РТЗ-5С и РТЗ-51 используются совместно с трансформаторами тока нулевой последовательности в схемах защит от замыкания на землю.

#### **7.1.4. Электромагнитные реле напряжения РН51/М, РН57, РН58.**

Реле РН51/М реагирует на появление или повышение напряжения постоянного тока и используется для контроля изоляции цепей. Коэффициент возврата реле не менее 0,5; потребляемая мощность не превышает 0,15 Вт. Переключение с одного диапазона уставок на другой осуществляется последовательным или параллельным соединением катушек реле. На шкале имеется только одна уставка по напряжению, которую можно изменять в небольших пределах поворотом стрелки указателя. Напряжение срабатывания реле несколько зависит также от полярности включения его обмоток, поэтому рекомендуется подводить напряжение согласно маркировке у зажимов реле.

Реле РНН 57 реагирует на малые напряжения переменного тока от 4 до 8 В частотой 50 Гц. Благодаря LC- фильтру на входе реле автоматически загроубляется при искажении формы кривой напряжения, так что при частоте 150 Гц напряжение срабатывания возрастает примерно в 8 раз по сравнению с уставкой, соответствующей напряжению частотой 50 Гц. Потребляемая мощность не превышает 30 В·А при на-

пряжении 100 В. Реле нельзя применять в схемах, где напряжение на его обмотке может длительно превышать уставку срабатывания более чем в 2...3 раза.

Реле максимального напряжения РН 58 реагирует на повышение напряжения и применяется в схемах РЗИА, когда требуется высокий коэффициент возврата реле. Переключение числа витков первичной обмотки трансформатора позволяет получить два диапазона уставок, плавное изменение которых производится потенциометром, подключённым к вторичной обмотке. Обмотки исполнительного органа (реле РН50) присоединены к ней через выпрямительный мост и стабилитроны, служащие для повышения коэффициента возврата реле. Диапазон напряжений срабатывания реле от 50 до 100 В, коэффициент возврата около 0,9; потребляемая мощность на первой уставке не более 1,5 Вт, на последней – не более 4 Вт.

Реле минимального напряжения РН-54 реагирует на понижение напряжения.

Реле напряжения обратной последовательности РНФ-1М предназначены для защиты электрических установок при несимметричных КЗ. Номинальное напряжение 100 В, пределы уставки 6...12 В, коэффициент возврата не менее 0,75 В.

#### **7.1.5. Реле максимального тока серий РТ80, РТ90 (индукционные).**

Реле серии РТ80 (ИТ80) применяются для защиты распределительных сетей, трансформаторов и двигателей при перегрузках и коротких замыканиях. Реле состоит из двух элементов: индукционного, создающего ограниченно зависимую от тока выдержку времени, и электромагнитного, обеспечивающего срабатывание реле без выдержки времени при больших токах КЗ (отсечку).

Магнитопровод реле является общим для индукционного и электромагнитного элементов. Он имеет две ветви и делит магнитный поток на две составляющие. Основная ветвь (собственно магнитопровод) представляет собой прямоугольный сердечник с воздушным зазором между полюсами, другая ветвь – это магнитный шунт и якорь отсечки с воздушным зазором.

Индукционный элемент состоит из основного магнитопровода с обмоткой на одном из стержней; алюминиевого диска, закреплённого на оси в подпятниках поворотной рамки; тормозного постоянного магнита и червячной передачи в виде червяка на оси диска и зубчатого сектора. Каждый полюс магнитопровода охвачен короткозамкнутым витком (экраном). Благодаря этому магнитный поток в воздушном зазоре расщепляется на две составляющие, сдвинутые пространственно и по фазе. В результате взаимодействия этих магнитных потоков с наведёнными ими в диске токами создаётся вращающий момент, пропорциональный значениям потоков и синусу угла сдвига между ними и не зависящий от того, вращается диск или он неподвижен. Когда магнитный поток пропорционален току, вращающий момент пропорционален квадрату тока в обмотке реле.

На вращающийся диск действуют не только вращающий, но и тормозной момент. Тормозной момент вызывается рядом факторов, главными из которых являются взаимодействие токов «резания», индуктированных в диске при его вращении, с магнитными потоками в воздушном зазоре основного электромагнита, и взаимодействие поля постоянного магнита с наведёнными им токами. Тормозной момент пропорционален частоте вращения диска, поэтому при равенстве вращающего и тормозного моментов частота вращения пропорциональна квадрату тока.

Однако пропорциональность магнитного потока создавшему его току сохраняется до насыщения сердечника, после чего с возрастанием тока магнитный поток почти не изменяется, а соответственно остаются практически неизменными вращающий момент и частота вращения. Вращающее и тормозное усилия, оказывающие противоположное действие на вращение диска, на рамку действуют согласно. Диск начинает вращаться при токах 20...30% от тока срабатывания индукционного элемента, но реле при этом не срабатывает, так как пружина удерживает рамку в оттянутом положении. При токе уставки реле суммарное усилие преодолевает силу пружины, рамка поворачивается и зубчатый сектор приходит в зацепление с червяком. Сектор начинает подниматься и по истечении выдержки времени, определяемой уставкой, поворачивает якорь системы отсечки, который посредством толкателя действует на переключение контактов. При заданном числе оборотов выдержка времени обратно пропорциональна частоте вращения диска. Следовательно, при небольшой кратности тока по отношению к току срабатывания реле выдержка времени обратно пропорциональна квадрату тока, а после насыщения сердечника от тока не зависит. Таким образом, в соответствии с насыщением магнитной системы создаются зависящая и независимая части времятоковой характеристики реле. В качестве примера на рис. 7.4 помещены характеристики реле типов РТ81, РТ83, РТ85.

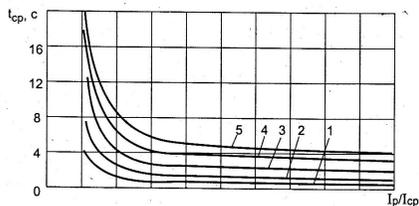


Рис. 7.4. Времятоковые характеристики реле типов РТ81, РТ83, РТ85 с уставками: 1 – 0,5 с; 2 – 1 с; 3 – 2 с; 4 – 3 с; 5 – 4 с.

$I_p$  – ток в обмотке реле;  $I_c$  – ток срабатывания индукционного элемента;  $t_{c.p}$  – время срабатывания индукционного элемента.

Характеристика переходит в независимую часть у реле РТ80 при кратности 8...10, а у реле РТ90 – 3...4.

Выдержка времени устанавливается по шкале времени на щитке реле и определяется начальным положением толкателя. Время на шкале указано для независимой части характеристики. Регулирование тока срабатывания осуществляется ступенчатым изменением числа витков обмотки.

Когда ток в реле превышает уставку отсечки, электромагнитный элемент срабатывает самостоятельно и якорь отсечки притягивается к магнитопроводу сразу, без выдержки времени. Практически время срабатывания электромагнитного элемента изменяется в диапазоне 0,08...0,10 с в зависимости от кратности тока в реле. Ток срабатывания электромагнитного элемента можно регулировать изменением воздушного зазора посредством регулировочного винта отсечки. На нём укреплено кольцо со шкалой, проградуированной в кратностях тока отсечки по отношению к току сраба-

тивания индукционного элемента в пределах 2...8. Если, например, цифра 6 на шкале отсечки совмещена с неподвижной риской, а уставка индукционного элемента 5 А, то уставка отсечки будет 30 А. При необходимости отсечка может быть выведена из работы вывинчиванием регулировочного винта до упора.

После исчезновения тока подвижные части реле (кроме механического указателя срабатывания) возвращаются в исходное положение: рамка – возвратной пружиной, якорь – собственной массой. При этом инерция вращающегося диска служит причиной двух нежелательных явлений: инерционного выбега и замедленного возврата. Инерционный выбег практически не зависит от тока и длится около 40 мс. Время возврата реле при снижении кратности тока от 5 до 0,7 не превышает 0,8 с, потребляемая мощность при токе срабатывания индукционного элемента – не более 10 В·А. Коэффициент возврата индукционного элемента – не менее 0,8.

Существует ряд модификаций реле РТ80. Реле типов РТ81...84 предназначены для работы в цепях постоянного или выпрямленного оперативного тока. Реле РТ81, РТ82 имеют один главный замыкающий контакт, действующий как мгновенно, так и с выдержкой времени. Перестановкой деталей его можно заменить на размыкающий. Реле РТ83, РТ84 имеют, кроме того, замыкающий сигнальный контакт, работающий с выдержкой времени при перегрузках, тогда как главный контакт работает только при КЗ. При напряжении 250 В ток через замыкающие главные контакты реле РТ81(82,83,84) – до 5А (постоянный и переменный), через размыкающие контакты – 2 А переменного или 0,5 А постоянного тока.

Если коммутируемая цепь питается от трансформатора тока и её полное сопротивление при токе 4 А не более 4 Ом, а при токе 50 А не более 1,5 Ом, то контакты способны шунтировать и дешунтировать эту цепь при токе до 50 А. Сигнальные контакты реле РТ83(84,86) могут замыкать и размыкать цепь постоянного тока до 0,2 А и переменного тока до 1 А при напряжении до 250 В.

Реле типов РТ85(86) используются в устройствах защиты на переменном оперативном токе. Их главные контакты усилены и выполняются таким образом, что при срабатывании реле раньше замыкается контакт, подготавливающий цепь электромагнита управления (отключения выключателя или включения короткозамыкателя), а затем размыкается контакт, шунтирующий обмотку электромагнита (рис. 7.5), и последний срабатывает. Эти контакты могут шунтировать и дешунтировать цепь при токе до 150 А, если её полное сопротивление не более 4 Ом при токе 4 А и не более 1,5 Ом при токе 50 А (сопротивление обмотки электромагнита падает с ростом тока из-за насыщения стали сердечника).

Реле серии РТ90 применяются преимущественно для защиты асинхронных двигателей большой мощности с тяжёлым пуском (большая кратность и длительное затухание пусковых токов). Они выполнены на основе реле РТ80, но отличаются от них более ранним переходом временной характеристики в независимую часть. Реле РТ91 снабжены такими же контактами, как РТ81, а РТ95 – усиленными контактами аналогично РТ85, и предназначено для работы на переменном оперативном токе.

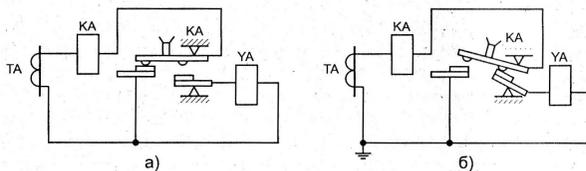


Рис. 7.5. К принципу работы усиленных контактов: а – нормальный режим; б – дешунтирование; ТА – трансформатор тока; КА – катушка реле; YA – электромагнит управления.

Потребляемая мощность реле на любой уставке не более 30 В·А, коэффициент возврата индукционного элемента – не менее 0,8.

### 7.1.6. Реле времени.

Реле типа РВ (ЭВ) содержат в качестве воспринимающего (пускового) органа электромагнит, в качестве замедляющего (органа выдержки времени) – часовой механизм анкерного типа. Исполнительный орган – контактная система, состоящая из следующих элементов: мгновенно действующие контакты; один или два подвижных контакта; перемещающиеся колодки с неподвижными временно замыкающими (проскальзывающими) и основными контактами. Колодка основного контакта отличается наличием упора.

Реле РВ100 предназначены для работы на постоянном оперативном токе напряжением 24, 48, 110 и 220 В и переменном 100...380 В. Модификации различаются набором контактов. Электромагнит имеет стальной цилиндрический ярлык, на верхнем конце которого укреплен рычаг с толкателем, воздействующим на мгновенные контакты. При подаче напряжения на обмотку ярлык втягивается, сжимая возвратную пружину, и освобождает заводной рычаг часового механизма; одновременно переключается мгновенный контакт. Часовой механизм приводит в движение траверсу с подвижными контактами, которые по истечении времени входят в соприкосновение с неподвижными контактами. Выдержка времени зависит от начального положения подвижного контакта относительно неподвижного и регулируется перемещением колодки с неподвижными контактами по окружности шкалы.

Некоторые модификации укомплектованы двумя контактами с выдержкой времени – проскальзывающим и упорным, с независимой регулировкой уставки по времени на каждом из них, причём на проскальзывающем настраивается меньшая, а на упорном – большая из уставок. В отдельных случаях допускается настройка одинаковых уставок, но настроить большую из уставок на проскальзывающем контакте невозможно. Изменение напряжения питания не влияет на работу часового механизма, а следовательно и на выдержку времени. При снятии напряжения ярлык мгновенно возвращается в исходное положение под действием возвратной пружины.

Реле РВ200 конструктивно выполнены аналогично РВ100, но в торце ярлыка запрессовано медное кольцо, играющее роль короткозамкнутой обмотки. Магнитный поток, создаваемый обмоткой, расщепляется на два сдвинутых по фазе потока. Результирующая электромагнитная сила, воздействующая на ярлык, имеет пульсирующий характер, но нулевого значения не достигает. Благодаря этому значительно

снижается вибрация якоря при его втягивании. С якорем связана система рычагов, удерживающая часовой механизм в заведённом положении. При подаче напряжения якорь втягивается, освобождая опорный рычаг, и часовой механизм перемещает контактную траверсу с подвижными контактами.

Часовой механизм некоторых типов реле (РВ215 – РВ245) пускается не при втягивании, а при отпадании якоря электромагнита, когда напряжение с обмотки реле снимается. Конструкция его отличается наличием дополнительного фасонного рычага с пружиной, действие которой противоположно действию более сильной возвратной пружины электромагнита. С помощью пружины фасонного рычага можно в небольших пределах изменять как напряжение втягивания, так и напряжение возврата якоря в исходное положение. При подаче напряжения на катушку якорь втягивается, переключаются мгновенные контакты реле и под действием фасонного рычага возвращается в исходное положение часовой механизм. При исчезновении напряжения рычаг часового механизма освобождается, и заторможенный ранее механизм приходит в действие.

В зависимости от типа реле РВ100, РВ200 выдержка времени устанавливается в пределах от 0,1...1,3 до 2,0...20 с, время замкнутого состояния проскальзывающих контактов составляет соответственно от 0,05... 0,10 до 1,0...1,5 с. Разрывная мощность упорного контакта с выдержкой времени и мгновенных контактов: в цепи переменного тока не более 500 В·А при токе 5 А или напряжении не выше 220 В; в цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой, постоянная времени которой не превышает 5 мс, – не более 100 Вт. Проскальзывающие контакты могут замыкать цепи постоянного или переменного тока с указанной мощностью, а разрывать – соответственно до 100 и 30 Вт; разрыв цепей большей мощности должен осуществляться контактами других реле. Потребление электромагнитов реле ЭВ составляет от 10 до 75 Вт.

Реле РВМ предназначено для работы на переменном оперативном токе. Воспринимающим органом служит синхронный микродвигатель, питающийся от трансформаторов тока защищаемого присоединения через промежуточный насыщающийся трансформатор. Последний ограничивает напряжение на статоре микродвигателя на уровне 10...120 В в широком диапазоне токов. Синхронная частота вращения ротора при питании от сети 50 Гц составляет 500 об/мин. Выдержка времени на замыкание неподвижных контактов устанавливается положением этих контактов. При снижении частоты выдержка времени увеличивается, при повышении – уменьшается; погрешность не более 2% на 1Гц. В исходное положение реле возвращается противодействующей пружиной после снятия с него напряжения.

Реле имеет две группы проскальзывающих контактов и одну – упорных. Каждая группа контактов имеет свою шкалу выдержки времени. Конструкция указателей уставок исключает возможность установки большей выдержки времени на проскальзывающем контакте. Указательная стрелка, расположенная под контактной системой, фиксирует время срабатывания реле при КЗ в сети.

Реле содержит два насыщающихся трансформатора, что позволяет включать одно реле в две фазы токовых цепей защиты. При этом следует иметь в виду, что микродвигатель должен подключаться только к одному из трансформаторов: одновременное подключение микродвигателя к двум фазам недопустимо, так как при замыкании между этими фазами напряжение на нём оказалось бы равным нулю. Переключением

секций первичной обмотки насыщающихся трансформаторов можно изменять уставку по току вдвое.

Выдержка времени реле РВМ составляет 4 с (РВМ12) или 10 с (РВМ13). Время возврата подвижной системы в исходное положение на максимальной уставке достигает соответственно 0,35 и 0,85...0,90 с. Разрывная мощность контактов в цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой, постоянная времени которой не превышает 5 мс, – 100 Вт при токе до 1 А и напряжении не выше 220 В. Длительно допустимый ток замкнутых контактов 5 А. Потребляемая мощность при двойном токе срабатывания не превышает 10 В·А.

Реле времени серии ВС – электромеханические, выпускаются с несколькими независимыми цепями с выдержкой времени от 0,1 с до 60 ч.

Реле времени серии ВЛ комбинированные, они содержат электронную схему и исполнительные электромеханические реле. Устанавливаются в схемах автоматики. Диапазон выдержек времени от 0,1 с до 100 час.

Реле времени серийное РСВ13 отличается тем, что включается непосредственно во вторичную цепь трансформаторов тока; минимальный ток срабатывания от 1 до 5 А.

Реле времени 1РВМ и 2РВМ предназначены для программирования и управления режимом включения / отключения нагрузки в течение суток, с повторяющимся циклом; число коммутируемых цепей 1 и 2, ток 10 и 15 А соответственно.

Реле серии РЭВ-880 в сети постоянного тока 24...220 В обеспечивают выдержки времени от 4,5 до 11 с при закорачивании или отключении катушки.

Выпускаются и пневматические реле времени. Серия РВП-72М (замена РКВ-11) имеет модификации на переменное напряжение 12...600 В, выдержки времени 0,4...180 с; номинальный ток контактов 16 А.

Ранее выпускались реле типов РВ73 постоянного и РВ75 переменного тока. Выполненные на электромагнитном принципе, они отличаются от реле типа ЭВ тем, что имеют привод не соленоидного, а клапанного типа. Контактная группа реле может содержать замыкающий и размыкающий контакты, переключающиеся с установленной выдержкой времени, а также мгновенные контакты. Некоторые модификации имеют вместо мгновенных дополнительные проскальзывающие контакты. Изменение пределов шкалы достигается применением различных передаточных отношений между шестернями часового механизма. При работе на обмотку промежуточного реле нагрузка на контакты не должна превышать: 0,3 А для напряжения 220 В; 0,6 А для напряжения 110 В постоянного тока и 1,5 А для напряжения 220 В переменного тока.

### **7.1.7. Реле промежуточные и указательные.**

Промежуточные реле применяются в различных схемах защиты и автоматики в тех случаях, когда коммутационная способность или количество контактов основных реле недостаточны. Реле работают как на постоянном, так и на переменном токе. В основе конструкции – электромагнит клапанного типа. Электромагнитная сила, действующая на якорь, пропорциональна квадрату магнитного потока в воздушном зазоре или, в конечном счёте, прямо пропорциональна квадрату тока в обмотке и обратно пропорциональна квадрату длины воздушного зазора. Под воздействием электромагнитной силы якорь притягивается к магнитопроводу, преодолевая противо-

действующую силу пружины, а возвращается в исходное положение с помощью возвратной пружины.

После подачи напряжения на обмотку реле ток в ней начинает возрастать, и по достижении им значения тока трогания, когда электромагнитная сила превысит противодействующие силы (пружины, трения в осях и др.), якорь начнет движение в сторону магнитопровода. Время, в течение которого ток в обмотке возрастает от нуля до тока трогания, называется *временем трогания*. Время, прошедшее с момента трогания якоря до момента окончания его движения, называется *временем движения при срабатывании*, а сумма этих двух интервалов составляет *время срабатывания* реле.

После снятия напряжения с обмотки ток в ней спадает и по достижении значения тока возврата якорь отпадает. Длительность этого процесса характеризуется *временем отпускания*, которое зависит, в основном, от задерживающего действия вихревых токов. Перемещение якоря в исходное положение происходит за *время движения при отпадании*, которое зависит от силы нажатия контактов, силы возвратной пружины, массы якоря и от сил трения. Сумма двух последних интервалов составляет *время возврата* реле.

Повышение быстродействия реле достигается совершенствованием конструкции, замедление работы может быть получено как конструктивным, так и схемным путём. С этой целью в конструкцию реле вводится массивная медная гильза или кольца, которые надеваются на полюс электромагнита. Индуцированный в них ток создаёт свой магнитный поток, направленный навстречу основному магнитному потоку при срабатывании реле и согласно с ним – при отключении. В результате изменение суммарного потока замедляется и, как следствие, увеличивается время срабатывания и возврата. С помощью медной гильзы можно получить замедление при срабатывании порядка 0,1...0,3 с, при возврате до 1 с. Схемные решения показаны на рис.7.6. Необходимая выдержка времени промежуточного реле KL создаётся здесь подбором соответствующих значений сопротивления резистора R и ёмкости конденсатора C. Схема на рис.7.6,а обеспечивает определённую выдержку времени при срабатывании и возврате реле, на рис. 7.6,б – замедление при возврате.

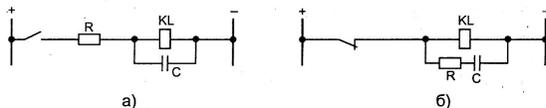


Рис. 7.6. Схемы включения промежуточных реле с замедлением срабатывания и возврата

Реле промежуточные серий РП 23,24 и РП25,26 применяются в качестве вспомогательных в цепях постоянного (РП23,24) и переменного (РП25,26) тока. Реле выпускаются с одним размыкающим и четырьмя замыкающими контактами (1р и 4з). Перестановкой контактных угольников и пластин можно получить и другие комбинации: 2 и 3, 3 и 2, 4 и 1. Коммутационная способность контактов при напряжении до 250 В: в цепи постоянного тока – 100 Вт при токе до 2 А, в цепи переменного тока – 500 В·А при токе до 5 А. Длительно допустимый ток контактов 5А. Потребляемая мощность при номинальном напряжении: для реле постоянного тока – не более 5 Вт,

переменного тока – не более 10 В·А (при притянutom якоре). В реле РП24 и РП26 дополнительно встроен указатель срабатывания с ручным возвратом.

Реле промежуточные серии РП250 применяются в качестве вспомогательных реле постоянного тока, когда требуются:

- выдержка времени при срабатывании (РП251) или отпускании (РП252);

- действие реле от напряжения и удерживание от тока (РП253 и РП255) либо действие от тока и удерживание от напряжения (РП254); эти функции выполняются посредством параллельных и последовательных обмоток. Для создания выдержки времени служит демпферная обмотка, а также медная втулка (шайбы).

Реле типа РП254 работает с выдержкой времени на отключение, а реле РП253 может срабатывать либо с замедлением на включение, либо без него. Контактная система аналогична РП23 – РП26. Выдержка времени при срабатывании для реле РП251 не должна быть более 0,07 с, а с демпферной втулкой – менее 1,1 с. Выдержка времени на отпускание для реле РП252 должна быть не более 0,5 с, а с демпферной втулкой – 1,4 с. Следует иметь в виду, что замедление на срабатывание и возврат реле РП251,252 зависит от напряжения на обмотке, и приведённые значения верны для номинального напряжения.

Реле типа РП253 имеет время срабатывания при разомкнутой демпферной обмотке не более 0,04 с, при замкнутой – не менее 0,07 с. Реле РП254 при номинальном токе в рабочей обмотке имеет выдержку времени при срабатывании не более 0,05 с, а при отпускании – не менее 0,5 с при замкнутой демпферной обмотке. Реле РП255 при номинальном напряжении на рабочей обмотке имеет выдержку времени при срабатывании не более 0,05 с. Мощность, потребляемая обмоткой напряжения, от 3 (РП254) до 15 Вт (РП253), обмоткой тока – от 1 (РП253) до 6 Вт (РП254).

Реле серии РП 256 применяются в качестве вспомогательных в цепях переменного тока в тех случаях, когда коммутационная способность и количество контактов основных реле защиты недостаточны и требуется создание выдержки времени при снятии напряжения с обмотки реле. Присоединение обмотки реле к сети переменного тока производится через встроенный выпрямитель. Характеристики контактной системы те же, что и приведённые выше. Мощность, потребляемая цепью обмотки реле при номинальном напряжении, составляет 8 В·А. Выдержка времени на отпускание регулируется воздушным зазором между якорем и магнитопроводом и не должна быть больше 0,5 с (наименьшее значение); меньше 1,1 и больше 1,4 с (наибольшее значение).

Реле серии РП 210 являются быстродействующими. Для уменьшения постоянной времени цепи рабочей обмотки последовательно с ней введён добавочный резистор. При снятии напряжения в реле типов РП213, 214 якорь удерживается в притянutom положении при наличии тока в любой из удерживающих обмоток, а в реле РП211,212,215, которые токовых обмоток не имеют, подвижная система возвращается в исходное положение. Время срабатывания реле при подаче номинального напряжения не более 10 мс. Разрывная мощность контактов – не более 50 Вт при токе до 2 А или напряжении до 220 В. Допустимый ток контактов – 10 А в течение 10 с.

Реле типов РП 321 и РП 341 предназначены для непосредственного включения во вторичную цепь трансформаторов тока. Обмотка реле включается в цепь через встроенный насыщающийся трансформатор тока с двухсекционной первичной обмоткой. Реле имеют две уставки по току, определяемые последовательным (2,5 А)

или параллельным (5 А) соединением секций. Допускается длительное протекание по первичной обмотке НТТ тока 10 А (при параллельном соединении секций) и в течение 4 с тока 150 А. Потребление реле при токе, равном двойному току срабатывания, не более 6 В·А, время срабатывания – не более 0,05 с.

Контакты нормальной мощности способны разрывать переменный ток до 2 А при напряжении до 220 В, замыкать цепь тока до 15 А и длительно пропускать ток до 5 А. Реле РП341 снабжено усиленными контактами, которые способны шунтировать и дешунтировать отключающие катушки выключателей при переменном токе до 150 А.

Реле типа РП311 применяются в схемах защиты и автоматики на переменном оперативном токе напряжением 100, 127 и 220 В. Контактная система реле такая же, как и у реле РП321. Реле четко срабатывает при напряжении 70% номинального и отпадает при снижении его до значения не менее 3% номинального напряжения. Мощность, потребляемая обмоткой при номинальном напряжении и притянтом якоре, не превышает 6 В·А.

Реле типа РП 361 включаются во вторичную цепь трансформаторов тока. Реле имеет два замыкающих контакта обычной конструкции и один контакт повышенной мощности, переключающийся без разрыва цепи. Замыкающие контакты коммутируют цепь переменного тока мощностью до 450 В·А при токе до 2 А и напряжении до 250 В или цепь постоянного тока мощностью до 50 Вт при токе не более 1 А и напряжении до 250 В и допускают длительное протекание тока до 5 А. Контакт повышенной мощности способен шунтировать и дешунтировать отключающую катушку выключателя при переменном токе до 150 А.

Обмотка реле включается в цепь через встроенный насыщающийся трансформатор. Реле имеет две уставки по току – 2,5 и 5 А и допускает длительное протекание по первичной обмотке НТТ тока 10 А, а в течение 4 с – тока до 150 А. Потребляемая мощность при двукратном токе срабатывания не более 10 В·А.

Реле типа РП 362 имеет аналогичные данные, но предназначено для работы в цепях постоянного тока напряжением 110 и 220 В. Потребляемая мощность при номинальном напряжении не более 10 Вт.

Реле типов РП 351, РП 352 – двухпозиционные, применяются в цепях переменного (РП351) и постоянного (РП352) тока. Реле имеют две магнитные системы, скрепленные скобой, на которой расположен вращающийся якорь. В верхней части якоря имеется толкатель, переключающий контакты при притягивании якоря к той или иной магнитной системе. Положение якоря фиксируется пружиной. Последовательно с обмотками реле включены блок-контакты. При подаче напряжения на обмотку, контакты в цепи которой замкнуты, якорь реле перебрасывается. После прохождения им нейтрального положения контакты в цепи работающей обмотки размыкаются, а в цепи другой – замыкаются, подготавливая тем самым работу реле в другом направлении.

Время срабатывания реле при номинальном напряжении не более 0,06 с, мощность контактов: на размыкание (разрывная) – 50 Вт при токе до 2 А или напряжении до 220 В, на замыкание – 500 Вт при токе до 5 А или напряжении до 220 В.

Реле РП 8 (9,11,12) – двухпозиционные. Срабатывание реле происходит в результате взаимодействия двух магнитных потоков – поляризующего и управляющего, первый из которых создается постоянными магнитами, второй – током в обмотках реле. В зависимости от полярности этого тока изменяется направление управляюще-

го потока и соответственно направление срабатывания реле. Обмотки реле, в цепь которых введены размыкающие контакты, включаются только на время срабатывания реле (0,06 с). Контакты реле способны коммутировать мощность переменного тока 450 В·А при коэффициенте мощности не менее 0,5 и токе до 2 А или постоянно – 50 Вт при токе не более 2 А. Длительно допустимый ток через замкнутые контакты 5 А.

Ранее в схемах управления и автоматики находили широкое применение много-контактные промежуточные реле типа МКУ 48. Реле предназначены для работы в цепях постоянного и переменного тока напряжением до 220 В. Потребляемая мощность реле постоянного тока составляет не более 3 Вт, переменного тока – не более 7,5 В·А (при притянтом якоре). Разрывная мощность контактов при напряжении до 220 В – в цепи постоянного тока 50 Вт, в цепи переменного тока 500 В·А. Длительно допускаемый ток через контакты не должен превышать 5 А. Время срабатывания реле с 8-ю контактными пружинами не превышает 0,035 с и 0,06 – с 16-ю.

В качестве промежуточных часто используются герконовые реле. Главным узлом реле являются магнитоуправляемые контакты (МК), которые замыкаются или размыкаются под воздействием магнитного поля. МК в герметизированном баллоне с защитным газом называется *герконом*. Получили распространение язычковые МК, выполненные в виде изгибающихся пластинок или стержней. Длина баллона с выводами составляет от 20 до 80 мм.

Применяются реле на замыкающих герконах типов МК, МУК, МКА, КЭМ-2, переключающие КЭМ-3: максимальные коммутируемые ток от 0,01 до 1 А, напряжение от 30 до 5000 В, время срабатывания от 0,8 до 3 мс, время отпускания от 0,3 до 3,5 мс. Реле серии РЭС строятся на одном или двух реле КЭМ-2 или на трех реле КЭМ-3, время срабатывания 1/0,3 мс. Реле серии РПГ предназначены для коммутации цепей с активной или малоиндуктивной нагрузкой

*Реле указательные* (сигнальные) типа РУ21 (ранее ЭС21, ЭС91,92) применяются для визуальной сигнализации о действии устройств РЗА, как правило, в цепях постоянного тока. Реле («блинкер») – электромагнитной системы клапанного типа, с последовательной или параллельной обмоткой, реагирует соответственно на появление тока или напряжения в цепи. Якорь реле, притягиваясь, освобождает флажок, который поворачивается («выпадает») и становится видимым в смотровом окошке на передней стенке кожуха. Одновременно с флажком поворачивается валик с подвижными контактами до замыкания их с неподвижными или размыкания. Реле РУ21 выпускаются с двумя замыкающими контактами, РУ21-1 снабжены дополнительным контактом с самовозвратом. Перестановкой контактных мостиков можно получить различные комбинации контактов. Флажок и основные контакты остаются в положении срабатывания и после прекращения тока в обмотке, возврат же их производится вручную. Реле можно использовать и на переменном токе, но с учётом того, что напряжение срабатывания будет примерно вдвое выше, чем на постоянном токе.

Реле выпускаются на номинальный ток (срабатывания) от 0,006 до 4 А, причём длительно допускаются втрое большие значения, и номинальные напряжения постоянного тока 24, 48, 110 и 220 В. Разрывная мощность контактов в цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой 50 Вт, в цепи переменного тока – 250 В·А, при напряжении до 250 В и токе до 2 А. Потребляемая мощность токовых реле не более 0,25 Вт, реле напряжения – не более 2,75 Вт.

Указательные реле типа РЭУ выпускаются на постоянное напряжение от 24 до 220 В, переменное (50 Гц) от 110 до 380 В, контакт с самовозвратом имеют только реле постоянного тока.

Следует заметить, что в настоящее время предлагается широкий выбор электро-механических промежуточных реле, отличающихся повышенными эксплуатационными и массогабаритными показателями. Так, например, итальянская фирма FINDER выпускает миниатюрные реле высотой 15 мм и толщиной всего 5 мм, с самозачищающимися контактами, с током коммутации 6 А, снабжённые тест-кнопкой, индикаторами подачи напряжения и срабатывания контактов. Благодаря надёжной конструкции и самозачищению контактов обеспечивается чрезвычайно большой срок службы различных групп реле (до  $5 \cdot 10^7$  циклов переключений).

## 7.2. Реле дифференциальных, направленных и фильтровых защит.

### 7.2.1. Реле дифференциальных защит серий РНТ и ДЗТ10.

На подстанциях реле этих серий используются в схемах дифференциальных защит трансформаторов, электродвигателей, реакторов, сборных шин, с получением тормозных характеристик от одной или нескольких групп трансформаторов тока. Реле серии ДЗТ10 применяются в тех случаях, когда отстройка от периодической составляющей токов небаланса при внешних КЗ приводит к недопустимому заглублению дифференциальной защиты с реле РНТ.

#### 7.2.1.1. Реле РНТ.

Основными элементами реле являются промежуточный насыщающийся трансформатор (НТТ) и исполнительный орган – реле типа РТ40 или ЭТ 521. НТТ обеспечивает отстройку реле от токов небаланса при переходных процессах и одновременно – компенсацию неравенства вторичных токов в плечах дифференциальной защиты (ДЗ). Трансформатор имеет трёхстержневой сердечник (рис. 7.7).

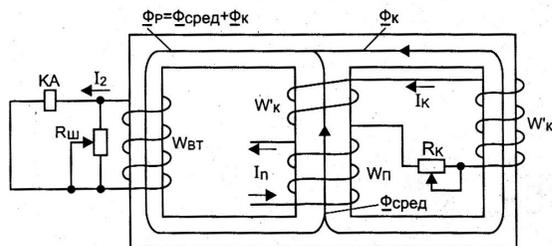


Рис. 7.7. К принципу устройства реле РНТ:  $w_п$  – первичные обмотки;  $w_{вт}$  – вторичная обмотка;  $w_k^1$ ,  $w_k$  – короткозамкнутая обмотка;  $R_k$ ,  $R_{ш}$  – регулируемые резисторы;  $KA$  – обмотка исполнительного реле

При повреждении в зоне действия ДЗ ток  $I_п$  в первичной обмотке быстро становится синусоидальным и трансформируется в часть  $w_k^1$  короткозамкнутой обмотки, в цепи которой возникает ток  $I_k$ . Магнитные потоки среднего  $\Phi_{сред}$  и правого  $\Phi_k$  стержней суммируются, и результирующий поток  $\Phi_p$  вызывает ток  $I_2$  в реле  $KA$ . При сра-

батывании реле магнитная индукция в левом стержне составляет порядка 1,1...1,2 Тл, а в среднем и правом стержнях – около 0,4 Тл.

При внешних КЗ аperiodическая составляющая затухает длительно и почти не трансформируется. В этом режиме наличие её, аналогично постоянному току, приводит к насыщению магнитопровода и, следовательно, ухудшению трансформации периодической составляющей тока и увеличению тока срабатывания (загрублению) реле. Улучшается также отстройка защиты от неустановившихся токов в неаварийных режимах (включение трансформатора под напряжение и др.).

Загрублению способствует и влияние короткозамкнутой обмотки, которое зависит от соотношения её активного и реактивного сопротивлений. На отпайках с малым числом витков преобладает активное сопротивление короткозамкнутой цепи, с большим числом витков – реактивное (индуктивное сопротивление обмоток). С ростом насыщения стали индуктивное сопротивление уменьшается, соответственно возрастают ток и размагничивающее действие короткозамкнутой обмотки и степень загрубления реле. Если число витков не регулируется (РНТ565, 566, 567), изменение соотношения активного и реактивного сопротивлений и, следовательно, степени загрубления реле достигается посредством резистора  $R_K$ ; наибольшая степень отстройки будет при сопротивлении  $R_K = 0$ .

Таким образом, при наличии в первичном токе аperiodической составляющей происходит автоматическое загрубление реле из-за насыщения сердечника НТТ и влияния короткозамкнутой обмотки. Недостатком такого способа отстройки является замедление работы защиты при КЗ в зоне. В этом случае реле как бы «выжидает», пока аperiodическая составляющая тока КЗ не снизится.

Поведение реле РНТ в схемах ДЗ в переходных режимах с аperiodической составляющей тока принято оценивать по характеристикам зависимости относительного тока срабатывания реле  $I_{ср.о} = I_{ср.а} / I_{ср}$  от коэффициента смещения  $\kappa_{см} = I_a / I_{ср.а}$ :  $I_{ср.о} = f(\kappa_{см})$ , где  $I_{ср.а}$  – периодическая составляющая тока срабатывания при наличии аperiodической составляющей;  $I_{ср}$  – ток срабатывания реле при отсутствии аperiodической составляющей (действующее значение синусоидального тока);  $I_a$  – аperiodическая (или постоянная) составляющая тока в реле (рис. 7.8).

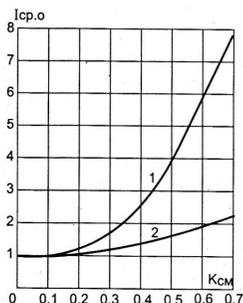


Рис. 7.8. Характеристики зависимости относительного тока срабатывания реле РНТ от коэффициента смещения  $\kappa_{см}$  при различных значениях сопротивления  $R_K$ : 1)  $R_K = 0$ ; 2)  $R_K = 10 \text{ Ом}$ .

Коэффициент  $k_{см}$  характеризует смещение кривой тока заданной формы относительно оси времени и может изменяться в пределах от 0 при отсутствии апериодической составляющей до 1,41 при максимально возможном её значении, равном амплитуде синусоидальной составляющей тока. Относительный ток срабатывания при отсутствии апериодической составляющей равен 1.

Первичная обмотка  $w_n$  состоит из рабочих (дифференциальных) и уравнильных обмоток. Рабочие обмотки включаются в дифференциальную цепь защиты на разность токов плеч, а уравнильные используются для компенсации неравенства МДС, обусловленных токами плеч защиты. В схеме защиты двухобмоточного трансформатора достаточно использовать одну уравнильную обмотку. Как правило, к рабочей обмотке подключают цепи трансформаторов тока той стороны, где вторичный ток больше. Число витков и полярность обмоток выбираются с тем условием, чтобы при внешнем КЗ или в рабочем режиме ток в исполнительном реле отсутствовал, для чего результирующий магнитный поток должен быть равен нулю. При повреждении в защищаемой зоне магнитные потоки, обусловленные МДС первичных обмоток, суммируются и обеспечивают надёжное срабатывание реле. МДС срабатывания определяется как произведение тока срабатывания на число включённых витков первичной обмотки и должна быть равна  $100 \pm 5$  Ав (РНТ565, 566) или  $60 \pm 4$  Ав (РНТ562, 563).

Разрывная мощность контактов реле в цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой (постоянная времени не более 5 мс) равна 60 Вт при напряжении до 250 В или токе до 2 А. Время действия реле при первичном токе, равном трёхкратному току срабатывания, не превышает 0,04 с, при двухкратном токе – 0,05 с.

#### **7.2.1.2. Реле РНТМ.**

Повышенную чувствительность дифференциальных токовых защит к внутренним КЗ обеспечивает реле РНТМ – модернизированный вариант реле РНТ. Это реле позволяет установить ток срабатывания ДЗ порядка 0,3...0,5 номинального тока защищаемого присоединения, тогда как с помощью реле РНТ достигается уставка 1,3...1,7. При искажении формы тока в переходных режимах специальное полупроводниковое устройство автоматически увеличивает ток срабатывания реле путём шунтирования обмотки исполнительного органа КА регулируемым резистором. При внутренних КЗ, когда ток близок к синусоидальному, устройство не срабатывает и реле не загроубляется. Таким устройством в автономном исполнении может быть дополнена и защита с реле РНТ, находящимися в эксплуатации.

В дифференциальных защитах некоторых видов оборудования, как, например, трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН), при внешних КЗ возможно протекание значительных синусоидальных токов небаланса, на которые данное устройство не реагирует. Для предотвращения излишнего срабатывания ДЗ в этом случае в устройство введён так наз. канал загроубления по току плеча защиты, который при превышении максимального значения тока нагрузки защищаемого объекта выдаёт команду на включение шунтирующего резистора.

#### **7.2.1.3. Реле ДЗТ.**

Реле позволяет уменьшить ток срабатывания и повысить чувствительность защиты при внешних КЗ, обеспечив отстройку от токов небаланса за счёт магнитного торможения. Реле ДЗТ10 аналогично по устройству и параметрам реле РНТ, но имеет на

крайних стержнях магнитопровода катушки тормозной и вторичной обмоток с равным количеством витков. Тормозная обмотка включается в одно из плеч дифференциальной защиты. Наличие ответвлений тормозной обмотки позволяет ступенчато регулировать степень отстройки от токов небаланса, которая будет наибольшей при включении всех витков обмотки.

Ток в тормозной обмотке создаёт магнитный поток, подмагничивающий крайние стержни магнитопровода, благодаря чему ухудшаются условия трансформации между первичной и вторичной обмотками и ток срабатывания исполнительного реле автоматически возрастает – реле загрубляется (тормозится). Зависимость МДС срабатывания  $F_{cp}$  от МДС тормозной обмотки  $F_T$  показана на рис. 7.9 в виде тормозных характеристик. Торможение наиболее эффективно при угле сдвига фаз между токами тормозной и рабочей обмоток в диапазоне  $0 \pm 30^\circ$ , наименее эффективно – в диапазоне  $90 \pm 30^\circ$ . Поведение защиты оценивается *коэффициентом торможения*  $k_T = I_{cp}/I_T = F_{cp}w_T / F_T w_p$ , где  $w_T$ ,  $w_p$  – числа витков тормозной и рабочих (первичных) обмоток.

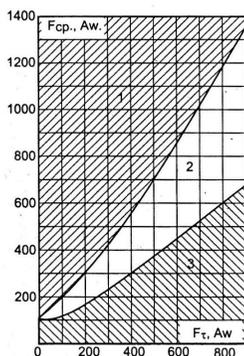


Рис.7.9. Тормозные характеристики реле серии ДЗТ10: 1 – зона срабатывания; 2 – зона срабатывания или торможения в зависимости от угла между векторами тормозного и рабочего токов; 3 – зона торможения;  $F_{cp}$  – МДС срабатывания, определенная по характеристике безусловного торможения;  $F_T$  – МДС торможения.

При отсутствии торможения и нормальной (заводской) затяжке пружин исполнительного реле МДС, необходимая для его срабатывания, должна быть  $F_{cp} = 100 \leq 5 \text{ Ав}$ . Установить необходимое значение тока срабатывания без изменения затяжки пружины можно посредством шунтирующего резистора  $R_{ш}$ .

У реле серий РНТ и ДЗТ10 вследствие нелинейности кривой намагничивания стали отсутствует прямая пропорциональность между током  $I_1$  первичной цепи НТТ и вторичным током  $I_2$  в исполнительном органе. В связи с этим качество настройки исполнительного органа и исправность НТТ реле косвенно характеризуют *коэффициентом надёжности*, который определяется как отношение вторичного тока  $I_{2(k)}$  к току срабатывания реле  $I_{2cp}$  при заданной кратности  $K$  первичного тока  $I_{1(k)}$  по отношению к тому его минимальному значению  $I_{1cp}$ , при котором реле срабатывает:  $K =$

$I_{1(k)}/I_{1cp}$ . Обычно принимают два значения  $K = 2$  и  $K = 5$  и рассматривают соответственно два значения коэффициента надёжности  $K_{н2} = I_{2(2)} / I_{2cp}$  и  $K_{н5} = I_{2(5)} / I_{2cp}$ , т.е. при токах  $2I_{1cp}$  и  $5I_{1cp}$ . У исправных реле коэффициенты надёжности должны быть в пределах  $K_{н2} = 1,2 \dots 1,3$  и  $K_{н5} = 1,35 \dots 1,5$ . Заниженное значение коэффициента надёжности свидетельствует о быстром насыщении НТТ и снижении надёжности работы реле при повреждении в защищаемой зоне, а завышенное – о низком значении индукции в НТТ, т.е. об ухудшенной отстройке от бросков тока.

## 7.2.2. Реле направления мощности.

### 7.2.2.1. Назначение и устройство.

Реле направления мощности применяют в схемах РЗиА, когда требуется определять направление (знак) активной или реактивной мощности. Различные модификации реле реагируют на токи и напряжения прямой, обратной или нулевой последовательности.

Устройство реле основано на индукционном принципе (рис. 7.10). Оно состоит из замкнутого стального магнитопровода 1 с четырьмя выступающими внутрь полюсами и двумя секционированными обмотками, к одной из которых (*поляризующей*) подводится напряжение (поляризация по напряжению) или ток (поляризация по току), к другой – ток (токовая обмотка). Токовая обмотка 2 расположена на противоположных полюсах 3 и 4 и создаёт магнитный поток  $\Phi_T$ . Поляризующая обмотка 5 (обмотка напряжения) расположена на ярме и создаёт магнитный поток  $\Phi_H$ , проходящий через полюсы 6 и 7 и сдвинутый в пространстве относительно потока  $\Phi_H$  на угол  $90^\circ$ .

Между полюсами расположены неподвижный стальной сердечник 8, служащий для уменьшения воздушного зазора между полюсами, и ротор 9 (барабанчик с алюминиевыми стенками), на оси которого укреплен подвижный контактный мостик. Контакты реле замыкаются при его срабатывании и размыкаются при возврате подвижной системы в исходное положение под действием противодействующей пружины. В зависимости от назначения реле могут иметь один или два контакта (реле одностороннего или двустороннего действия).

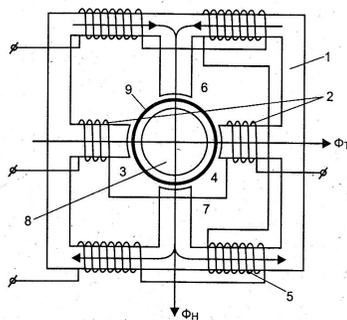


Рис. 7.10. Устройство индукционного реле направления мощности

Взаимодействие магнитных потоков  $\Phi_T$  и  $\Phi_H$  с индуцированными токами в стенках ротора создаёт на нём вращающий момент

$$M = k_{\phi} \Phi_T \Phi_H \sin \psi,$$

где  $\psi$  – угол фазного сдвига между потоками  $\Phi_T$  и  $\Phi_H$ .

Считая, что у реле с поляризацией по напряжению магнитные потоки  $\Phi_T$  и  $\Phi_H$  пропорциональны соответственно току и напряжению, подведённым к реле, получим:

$$M = k U_P I_P \sin (\gamma_H - \varphi_P),$$

где  $\gamma_H$  – фазный угол между напряжением  $U_P$  и током  $I_H$  (внутренний угол реле), определяемый соотношением активного и реактивного сопротивлений цепи напряжения реле;  $\varphi_P$  – фазный угол между напряжением  $U_P$  и током  $I_P$  (рис. 7.11), определяемый параметрами сети и схемой включения реле.

Если цепь напряжения реле выполнить так, чтобы её активное сопротивление было много меньше реактивного и принять, что угол  $\gamma_H = 90^\circ$ , то вращающий момент будет пропорционален активной мощности  $P_P$  на зажимах реле:

$$M = k U_P I_P \cos \varphi_P = k P_P.$$

Такие реле, реагирующие на активную мощность, называют *реле активной мощности*, или *косинусными*.

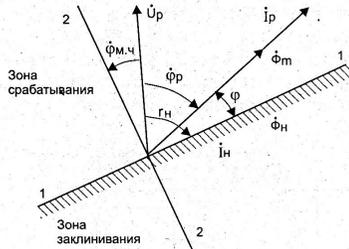


Рис.7.11. Векторная диаграмма индукционного реле мощности с поляризацией по напряжению

Если же, наоборот, активное сопротивление цепи напряжения намного превышает реактивное и угол  $\gamma_H = 0$ , то можно получить *реле реактивной мощности* ( $Q_P$ ), или *синусное*, вращающий момент которого будет пропорционален реактивной мощности:

$$M = k U_P I_P \sin \varphi_P = k Q_P.$$

Наибольшее распространение в схемах РЗИА имеют *реле смешанного типа*. В общем случае вращающий момент достигает максимального значения, когда

$$\sin \psi = 1, \text{ т.е. } \psi = 90^0 \text{ или } \varphi_p = 90^0 - \gamma_n.$$

Знак минус показывает, что угол  $\varphi_p$  откладывается в сторону, противоположную направлению отсчёта угла  $\gamma_n$ . Значение угла  $\varphi_p$ , при котором вращающий момент получается максимальным, называют *углом максимальной чувствительности* и обозначают  $\varphi_{\text{м.ч}}$  или  $-\varphi_p$ :

$$\varphi_{\text{м.ч}} = \gamma_n - 90^0.$$

Угол  $\varphi_{\text{м.ч}}$  задаётся в каталогах и справочных документах, причём знак «+» соответствует отставанию вектора тока от вектора напряжения, а знак «-» – опережению.

С другой стороны, вращающий момент становится равным нулю, когда  $\sin \psi = 0$ , т.е.  $\psi = 0$  или  $\psi = 180^0$ , а значит  $\psi_p = \gamma_n$  или  $-\varphi_p = 180^0 - \gamma_n$ . Линия 1 – 1, расположенная под этими углами к вектору напряжения  $U_p$ , называется *линией нулевых моментов*, или *линией изменения знака момента*, а перпендикулярная ей линия 2 – 2, проведённая через начало координат и составляющая угол  $\varphi_{\text{м.ч}}$  с напряжением  $U_p$ , – *линией максимальных моментов*. Когда вектор тока  $I_p$  совпадает с линией 2 – 2, момент на реле будет максимальным. Расположение контактов и полярность обмоток подобраны так, что максимальный момент на замыкание контактов обеспечивается тогда, когда ток  $I_p$  (и поток  $\Phi_T$ ) опережает ток  $I_n$  (и поток  $\Phi_n$ ) на  $90^0$ , т.е. когда вектор тока  $I_p$  опережает вектор  $U_p$  на угол  $\varphi_{\text{м.ч}}$ . Область выше линии 1 – 1, где момент имеет положительное значение, называется *зоной срабатывания реле*. При переходе вектора  $I_p$  за линию 1 – 1 знак вращающего момента изменится на обратный и момент будет направлен не на замыкание контактов, а в противоположную сторону, и потому область ниже линии 1 – 1 называется *зоной заклинивания*. Таким образом, реле реагирует не только на абсолютное значение мощности, но и на её направление.

Реле направления мощности имеют две основные характеристики:

– *Характеристика чувствительности*. Чувствительность реле характеризуется мощностью, при которой оно срабатывает,  $S_{\text{ср}} = U_{\text{ср}} I_p$ . Принято оценивать чувствительность посредством вольт – амперной характеристики, которая представляет собой кривую зависимости напряжения срабатывания  $U_{\text{ср}}$  от тока  $I_p$ . Зависимость  $U_{\text{ср}}$  ( $I_p$ ) снимается при неизменном значении угла фазного сдвига между током и напряжением, равном углу максимальной чувствительности реле:  $\varphi_p = \varphi_{\text{м.ч}}$

– *Угловая характеристика* отражает зависимость мощности  $S_{\text{ср}}$  или напряжения  $U_{\text{ср}}$  срабатывания реле от угла  $\varphi_p$  при неизменном значении тока  $I_p = \text{const}$  и определяет зоны работы и заклинивания реле. Обычно используется упрощённая угловая характеристика, как на рис. 7.11, где минимальная мощность срабатывания реле предполагается равной нулю. Анализ поведения реле ведётся на основании выражения для вращающего момента, в которое введён угол максимальной чувствительности  $\varphi_{\text{м.ч}}$  вместо внутреннего угла  $\gamma_n = \varphi_{\text{м.ч}} + 90^0$ :

$$M = k U I \cos (\varphi_p - \varphi_{м.ч}).$$

Отечественной промышленностью выпускаются реле направления мощности трёх основных типов (вместо ИМБ):

1) Реле типа РБМ171 одностороннего и РБМ 271 двустороннего действия. В зависимости от сопоставления, введённого в цепь напряжения, угол максимальной чувствительности составляет  $\varphi_{м.ч} = -30^0$  ( $-25^0$ ) или  $\varphi_{м.ч} = 60^0$  и, стало быть, момент вращения будет

$$M = k U_p I_p \cos (\varphi_p + 30^0) \text{ или}$$

$$M = k U_p I_p \cos (\varphi_p + 60^0).$$

Эти реле используются в комплектах защит от междуфазных КЗ.

2) Реле типа РБМ 177, 178 одностороннего и РБМ 277, 278 двустороннего действия. Реле РБМ 178 (278) отличаются более высокой чувствительностью и не могут длительно находиться под номинальным напряжением. В цепь обмотки напряжения этих реле, кроме резистора, введён конденсатор, так что ток в цепи имеет ёмкостный характер, угол  $\gamma_n = -20^0$ , а угол  $\varphi_{м.ч} = 70^0$  и вращающий момент

$$M = k U_p I_p \sin (\varphi_p + 20^0).$$

Реле этого типа используются в защитах от замыканий на землю, в схемах автоматики.

В защитах от замыканий на землю к реле подводится ток и напряжение нулевой последовательности (поляризация по напряжению) или токи нулевой последовательности (токовая поляризация) в зоне действия защиты и вне её.

Реле РБМ характеризуются следующими параметрами: номинальное рабочее напряжение – 100 В; мощность, потребляемая токовыми цепями при номинальном токе, – не более 10 В·А, цепями напряжения – 40 В·А; разрывная мощность контактов в цепи постоянного тока 60 Вт при напряжении до 250 В и токе до 2 А.

3) Реле типа РМОП, которые реагируют на направление мощности обратной последовательности и включаются на выход фильтров тока и напряжения обратной последовательности в схемах защит от несимметричных КЗ.

Пределы изменения уставок срабатывания пускового органа (реле РТ) по току обратной последовательности составляют 1...4 А при номинальном токе 5 А и 0, 2 ...0,8 А при номинальном токе 1 А. Потребляемая мощность при номинальных значениях тока не превышает 6 В·А, в цепях напряжения – 15 В·А на фазу. Разрывная мощность контакта реле в цепях постоянного тока составляет 50 Вт при напряжении до 220 В и токе до 2 А.

Существенным недостатком индукционных реле мощности является возможность появления самохода. Самоходом называется перемещение подвижной системы реле при питании только одной из обмоток, когда основной вращающий момент отсутствует. Различают самоход от тока (например, при обрывах цепи напряжения) и самоход от напряжения (например, при отсутствии тока в защищаемой линии). Причиной возникновения дополнительного вращающего момента является несимметрия маг-

нитной системы реле. В идеальном случае, когда сердечник реле расположен точно в центре и воздушный зазор между ним и полюсами одинаков на всём своём протяжении, самоход отсутствует.

Направление действия дополнительного момента, вызывающего самоход, возможно как в сторону замыкания контактов, так и размыкания их. В первом случае самоход может привести к неселективному действию защиты (например, при близком расположении места КЗ на смежном участке, когда напряжение  $U_p \approx 0$ ), во втором – к отказу в действии защиты вследствие загробления реле. Самоход должен быть устранён или сведён к минимуму.

### 7.2.3. Фильтр – реле напряжения и тока обратной последовательности.

Фильтр – реле состоит из собственно фильтра напряжения или тока обратной последовательности и реагирующего элемента, присоединённого к выходным зажимам фильтра. Для фильтра напряжений обратной последовательности (ФНОП) справедливо выражение

$$U_{\text{вых. х}} = m_u U_{\text{вх.2}},$$

где  $U_{\text{вых. х}}$  – напряжение холостого хода на выходе фильтра;  $U_{\text{вх.2}}$  – составляющая обратной последовательности напряжений, подведённых к входным зажимам фильтра;  $m_u$  – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом холостого хода.

Для фильтра токов обратной последовательности (ФТОП) аналогично

$$I_{\text{вых.к}} = m_i I_{\text{вх.2}},$$

где  $I_{\text{вых.к}}$  – ток на выходе фильтра в режиме КЗ (выходные зажимы замкнуты накоротко);  $I_{\text{вх.2}}$  – составляющая обратной последовательности токов, подведённых к входным зажимам фильтра;  $m_i$  – коэффициент пропорциональности. Следует отметить, что все величины, входящие в эти выражения, – векторные, не исключая и коэффициент пропорциональности; индекс «2» обозначает, как принято, составляющую обратной последовательности.

#### 7.2.3.1. Фильтр – реле напряжения обратной последовательности типа РНФ –1М.

Используется в схемах РЗА в качестве органа, реагирующего на напряжение обратной последовательности при возникновении несимметричного КЗ и в начальный момент времени при трёхфазном КЗ. На рис. 7.12 представлена схема фильтр – реле типа РНФ 1М.

В устройстве использован двуплечий активно – ёмкостный фильтр. Значения сопротивлений плеч выбраны в соотношении

$$R_1 = \sqrt{3} x_{C1}; x_{C2} = \sqrt{3} R_2,$$

так что при подведении к зажимам 2–4–6 системы напряжений прямой последовательности ток  $I_{\text{ав}}$  в плече 2–4 опережает напряжение  $U_{\text{ав}}$  на угол  $30^\circ$ , а ток в плече 4–6 опережает напряжение  $U_{\text{вс}}$  на угол  $60^\circ$ . В результате падения напряжения на резисто-

ре R1 и конденсаторе C2 равны по значению и противоположны по направлению, а разность потенциалов между точками M и N равна нулю.

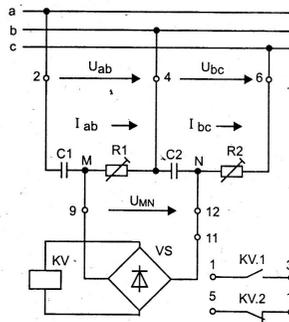


Рис. 7.12. Фильтр – реле напряжения обратной последовательности

При подаче на вход фильтра напряжений обратной последовательности векторы токов и напряжений в плечах располагаются таким образом, что сумма падений напряжения на резисторе  $R_1$  и конденсаторе  $C_2$  становится значительной: выходное напряжение на зажимах MN в 1,5 раза превышает междуфазное входное напряжение. Напряжение нулевой последовательности, как известно, имеет одинаковое значение и направление во всех фазах. Следовательно, будут иметь одинаковый потенциал и выходные зажимы фильтра, а напряжение на его выходе будет равно нулю. Таким образом, ФНОП выделяет напряжения обратной последовательности из полного входного напряжения, не пропуская напряжения другой последовательности.

Полученные выше выводы справедливы лишь в идеальном случае, когда система входных синусоидальных напряжений симметрична, сопротивления и ёмкости точно соответствуют расчётным значениям и фильтр работает в режиме холостого хода (накладка 11 – 12 на рис. 7.12 снята). Практически, однако, и при отсутствии составляющей обратной последовательности напряжение на выходе фильтра отличается от нуля. Это *напряжение небаланса* обусловлено отклонением параметров фильтра от расчётных значений и высшими гармоническими во входном напряжении. Наличие напряжения небаланса ограничивает применение чувствительных реле на выходе фильтра: реле может сработать в нормальном режиме, если напряжение небаланса больше его напряжения срабатывания, или не вернуться в исходное положение при исчезновении несимметрии в сети, если напряжение небаланса больше напряжения возврата реле.

При подключении к фильтру нагрузки (например, реле) выходное напряжение его несколько уменьшается по значению (до 1,1 вместо 1,5 по отношению к линейному входному) и сдвигается по фазе. Максимальная отдача мощности от фильтра достигается, когда сопротивление нагрузки равно сопротивлению короткого замыкания фильтра, измеренному со стороны выходных зажимов при закороченных входных зажимах. Промышленность, как правило, выпускает комплектные устройства, в которые входят фильтр и специальное реле, обеспечивающее получение от фильтра наибольшей мощности.

### 7.2.3.2. Фильтр – реле тока обратной последовательности.

Фильтр – реле типа РТФ2. По принципу действия фильтр аналогичен рассмотренному выше ФНОП. К цепочке (рис. 7.13), состоящей из регулируемых резисторов  $R_1$  и  $R_2$  и конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , через промежуточные трансформаторы тока  $TA_1$  и  $TA_2$  подводится разность (векторная) токов  $I_A - I_B$  и  $I_C - I_A$ . Применение промежуточных понижающих трансформаторов позволяет уменьшить ёмкость конденсаторов фильтра и исключить токи нулевой последовательности: поскольку эти токи во всех фазах одинаковы, разность токов двух фаз будет равна нулю.

Значения активных сопротивлений и ёмкостей выбраны из соотношений

$$X_{C1} = \sqrt{3} R_1 \text{ и } R_2 = \sqrt{3} X_{C2}.$$

Если при этом фильтр не нагружен (зажимы MN закорочены) и на вход его подана система токов прямой последовательности, в нём ток  $I_{R1}$  отстаёт от тока  $I_A - I_B$  на  $30^\circ$ , а ток  $I_{C2}$  опережает на  $30^\circ$  ток  $I_C - I_A$  и оказывается в противофазе с током  $I_{R1}$ . Поскольку значения этих токов одинаковы, суммарный ток на выходе фильтра будет равен нулю. При обратном порядке чередования фаз векторы токов  $I_{R1}$  и  $I_{C2}$ , равных по значению, располагаются под углом  $120^\circ$  друг к другу, так что сумма этих токов на выходе фильтра в 1,5 раза превышает значение токов  $I_A - I_B$  или  $I_C - I_A$ .

Кроме фильтра, в комплект РТФ 2 входят стабилитроны для ограничения напряжения на выходе фильтра, два реле, миллиамперметр для измерения тока небаланса. Одно из реле (более чувствительное) действует на сигнал, другое – на отключение. Абсолютное значение тока на выходе ФТОП зависит от сопротивления подключённой нагрузки. Максимальную мощность фильтр отдаёт, когда сопротивление нагрузки  $Z_H$  равно сопротивлению холостого хода фильтра, измеренному на его выходных зажимах при разомкнутых входных.

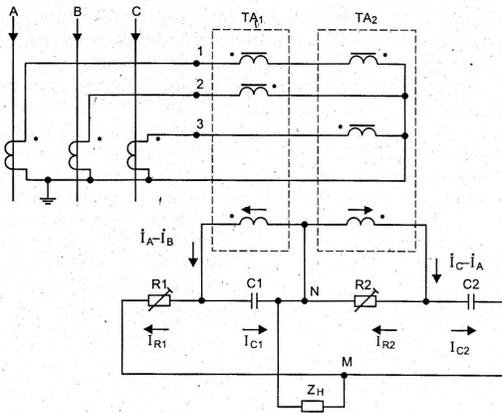


Рис. 7.13. Схема фильтра тока обратной последовательности реле типа РТФ 2

Фильтр – реле типов РТФ 7/1 (7/2) не отличаются существенно от РТФ 2. Здесь в качестве сигнального и отключающего органов использованы поляризованные реле. Для повышения коэффициента возврата более чувствительного сигнального реле применяется электрическое торможение. Реле имеет две катушки – рабочую и тормозную, первая из которых включена непосредственно в цепь выпрямленного выходного тока фильтра, а вторая подключена к сети оперативного постоянного тока. Регулирование тока срабатывания обоих реле осуществляется шунтирующими резисторами. Шкалы уставок градуируются в относительных единицах, показывающих, какую долю номинального тока реле составляет ток обратной последовательности при срабатывании сигнального или исполнительного органа. В зависимости от типа фильтр – реле диапазон уставок сигнального органа составляет от 0,04 до 0,20, отключающего органа – от 0,4 до 1,2 номинального тока 1; 5 или 10 А.

Фильтр – реле типа РТ2. Схема ФТОП (рис.7.14) состоит из трансформатора ТА<sub>Ф</sub> с двумя первичными и одной вторичной обмотками и резистора R. К первичным обмоткам и резистору через зажимы 1, 3 и 5 подводятся фазные токи. Кроме того, в фильтр входит трансформатор ТА<sub>К</sub>, служащий для компенсации составляющей нулевой последовательности. В сетях с изолированной нейтралью, где токи нулевой последовательности отсутствуют, этот трансформатор не используется (зажимы 9 – 11 разомкнуты).

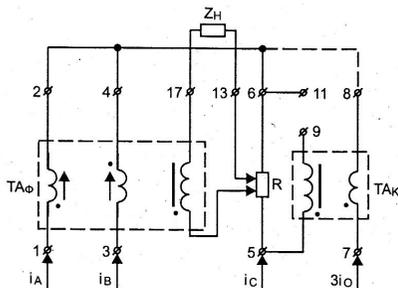


Рис. 7.14. Схема фильтра тока обратной последовательности реле типа РТ2

Когда токи прямой последовательности протекают по первичным обмоткам трансформатора ТА<sub>Ф</sub>, на его вторичной обмотке наводится ЭДС, пропорциональная по значению векторной разности токов  $I_A - I_B$  и отстающая от последней по фазе на угол  $90^\circ$ . Коэффициент трансформации трансформатора ТА<sub>Ф</sub> и сопротивление резистора R подобраны так, что ЭДС обмотки и падение напряжения на этом сопротивлении численно равны, а так как они находятся в противофазе, напряжение на нагрузке  $Z_n$  (обмотки реле) равно нулю.

Напротив, при подаче на входные зажимы 1, 3, 5 фильтра токов обратной последовательности векторы ЭДС вторичной обмотки ТА<sub>Ф</sub> и падения напряжения на сопротивлении R совпадают по направлению, так что выходное напряжение фильтра равно двойному значению ЭДС. Когда РТ 2 используются в сетях с заземлённой нейтралью, вводят в работу компенсирующий трансформатор ТА<sub>К</sub>, для чего зажимы 9 –

11 соединяют накладкой. Токи нулевой последовательности будут проходить в каждой фазе, а суммарный ток  $3 I_0$  в нулевом проводе пройдёт по первичной обмотке  $TA_K$  (зажимы 7 – 8). Токи фаз А и В во вторичную обмотку  $TA_K$  не трансформируются, так как магнитные потоки их направлены встречно. Падение напряжения на всём сопротивлении R создаётся только током фазы С и компенсируется ЭДС вторичной обмотки трансформатора  $TA_K$ , пропорциональной току  $3I_0$ . Таким образом, при идеальной настройке фильтра токи прямой и нулевой последовательности не создадут ЭДС на выходе фильтра. Практически, однако, в обмотках выходных реле всегда протекает ток небаланса, значение которого при настройке должно быть сведено к минимуму.

*Фильтр – реле типа РТФ1 и РТФ2.* Фильтр этих реле отличается простотой настройки и компенсации токов нулевой последовательности. Фильтр состоит из трансформатора тока ТА и трансформатора с воздушным зазором (трансреактора) ТАУ, нагруженных регулируруемыми резисторами  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 7.15). Параметры трансформаторов и сопротивления резисторов выбраны так, что при протекании по первичным обмоткам трансформаторов одинаковых токов падения напряжения на сопротивлениях  $R_1$  и  $R_2$  равны.

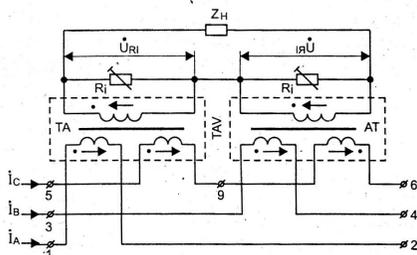


Рис. 7.15. Фильтр тока обратной последовательности реле РТФ 1 и РТФ 3

Магнитный поток в трансформаторе ТА создаётся разностью токов  $I_C - I_A$ , в трансформаторе ТАУ – разностью токов  $I_B - I_C$ , благодаря чему токи нулевой последовательности во вторичную цепь не трансформируются. При прямом порядке следования фаз падение напряжения на сопротивлении  $R_1$  совпадает по фазе с разностью  $I_C - I_A$ , а падение напряжения на  $R_2$  находится в противофазе с ним, так как опережает вектор  $I_B - I_C$  на  $60^\circ$  (угол сдвига между ЭДС и током вторичной цепи ТАУ выбран равным  $30^\circ$ ). В результате напряжение на выходе фильтра будет равно нулю. В случае поступления на входы 1, 3, 5 токов обратной последовательности угол фазного сдвига между напряжениями на  $R_1$  и  $R_2$  составит  $120^\circ$  и сумма их будет достаточно велика.

Реле выпускаются на номинальные токи 1 и 5 А и имеют 4 – кратный диапазон уставок по току обратной последовательности: от 0,3 до 1,2 А для реле на номинальный ток 1 А и от 1,6 до 6 А на ток 5 А. Для удвоения пределов уставок служит переключатель.

### 7.3. Бесконтактные элементы релейной защиты и автоматики.

#### 7.3.1. Полупроводниковая элементная база.

##### 7.3.1.1. Основные понятия.

Рассмотренные выше электромеханические реле позволяют реализовать все функции релейной защиты, однако имеют ряд недостатков:

- большая мощность, потребляемая от измерительных трансформаторов;
- наличие подвижных частей и контактов, ограничивающих срок службы и надёжность реле;

- относительно низкая вибростойкость;

- ограниченное быстродействие;

- значительные масса и габариты.

Существенным достоинством полупроводниковых элементов РЗа является отсутствие подвижных частей и контактов. Поэтому построенные на полупроводниковой базе реле и защиты в целом называют бесконтактными или *статическими* (хотя иногда в качестве выходных органов и применяются контактные реле). Такие устройства имеют более высокую чувствительность и быстродействие, меньшее собственное потребление, габариты и массу, отличаются стабильностью параметров, большим сроком службы, нечувствительностью к ударам и вибрациям, просты в обслуживании и практически не требуют ремонта. В качестве базовых элементов служат диоды и транзисторы, логические элементы, интегральные микросхемы (аналоговые и цифровые) и микропроцессоры.

Для создания полупроводниковых приборов в чистые полупроводники (германий, кремний и др.) вводят специальные примеси, позволяющие резко увеличить собственную проводимость за счёт появления дополнительного количества свободных носителей зарядов – отрицательных (электронов) или положительных («дырок»). В зависимости от преобладания тех или иных носителей различают полупроводники электронного, или *n* – типа, и дырочного, или *p* – типа. Промежуточный слой между двумя областями разного типа носит название *p – n* перехода и обладает вентильными свойствами. Если источник напряжения подключить «плюсом» к *p* – области, сопротивление перехода будет невелико и через него пройдёт ток, называемый прямым. При обратной полярности сопротивление перехода оказывается во много раз большим и ток через него, называемый обратным, будет весьма мал.

##### 7.3.1.2. Диоды.

Простейшие полупроводниковые приборы – *диоды* содержат один *p – n* переход и соответственно два электрода – анод и катод. Наиболее распространены выпрямительные, импульсные и опорные диоды. Одним из основных параметров выпрямительных диодов является номинальный ток. Это – максимально допустимое по нагреву при длительной работе значение постоянного или среднего за период прямого тока. Другим классификационным параметром является номинальное обратное напряжение, или просто номинальное напряжение, которое для большинства диодов составляет до 80% пробивного напряжения. Дифференциальное сопротивление диода – это отношение приращений напряжения и прямого тока, которое можно определить из вольт – амперной характеристики прибора или из соотношения  $R_d \approx 26 / I_{пр}$ , Ом, где  $I_{пр}$  – прямой ток, мА (при 20 °С).

Обратное сопротивление диода находят как отношение обратного напряжения и обратного тока, причём следует учитывать, что это сопротивление увеличивается в 2...3 раза на каждые 10 °С повышения температуры.

Импульсные диоды используются в качестве переключающих элементов. Длительность переходных процессов в импульсных диодах намного меньше, чем в выпрямительных. Классификационными параметрами являются максимальные значения обратного тока и напряжения.

Опорные диоды, или стабилитроны, служат для поддержания или ограничения напряжения на определённом уровне. Падение напряжения на стабилитроне лишь незначительно изменяется при изменении проходящего через него тока в широких пределах (область электрического пробоя). Напряжение стабилизации  $U_{ст}$  является основным классификационным параметром стабилитрона. Важным параметром является также температурный коэффициент напряжения стабилизации  $TKH = (\Delta U_{ст}/\Delta T)100\%$ , который показывает, на сколько процентов изменится напряжение стабилизации прибора при изменении его температуры на 1 °С. К основным параметрам относят и дифференциальное сопротивление  $R_d = \Delta U_{ст}/\Delta I_{ст}$ , где  $\Delta U_{ст}$  и  $\Delta I_{ст}$  – приращения напряжения и тока на рабочем участке характеристики стабилитрона.

Переключающие диоды изготавливаются на основе четырёхслойной полупроводниковой структуры p-n-p-n типа с тремя p-n переходами. В рабочем режиме такого прибора «плюс» напряжения подаётся на крайнюю p-область (анод), «минус» – на крайнюю n-область. Если у прибора сделаны только эти два вывода, то он называется диодным тиристором, или динистором. При определённом значении напряжения между анодом и катодом (напряжение включения) падение напряжения на динисторе резко снижается.

У управляемых переключающих диодов – триодных тиристор (тринисторов), или просто тиристоров, ко второй p-области подключается управляющий электрод. Тиристор открывается в прямом направлении только при условии, когда на управляющий электрод подан положительный (по отношению к катоду) потенциал. После снятия отпирающего сигнала постоянный ток в цепи анод – катод не прекратится, и в большинстве случаев тиристор может быть заперт только подачей обратного напряжения или прерыванием тока с помощью коммутационного аппарата. Исключение составляет ограниченная номенклатура тиристоров, которые могут запираются по цепи управления. На переменном токе прибор будет запирается каждый раз при прохождении тока через нулевое значение, и для его повторного отпираания следует подавать управляющий сигнал. Если этот сигнал подаётся в момент появления положительного напряжения на аноде, то в нагрузке выделится полное выпрямленное напряжение, если же отпирающий сигнал сдвигать по фазе от этого момента в сторону отставания, выходное напряжение будет уменьшаться; таким способом производится регулирование выходного напряжения тиристорных источников питания нагрузки выпрямленным током. Тиристоры применяются также в качестве выходных каскадов силовых ключей.

Симистор (симметричный тиристор) представляет собой эквивалент встречно – параллельного соединения двух тиристоров и способен поэтому пропускать ток в обоих направлениях.

Оптронный тиристор управляется посредством светового сигнала.

Основными классификационными параметрами тиристоров являются средний ток в открытом состоянии и максимальное значение допустимого обратного напряжения, число сотен вольт которого условились называть классом прибора ( 1-й класс – 100 В, 8-й – 800 В и т.д.). Диапазон номинальных значений параметров тиристоров весьма широк: ток от 1 А до нескольких тысяч А, напряжение от 50 В до нескольких тысяч В.

### 7.3.1.3. Транзисторы.

Транзисторы (биполярные) имеют три области разных типов проводимости и два р–п перехода между ними. В зависимости от проводимости крайних (р и р или п и п) и средней (р или п) областей различают транзисторы р–п–р и п–р–п типа. Крайние области биполярного транзистора носят названия эмиттер (Э) и коллектор (К), средняя – база (Б). На одноимённые выводы транзисторов разных типов проводимости подаются напряжения противоположной полярности (рис. 7.16). Управляются биполярные транзисторы током базы.

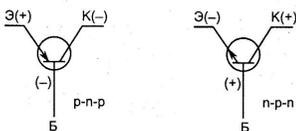


Рис. 7.16. Полярность электродов биполярного транзистора при включении его в схему (открыт).

Различают три схемы включения транзистора: с общим эмиттером (ОЭ), с общей базой (ОБ) и с общим коллектором (ОК) – в зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей. Чаще других применяется схема ОЭ.

В рабочем режиме транзистора большая часть тока эмиттера  $I_Э$  проходит к коллектору, ток которого  $I_К = \alpha I_Э$ , где  $\alpha = 0,90 \dots 0,997$  – коэффициент передачи эмиттерного тока, иначе – коэффициент усиления по току в схеме ОБ. Остающаяся часть тока эмиттера образует ток базы  $I_Б$ , так что  $I_К = I_Э - I_Б = \beta I_Б$ . Здесь  $\beta \approx 10 \dots 350$  – коэффициент усиления по току в схеме ОЭ. В случаях усиления небольших сигналов переменного тока используются преимущественно так наз.  $h$  – параметрами, которые определяют связь между напряжениями и токами на входе и выходе транзистора.

Возможны два предельных режима работы транзистора: режим отсечки и режим насыщения. В режиме отсечки прибор заперт и эмиттерный ток, а также ток коллектора близки к нулю. Режим насыщения наступает тогда, когда при увеличении тока базы прибор полностью открывается и ток коллектора перестаёт возрастать, достигнув максимального значения. В первом случае сопротивление транзистора чрезвычайно велико, во втором – близко к нулю. Когда эти режимы чередуются, говорят, что прибор работает в режиме ключа, или переключателя, аналогично контактам электромеханического реле. Параметрами предельных режимов являются:

- максимальная мощность, рассеиваемая прибором;
- максимальный ток коллектора;
- максимальное обратное напряжение между электродами.

Если требуется повысить выходную мощность, используют составные транзисторы или каскадное соединение приборов. Параллельное включение биполярных транзисторов путём непосредственного соединения электродов недопустимо, так как ток может распределиться между ними неравномерно: в этом случае в эмиттерные цепи вводят небольшие сопротивления, выравнивающие токи.

На основе транзисторов строятся типовые схемные узлы – усилители и переключатели, а также источники питания, стабилизаторы, релейные элементы. Транзисторные устройства релейного действия выполняются обычно на основе усилителей постоянного тока с положительной обратной связью. К таким устройствам принадлежат, в частности, триггеры и нуль – индикаторы. Симметричный *триггер* срабатывает при подаче короткого управляющего сигнала и остаётся в этом состоянии до подачи сигнала на возврат, т.е. имеет два устойчивых состояния. *Одновибратор* может сколь угодно долго находиться только в одном из устойчивых состояний, из другого же через некоторое время возвращается в исходное состояние. *Нуль – индикатор* срабатывает в случае изменения знака управляющего сигнала. В реле времени используют заряд конденсатора через резистор с большим сопротивлением.

Наряду с биполярными транзисторами, управляемыми электрическим током, большое распространение получили *полевые (униполярные, канальные)*, управляемые электрическим полем (напряжением). Основное преимущество их – очень высокое входное сопротивление, достигающее  $10^{15}$  Ом, и большое усиление по току и мощности. Полевой транзистор состоит из полупроводникового стержня (канала), на поверхности которого с противоположных сторон формируются p–n переходы. Вывод с торца канала, от которого носители заряда начинают свой путь, называется *истоком*, другой, к которому они приходят, – *стоком*, а вывод от p–n перехода – *затвором*. Поперечное сечение канала проводимости, а следовательно его сопротивление, можно изменять посредством электрического поля, создаваемого затвором. Проводящий канал при этом можно уподобить регулируемому резистору. Управление и усиление тока в полевом транзисторе осуществляется носителями заряда одного знака, откуда и одно из названий его – униполярный.

Лучшие качества полевого транзистора обеспечиваются в случае, когда затвор отделён от канала тонким слоем диэлектрика (структура металл-диэлектрик-полупроводник), не препятствующим проникновению поля в канал. Такие МДП-структуры называют полевыми транзисторами с изолированным затвором. В отличие от полевых транзисторов с p–n переходом, эти приборы могут работать при любой полярности напряжения на затворе. Приборы с использованием слоёв металла в качестве затвора, окисла (диоксид кремния) как изолятора и полупроводника (кремния) для создания канала тока получили название *МОП – транзисторов* (металл – окисел – полупроводник), в англоязычной литературе – MOSFET (metall-oxide-semiconductor field effect transistor). В зависимости от типа проводимости канала, который определяется типом носителя заряда, различают n-канальные и p-канальные транзисторы (рис. 7.17); первые открываются положительным, вторые – отрицательным напряжением на затворе по отношению к истоку. Так же как и биполярные, полевые транзисторы могут работать в режимах отсечки и насыщения, включаться по схеме с общим истоком, с общим стоком или общим затвором (по аналогии с ОЭ, ОК или ОБ), использоваться в схемах усилителей, переключателей и др., в схемах логики. Сочетание полевого и биполярного транзисторов позволяет получить приборы с

высоким коэффициентом усиления и малым выходным сопротивлением. Полевые приборы одного типа можно соединять параллельно.

К числу недостатков полевых транзисторов относится значительное активное сопротивление в открытом состоянии, которое с повышением допустимого напряжения сток – исток более 250...300 В достигает нескольких Ом. Кроме того, этим приборам свойственно наличие паразитных эффектов, наиболее существенный из которых проявляется как включение диода параллельно силовым электродам транзистора и особенно влияет на протекание переходных процессов в схеме.



Рис. 7.17. Условные графические обозначения МОП-транзисторов: G – затвор; S – исток; D – сток

*Однопереходный транзистор* имеет один p–n переход и три электрода – эмиттерный и два базовых. Отличительная особенность этого прибора – наличие области отрицательного сопротивления на его вольт – амперной характеристике (падающий участок N – образной характеристики). Его часто применяют в схемах задания временных интервалов, в триггерах, мультивибраторах, стабилизаторах, а также для запуска силовых ключей. От обычных транзисторов прибор отличается более высокой надёжностью, стабильностью напряжения включения, возможностью передачи мощных импульсов и пр.

Комбинированный транзистор *типа IGBT*, состоящий из управляющего полевого и выходного биполярного каскадов, удачно сочетает преимущества того и другого типов транзисторов: высокое входное сопротивление и малое сопротивление проводящего канала (до нескольких миллиом). Сокращённое название этого типа приборов происходит от английского Insulated Gate Bipolar Transistor – биполярный транзистор с изолированным затвором. Условное обозначение транзистора IGBT, принятое в отечественной литературе, показано на рис. 7.18.

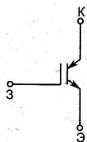


Рис. 7.18. Условное обозначение транзистора IGBT: З – затвор; К – коллектор; Э – эмиттер

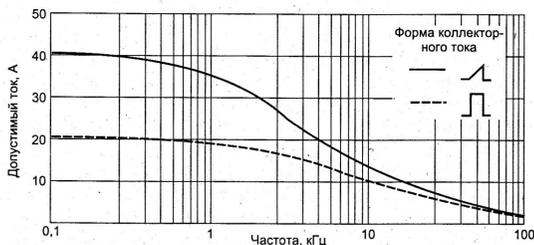


Рис. 7.19. Зависимость максимально допустимого тока коллектора от частоты переключений для транзистора IRG4BC30F

Быстродействие IGBT ниже, чем полевых транзисторов, но выше, чем биполярных: время включения до 0,2...0,4 мкс, выключения до 0,2...1,5 мкс. При переключении нельзя превышать допустимую скорость изменения напряжения на коллекторе во избежание так наз. «защёлкивания» биполярной части транзистора, когда она переходит в режим открытого тиристора. В этом случае закрыть прибор сигналом управления невозможно, и он может сгореть. В технических условиях на конкретный прибор приводятся кривые, отражающие соответствие допустимых значений рабочей частоты и максимального тока через прибор при различной форме коллекторного тока, как показано, например, на рис. 7.19. Превышать нормированные значения напряжения нельзя, по току же транзисторы IGBT выдерживают кратковременные перегрузки вплоть до 10 – кратных. Допустимое значение длительного (постоянного) тока коллектора нормируется для температуры корпуса 25 и 100 °С и в этом диапазоне изменяется примерно вдвое. Обычно эти приборы используются в режиме ключа, но могут работать и в линейном режиме. Транзисторы одного типонаминала можно соединять параллельно без выравнивающих резисторов в цепи эмиттера.

В настоящее время IGBT транзисторы как по своим параметрам (номинальные значения напряжения до 10000 В, тока – до нескольких килоампер), так и по стоимости становятся вполне конкурентоспособными по сравнению с мощными силовыми тиристорами, а часто и предпочтительными ввиду того, что управление ими осуществляется просто подачей или снятием входного сигнала, для их запираания на постоянном токе не требуется специальных устройств и схемы в целом реализуются значительно проще. С целью уменьшения количества дополнительных внешних деталей приборы выпускаются в виде модулей.

### 7.3.2. Логические элементы.

Известное распространение получили схемы РЗиА, выполненные на стандартных логических элементах. Эти элементы имеют один или несколько входов (до 8) и один выход и только два уровня входных и выходных сигналов, которые условно называют «1» (единица) и «0» (нуль). Элементы с одним входом или не изменяют состояния входного сигнала (*буфер*), или осуществляют дополнение логического состояния (изменение его на обратное), т.е. логическая 1 на входе вызывает логический 0 на

выходе и наоборот (*инвертор*). При графическом отображении элемента инвертирование обозначается кружочком на выводе. Состояние выходного сигнала логических элементов с несколькими входами зависит от сочетания входных сигналов (рис. 7.20).

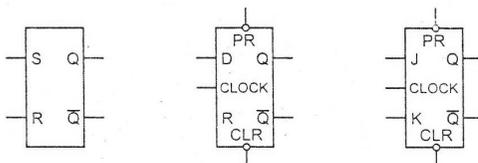


Рис. 7.20. Основные логические функции и графическое обозначение соответствующих логических элементов

На выходе *элемента И* логическая 1 появляется, если все входы одновременно находятся в том же состоянии 1, а все прочие комбинации входных сигналов приводят к логическому 0 на выходе. *Элемент НЕ-И* – это элемент И с инвертированным выходом (кружок на выходе): когда все входы одновременно находятся в состоянии логической 1, на выходе образуется логический 0. На выходе *элемента ИЛИ* появляется логическая 1, если хотя бы один из входов находится в состоянии логической 1. Сигнал 0 на выходе может появиться лишь при условии наличия 0 на всех входах. *Элемент НЕ-ИЛИ* представляет собой элемент ИЛИ с инвертированным выходом. Все возможные состояния входов и выходов логических элементов в отдельности или их комбинаций описываются *таблицей истинности*, как, например, табл. 7.1.

Таблица 7.1

Таблица истинности для функции ИЛИ-НЕ

Вход 1	Вход 2	выход
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Полупроводниковые логические элементы строятся на основе диодов и транзисторов, как биполярных, так и полевых; в комплементарной КМОП-логике каждый логический элемент содержит пару полевых транзисторов n-МОП и p-МОП типа. Схемы элементов *резисторно – транзисторной логики (RTL)* строились на базе простых транзисторных ключей; морально устарели. В схемах *ДТЛ-логики* (диоды, биполярные транзисторы, резисторы) логические функции выполняются с помощью диодных цепей, а усиление и инвертирование – с помощью транзисторов. В наиболее распространенной *ТТЛ-логике* биполярные транзисторы используются как для выполнения логических функций, так и для усиления сигнала. На входе эти элементы содержат многоэмиттерный транзистор; потребление – 10 мВт; при напряжении питания 5 В логическому нулю соответствует диапазон выходного напряжения 0...0,4 В, логической единице – 2,4...5 В. Широко применяется КМОП-логика.

В схемах РЗиА нашла применение серия диодно – транзисторных элементов типа «Логика – Т», построенных на транзисторных переключателях. Здесь логическим 1 и 0 соответствуют состояния отсечки или насыщения выходного транзистора переключателя. В качестве единичного сигнала принято напряжение  $-4 \dots -12$  В, нулевого  $0 \dots +1$  В. Основным (базовым) элементом серии является транзисторный усилительный каскад, работающий в ключевом режиме. Выходной сигнал вырабатывается между общей точкой питания ОТ и коллектором транзистора (рис.7.21). К этим точкам присоединяется нагрузка, называемая параллельной (рис. 7.21,а), последовательная нагрузка включается между коллектором транзистора и шиной питания  $U_{пит}$  (рис. 7.21,б). Число единичных параллельных и последовательных нагрузок, которые можно подсоединить к выходу элемента, характеризует его нагрузочную способность.

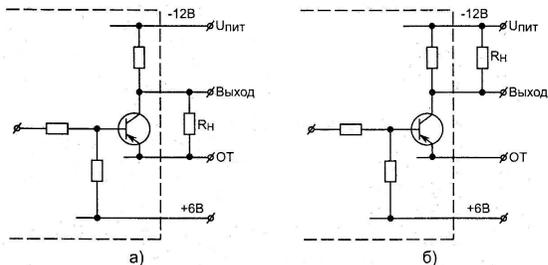


Рис.7.21. Схемы подключения параллельной (а) и последовательной (б) нагрузок  $R_H$  к выходу транзисторного усилителя серии «Логика-Т»

Функциональные модули системы представляют собой схемы, выполненные на печатных платах и помещённые в пластмассовый корпус. В состав системы входят логические, функциональные и релейные элементы, элементы времени и усилители.

Однако диодно – транзисторные и транзисторные защиты, в том числе построенные на этих элементах логические схемы, широкого распространения не получили, так как не удовлетворяли возросшим требованиям в части собственного потребления, габаритов, надёжности и стоимости. Существенные преимущества обеспечило внедрение микроэлектронных элементов и комплектных устройств на базе интегральных микросхем (ИМС).

### 7.3.3. Интегральные микросхемы.

*Интегральные микросхемы* и защиты на базе ИМС отличаются от аналогичных по назначению устройств на электромеханических реле или диодно – транзисторных элементах значительно уменьшенным потреблением мощности, меньшими габаритами и общей стоимостью, большей стабильностью параметров и точностью, надёжностью, расширенным диапазоном уставок и др., проще в наладке и эксплуатации. Интегральная микросхема – это помещённая в единый герметизированный корпус электрическая цепь, в которой функции отдельных элементов (диодов, транзисторов, резисторов, конденсаторов) или их совокупностей выполняют области из проводящих, полупроводниковых и диэлектрических материалов. В зависимости от выпол-

няемых функций ИМС подразделяют на *логические (цифровые)* и *аналоговые*. Цифровые ИМС предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по законам дискретных функций. Логические ИМС являются одним из видов цифровых микросхем и характеризуются двумя уровнями выходного напряжения, соответствующими «0» и «1» двоичной системы. Аналоговые ИМС предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по законам непрерывных функций, и характеризуются непрерывностью входных и выходных сигналов.

Основным элементом аналоговой микроэлектроники являются усилители. *Усилитель* – это активный четырёхполюсник, характеризующийся коэффициентом усиления и входным и выходным сопротивлениями. Изображается он в виде прямоугольника или треугольника (рис. 7.22). Наиболее часто применяются *дифференциальные* усилители (рис. 7.22,а). Основная задача – получить на выходе напряжение, пропорциональное разности потенциалов на входах :  $U_{\text{ВЫХ}} = (U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}}) K_U$ , где  $K_U$  – коэффициент усиления по напряжению. Усилитель состоит из дифференциального каскада на транзисторах. Базы транзисторов служат входами усилителя, а коллекторы – выходами. Выходное напряжение снимается либо с одного из выходов (несимметричное включение нагрузки), либо нагрузка подключается между ними (симметричное включение). Поскольку оба входа находятся в одинаковых условиях, коэффициент усиления почти не зависит как от абсолютных значений потенциалов на входах, так и от изменения внешних условий. Но в силу того, что параметры входных цепей полностью идентичными быть не могут, потенциалы коллекторов будут несколько различаться. Для их выравнивания на вход усилителя подают регулируемое напряжение смещения. При небольших значениях входного напряжения передаточные характеристики усилителя близки к линейным, при достаточно больших входных сигналах он переходит в режим насыщения и может быть использован в схемах ограничителя, триггера Шмитта, мультивибраторов.

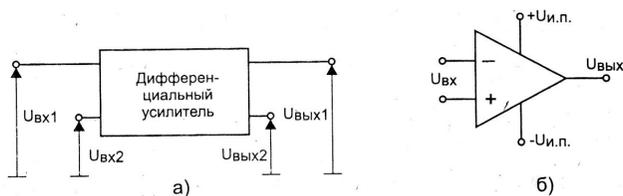


Рис. 7.22. Условные обозначения дифференциального (а) и операционного (б) усилителей

*Операционный* усилитель (рис.7.22,б) – это высококачественный усилитель напряжения с очень большим коэффициентом усиления, высоким входным и низким выходным сопротивлением. С помощью обратных связей можно реализовать самые разнообразные функции. Операционный усилитель, охваченный соответствующей обратной связью, может не только выполнять основные математические операции (откуда и его название), но и служить в качестве усилителя постоянного или переменного тока, активного фильтра, компаратора, генератора и др. При этом переда-

точная характеристика такого устройства определяется конфигурацией и параметрами цепи обратной связи и почти не зависит от усилителя. Усилитель имеет два входа и один выход. Один из входов усилителя называется неинвертирующим и обозначается знаком (+), другой – инвертирующим и обозначается знаком (-). При подаче сигнала на вход (+) выходной сигнал совпадает по фазе (полярности) с входным, а если усиливается сигнал подается на вход (-), то выходной сигнал оказывается в противофазе с ним. Коэффициент усиления по напряжению зависит от схемы включения усилителя (рис. 7.23).

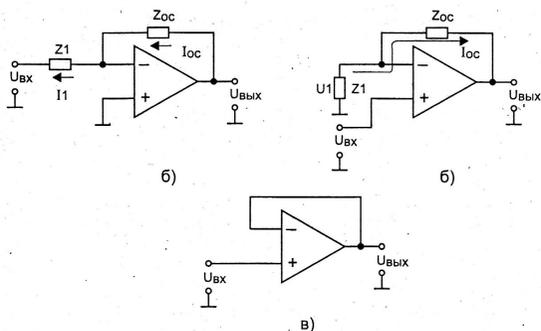


Рис. 7.23. Характерные схемы включения операционных усилителей с обратной связью:

а) инвертирующий усилитель; б) неинвертирующий усилитель; в) повторитель напряжения

При расчёте коэффициента усиления полагают, что входное сопротивление и коэффициент усиления собственно операционного усилителя (при разомкнутой цепи обратной связи) бесконечно велики, и учитывают, что входное напряжение усилителя равно разности потенциалов на его неинвертирующем и инвертирующем входах. Тогда для схемы инвертирующего усилителя (рис. 7.23,а) коэффициент усиления по напряжению  $U_{вых}/U_{вх}$  будет

$$K_u = - Z_{o.c} / Z_1,$$

а для неинвертирующего усилителя (рис. 7.23,б)

$$K_u = 1 + Z_{o.c} / Z_1,$$

т.е. отличается по абсолютному значению от коэффициента усиления инвертирующего усилителя только на единицу.

Очевидно, что повторитель напряжения (рис. 7.23,в) имеет коэффициент  $K_u = 1$ . Этот тип схемы называется «буфером». Напряжение на выходе его совпадает по фазе с напряжением на входе.

Сопротивления  $Z_1$  на входе схемы усиления и  $Z_{o.c}$  в цепи обратной связи в общем случае могут иметь комплексный характер, т.е. содержать как активную, так и реактивную (ёмкостную) составляющие (рис.7.24). Эти компоненты определяют не только значение коэффициента усиления (точнее, коэффициента передачи), но и изменение выходного напряжения во времени. Если сопротивление в цепи обратной связи и на входе чисто активные, то усилитель называется *пропорциональным*, или *масштабным*: его выходное напряжение изменяется пропорционально входному и одновременно с ним. На скачкообразный входной сигнал такой усилитель реагирует скачком напряжения на выходе (рис. 7.24,а). Если в цепи обратной связи заменить резистор  $R_{o.c}$  конденсатором  $C_{o.c}$ , то получим *интегрирующий* усилитель, или *интегратор* (рис. 7.24,б): вследствие постепенного заряда ёмкости выходное напряжение будет непрерывно изменяться, пока напряжение на входе отличается от нуля. Если входной сигнал подавать длительно, напряжение на выходе усилителя может достигнуть максимального значения и сохраняться до тех пор, пока входной сигнал не изменит свой знак. Введением конденсатора во входную цепь получают *дифференцирующий* усилитель, или *дифференциатор*: выходное напряжение идеального дифференциатора пропорционально производной входного сигнала. В цепь обратной связи усилителя и на вход схемы могут быть введены и нелинейные (например, диоды) и даже активные (например, транзисторы) элементы, обеспечивая построение компараторов, нуль – органов и т.п.

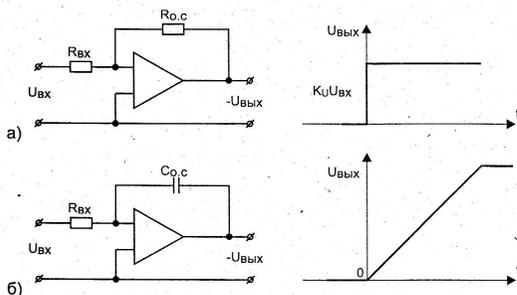


Рис. 7.24. Принципиальные схемы и реакция на скачкообразное изменение входного напряжения пропорционального (а) и интегрирующего (б) усилителей

Цифровая электроника выполняет более сложные операции с дискретными сигналами. Одним из базовых элементов цифровой схемотехники является *триггер*. Это устройство может неопределённо долго находиться в одном из двух устойчивых состояний (с 0 или 1 на выходе). Таким образом, триггер может служить элементом памяти, хранящем 1 бит информации, а  $n$  триггеров могут хранить  $n$  – разрядное двоичное число (слово). Главная выходная линия  $Q$  имеет высокий уровень в состоянии 1 и низкий в состоянии 0 (положительная логика). На вторую выходную линию выводится, как правило, дополнение  $\bar{Q}$ . Существуют два типа триггеров: синхронизируемые (синхронные) и несинхронизируемые (асинхронные). У синхронного триггера по одной из входных линий поступают синхриимпульсы, позволяющие изме-

нять состояние триггера только в определённые моменты времени. На рис. 7.25 показаны асинхронные RS – триггеры, выполненные на логических схемах, а также таблица истинности для них. Символ R обозначает сброс (от англ. Reset), т.е. переход линии Q к состоянию 0, а символ S (от англ. Set) – установку, т.е. переход линии Q к уровню 1; символ  $\bar{Q}$  означает дополнение Q.

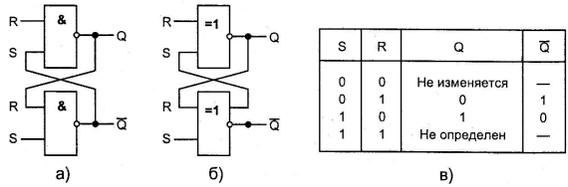


Рис. 7.25. RS – триггеры на двух логических элементах НЕ –И (а), НЕ – ИЛИ (б) и таблица истинности (в)

Как видно из таблицы истинности на рис. 7.25,в (последняя строка), такой триггер имеет существенный недостаток: невозможно предсказать состояние, в котором он останется после подачи логической 1 на оба входа одновременно. Этого недостатка лишены синхронные триггеры, из которых наиболее часто встречается JK – триггер. Триггер имеет два синхронизируемых входа J и K, два прямых входа PR – (пред)установка и CLR – очистка (сброс), вход синхронизации CLOCK (иногда обозначается русской аббревиатурой СИ – синхроимпульс) и два дополняющих выхода. Входы J и K действуют аналогично входам S и R асинхронного RS – триггера, но только по разрешению синхроимпульса. D – триггер имеет два основных входа: D (от Delay – задержка или Data – данные) и CLOCK. Выходное состояние триггера может изменяться только в те моменты, когда меняется состояние сигнала синхронизации. Предусматриваются также вспомогательные входы для прямой установки PR или сброса CLR триггера (рис. 7.26). Этот триггер используется преимущественно как *однобитная защелка данных*. В ней состояние входа D передаётся на выход Q по нарастающему фронту сигнала синхронизации, а спадающий фронт его на выход воздействия не оказывает. Обычные D – триггеры синхронизируются нарастающим фронтом CLOCK, а JK – триггеры – спадающим фронтом.

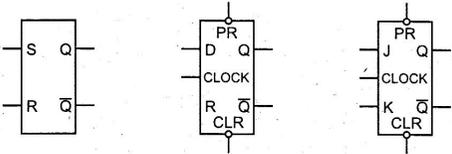


Рис.7.26. Условные графические обозначения RS – , D – и JK – триггеров

Несколько триггеров, соединённых так, что цифровые данные можно сдвигать из данного разряда в соседний, называются *сдвиговым регистром*. Наиболее широко применяется регистр на JK – триггерах (рис. 7.27). Данные сдвигаются вправо по спадающему фронту каждого синхронизирующего сигнала, так что за три полных такта логический сигнал W передается со входа первого разряда на выход С последнего, в данном случае третьего, разряда. Аналогично тому, как в десятичной системе счисления можно умножать и делить числа на степень 10, сдвигая запятую, двоичные числа можно умножать и делить на степень 2 путём сдвига вправо или влево в регистре. Регистр позволяет также преднамеренно задерживать информацию в зависимости от числа разрядов и частоты синхроимпульсов. Соединив выход сдвигового регистра со входом, получают устройство памяти с циркуляцией данных.

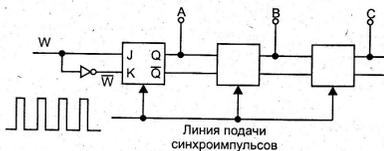


Рис. 7.27. Сдвиговый регистр и форма синхросигнала

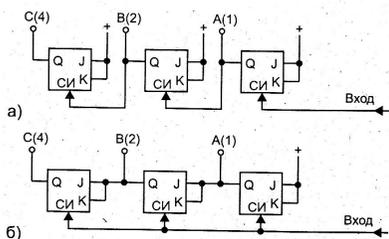


Рис. 7.28. Схемы асинхронного (а) и синхронного (б) счётчиков

Триггеры, соединённые так, как показано на рис. 7.28, образуют двоичный *счётчик*. Если первоначально все триггеры были обнулены, то после подачи первого сигнала на выходе А первого справа триггера появится 1 и таким образом в устройство будет записано число CBA = 001, после второго 1 сдвинется на разряд влево и запишется число 010, после третьего 011 и т.д., а после восьмого CBA = 000. Такую схему называют счётчиком по модулю 8. В общем случае двоичный счётчик по модулю N сбрасывается на 0 после N – го импульса и имеет n разрядов и триггеров, так что  $N = 2^n$ . Например, счётчик из трёх триггеров считает до  $7 = 2^0 + 2^1 + 2^2$  (в двоичной системе 111) и сбрасывается 8-м импульсом, из четырёх триггеров – считает до 15 и сбрасывается 16-м импульсом и т.д. Каждый из триггеров делит частоту входного сигнала пополам, и потому частота выходного сигнала будет равна  $1/N$  частоты входного. Асинхронный счётчик (со сквозным переносом) осуществляет счёт в том случае, когда изменения состояния на выходах триггеров происходят под действием

заднего фронта синхроимпульсов и каждый триггер перебрасывается при переходе от 1 к 0. У синхронного счётчика все линии синхроимпульсов СИ соединены между собой, благодаря чему триггеры могут изменять свои состояния синхронно.

*Таймер* представляет собой источник импульсов с точно определённой длительностью и обеспечивает получение заданной выдержки времени. Микросхема таймера может вырабатывать как одиночный импульс заданной длительности (так наз. моностабильная схема, или схема с одним устойчивым состоянием), так и непрерывную последовательность импульсов. Типовые схемы таймеров (например, 555 серия) обычно сочетают в себе аналоговые и цифровые компоненты и времязадающие конденсаторы.

Цифровые данные можно перерабатывать в аналоговую форму и наоборот. В *цифроаналоговых преобразователях* (ЦАП) входным сигналом является двоичный код, выходным – напряжение или ток. Цифро – аналоговое преобразование состоит в суммировании эталонных напряжений, соответствующих разрядам входного кода, и притом только тех, для которых в соответствующих разрядах стоит единица. Основными узлами преобразователя являются резистивная матрица, с помощью которой формируются эталонные токи, и токовые ключи (рис. 7.29). Сопротивления резисторов матрицы удваиваются при переходе от старшего разряда к младшему. Один из вариантов такой матрицы (со взвешенными резисторами) показан на рис. 7.29,а. Здесь каждому разряду двоичного кода соответствует своё значение тока  $I_1, I_2 \dots I_n$ , определяемое сопротивлением резисторов  $R, 2R, \dots, 2^{n-1}R$ . В варианте с резистивной сеткой  $R-2R$  (рис. 7.29,б) используются сопротивления только двух номиналов. Формирование токов происходит за счёт как последовательных, так и параллельных цепей резисторов. Ключи строятся обычно на транзисторах.

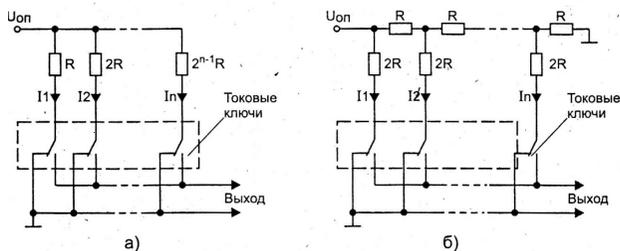


Рис. 7.29. Резистивные матрицы: а – со взвешенными резисторами; б – с резистивной сеткой

В микроэлектронных *аналогоцифровых* преобразователях (АЦП) входным сигналом является напряжение, выходным – цифровой код. В преобразователях производится квантование входного напряжения на конечное число дискретных значений, каждое из которых преобразуется в код. Состав АЦП может изменяться в зависимости от метода преобразования и его реализации. АЦП последовательного приближения (поразрядного кодирования) содержит компаратор и ЦАП. Принцип действия его состоит в сравнении эталонов напряжения, пропорциональных степеням числа 2, с аналоговой величиной. Если эталон больше входной величины, то в старшем раз-

ряде ставится 0. Затем производится сравнение со следующим по значению эталоном и, если он равен или меньше входной величины, то в старшем разряде выходного кода ставится 1 и в дальнейшем уравнивается разность между входной величиной и первым эталоном и т.д. В результате преобразования входное напряжение уравнивается суммой эталонных напряжений, снимаемых с ЦАП.

Принцип работы ЦАП последовательного счёта основан на уравнивании входной величины суммой одинаковых и минимальных по значению эталонов. Момент уравнивания определяется компаратором, а количество слагаемых подсчитывается счётчиком. Принцип работы преобразователей параллельного действия основан на одновременном сравнении входного сигнала с  $2^n - 1$  эталонами, соответствующими  $n$  – разрядному двоичному коду, и кодировании результатов. Такие преобразователи являются наиболее быстродействующими, но требуют большого количества компараторов. Поэтому иногда применяют комбинированное устройство: несколько малоразрядных АЦП параллельного действия соединяют последовательно.

### 7.3.4. Статические реле.

#### 7.3.4.1. Промежуточные реле и реле времени.

В серии электромеханических промежуточных реле с включающей и удерживающей катушками реле *типа РП18* снабжены полупроводниковым блоком замедления. Все реле этого типа выпускаются на постоянный и переменный ток, номинальное напряжение от 24 до 220 В постоянного и от 110 до 220 В переменного тока, отключаемый ток соответственно от 2,65 до 0,21 А (постоянный) и 5 А (переменный); постоянная времени цепи нагрузки  $\leq 0,02$  с, коэффициент мощности  $\geq 0,5$ ; номинальный ток контактов 2 А.

Блоки замедления при срабатывании и возврате собраны на транзисторах (рис. 7.30).

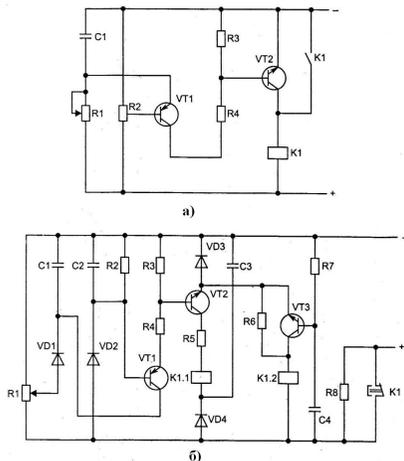


Рис. 7.30. Упрощённые принципиальные схемы блоков замедления реле РП18: при срабатывании (а) и возврате(б)

При подаче напряжения начинается заряд конденсатора С1 через резистор R1, а на базе транзистора VT1 устанавливается напряжение, определяемое положением движка резистора R2 (рис. 7.30,а). Когда напряжение на конденсаторе превысит это значение, транзистор VT1 отпирается, разрядным током конденсатора отпирается и транзистор VT2, что приводит к срабатыванию выходного реле К1. Время замедления на срабатывание регулируется резистором R1. После срабатывания реле удерживается во включённом положении, получая питание через цепь своего замыкающего контакта.

В блоке замедления при возврате (рис.7.30,б) реле срабатывает под действием включающей обмотки К1.2, которая получает питание при подаче напряжения на схему через размыкающий контакт К1 и транзистор VT3. Последний открывается током заряда конденсатора С4 и закрывается при его разряде. Вместе с тем происходит заряд конденсаторов С1 и С2. Якорь реле остаётся в притянутом положении благодаря остаточной намагниченности сердечника и подпитке обмотки К1.2 через резистор R6. При снятии напряжения или уменьшении его ниже напряжения возврата реле конденсатор С2 начинает разряжаться на резистор R2 и запирающее напряжение на входе транзисторного ключа VT1 снижается. Ключ открывается и током разряда конденсатора С1 открывается транзистор VT2. Конденсатор С3 разряжается на обмотку К1.1, а так как магнитодвижущая сила её оказывается при этом противоположной по знаку МДС включения, сердечник размагничивается и якорь реле отпадает.

*Реле времени РВ01* выпускаются на напряжение постоянного тока от 24 до 220 В, переменного – от 100 до 380 В. Мощность, потребляемая реле, до 10 Вт на постоянном и до 20 В·А на переменном токе, диапазон уставок по времени – от 0,1 до 50,0 с. Длительно допустимый ток контактов 2,5 А, кратковременно допускается больший ток. Принципиальная схема реле приведена на рис. 7.31. При подаче напряжения на реле срабатывает пороговый

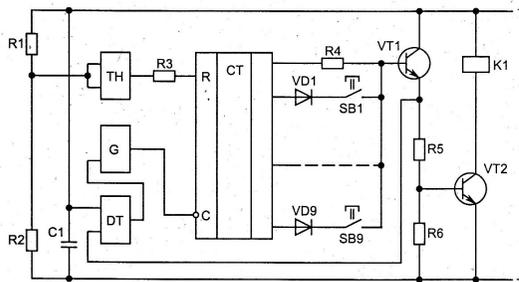


Рис. 7.31. Принципиальная схема реле времени РВ01 (упрощенная)

элемент ТН, разрешающий работу счётчика СТ. По истечении выдержки времени, задаваемой конденсатором С1 и элементом ДТ и определяющей минимальную уставку, начинает работать генератор G импульсов стабильной частоты, заполняющих счётчик СТ. При совпадении количества этих импульсов с числом, набранным переключателями SB1...SB9, открывается транзистор VT1 и запрещает дальнейшую ра-

боту генератора. Одновременно открывается транзистор VT2 и срабатывает реле K1. Таким образом, выдержка времени на срабатывание реле определяется числом импульсов N, отсчитанных счётчиком, и начальной (минимальной) уставкой  $T_{\min}$ , т.е.  $T_{\text{ср}} = T_{\min} + T_N$ , где  $T_N$  – время отсчёта N импульсов;  $T_{\min} = 0,1$  с.

Реле РВ03 обеспечивает выдержку времени на возврат. Номинальное напряжение – от 100 до 380 В переменного тока, выдержка времени – от 0,15 до 20,0 с; потребляемая мощность 3 В·А, коммутационная способность контактов та же, что и у реле РВ01. Реле содержит две одинаковых схемы задержки, подобных изображённой на рис. 7.32. Последняя состоит из времязадающего контура \*R1- R2 – C1, порогового устройства на транзисторе VT1, выходного каскада на транзисторе VT2, конденсатора памяти C2, накопительного конденсатора C3 и реле с магнитной памятью K1. Когда на схему подаётся напряжение (выпрямленное), через резистор R5 и контакт K1.1 получает питание обмотка реле K1, которое срабатывает, размыкая контакт K1.1, и остаётся в этом положении за счёт магнитной памяти и подпитки через конденсатор C3; заряжается конденсатор C1. Все транзисторы запираются и в дальнейшем при наличии питания состояние элементов схемы не изменяется.

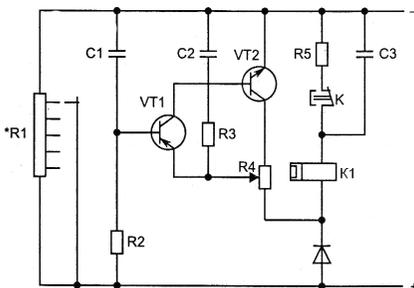


Рис. 7.32. К принципу работы схемы выдержки времени на возврат реле РВ03

Когда напряжение на схеме отключается или становится ниже напряжения возврата реле, конденсатор C1 начинает разряжаться на блок резисторов \*R1, суммарное сопротивление которых выбирается установкой переключателей (на схеме не показаны). По мере разряда конденсатора C1 в определённый момент транзистор VT1 переходит в режим насыщения, током разряда конденсатора C2 открывается транзистор VT2 и конденсатор C3 разряжается на обмотку реле K1. Поскольку полярность разрядного тока противоположна полярности тока срабатывания реле K1, а создаваемая им МДС противоположна МДС постоянного магнита, якорь реле отпадает и размыкающие контакты его замыкаются. Точно так же работает и второе реле (K2), а возврат третьего реле (K3) происходит без выдержки времени при снижении напряжения до 10...55% номинального.

Реле времени РСВ13 применяется в схемах РЗиА на переменном оперативном токе. Реле имеет две выходные цепи с «проскальзывающими» контактами (время замкнутого состояния 0,4 с) уставок T1 и T2 и одну – с конечным замыкающим контактом уставки T3. Диапазон регулирования уставок по времени 0,1...9,9 с дискретно с

интервалом 0,1 с. Значения уставок должны удовлетворять условию  $T1 < T2 < T3$  и различаться не менее чем на 0,4 с. Длительно допустимый ток контактов 5 А.

Реле состоит из двух насыщающихся трансформаторов на входе, электронной схемы и трёх выходных электромагнитных реле. Первичные обмотки насыщающихся трансформаторов включаются во вторичные цепи измерительных трансформаторов тока. Электронная схема запускается контактами других реле. Принцип действия её основан на сравнении числа импульсов тактового генератора с заданным; структурная схема представлена на рис. 7.33.

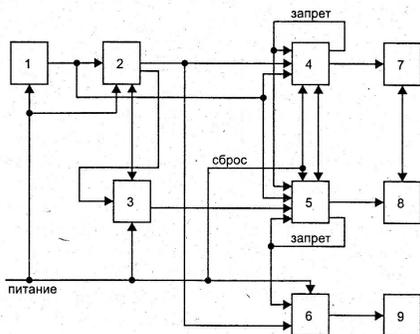


Рис. 7.33. Структурная схема электронной части реле РСВ13:

1 – генератор тактовых импульсов; 2,3 – счётчики импульсов; 4,5 – формирователи длительности замкнутого положения «проскальзывающих» контактов; 6 – формирователь однократного включения конечного контакта; 7,8,9 – усилители и выходные реле К1, К2 и К3 (цепи питания элементов схемы не показаны)

При пуске реле нулевой разрешающий сигнал подаётся на входы элементов 1...6. Один из входов цифровой микросхемы, на которой собран генератор 1, используется для блокировки последнего и установки его в исходное состояние. Прямоугольные импульсы выхода микросхемы поступают на входы счётчика 2 и формирователей 4 и 5, а импульсы переноса с выхода счётчика 2 – на вход счётчика 3. Выходы счётчиков через переключатели уставок (на схеме рис. 7.33 не показаны) соединены с входами формирователей 4,5,6. Задание уставок осуществляется по методу суммирования интервалов. В целях снижения потребляемой мощности предусмотрена определённая последовательность срабатывания выходных реле. Для реализации этой последовательности и функционирования временно замыкающего контакта в схему введены блоки 4 и 5 формирования длительности положения после срабатывания реле К1, К2 и блок 6 однократного срабатывания реле К3, выполненные на микросхеме счётчика, RS – триггерах и логических элементах.

После пуска реле через замкнутые переключатели уставок и выходы счётчика на вход формирователя 4 поступает сигнал, устанавливающий его в нулевое положение. Через промежуток времени, соответствующий набранному на переключателе уставок значению, на соответствующих выходах счётчиков 2 и 3 появляются сигналы «1», в

результате чего срабатывает реле К1 (блок 7) и одновременно разрешается счёт импульсов счётчиком формирователя 4. После набора заданного числа импульсов, соответствующего промежутку времени 0,4 с, на выходе счётчика появляется сигнал, который блокирует дальнейший счёт импульсов и возвращает реле в исходное положение.

Формирование длительности положения после срабатывания К2 (блок 8) происходит аналогично. При этом возможны два случая: первый – когда реле срабатывает с выдержкой времени  $T_2$ , второй – с выдержкой времени  $T_1 + 0,4$  с. Таким образом обеспечивается требуемая последовательность работы реле К1 и К2 независимо от набранных переключателями уставок.

Посредством блока 6 могут быть реализованы два варианта однократного срабатывания реле К3: первый – с выдержкой времени  $T_3$ , второй – через промежуток времени  $t = T_2 + 0,4$  с (при  $T_2 > T_1 + 0,4$  с) или  $t = T_1 + 0,4$  с (при  $T_2 < T_1 + 0,4$  с). Однократность срабатывания обеспечивается приданием триггерной характеристики счётчику формирователя 5. В обоих случаях осуществляется требуемая последовательность работы всех трёх реле.

Реле времени РСВ14 выпускаются на напряжение от 24 до 220 В постоянного и от 100 до 220 В переменного тока. Потребляемая мощность – до 15 Вт на постоянном и до 30 В•А на переменном токе. Реле имеет три независимые выходные цепи: мгновенный переключающий контакт, «проскальзывающий» контакт с выдержкой времени на срабатывание и конечный замыкающий контакт также с выдержкой времени на срабатывание. Уставка выдержки времени выбирается в одном из четырёх диапазонов от 0,05 до 90,0 с, регулируется ступенями внутри диапазона и плавно – внутри ступени. Время замкнутого положения проскальзывающего контакта можно изменять от 0,3 до 0,9 с. Длительно допустимый ток контактов 2,5 А.

Функциональные узлы реле представлены на структурной схеме рис. 7.34.

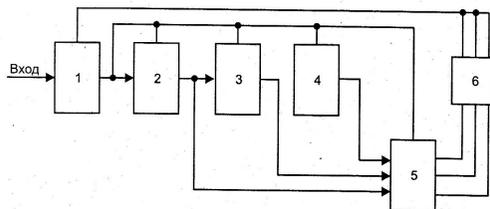


Рис. 7.34. Структурная схема реле времени типа РСВ14:

1 – блок питания и управления схемой реле; 2 – схема запуска; 3,4 – генераторы с переключателями уставок выдержки времени и делителями частоты; 5 – схема управления исполнительным органом 6 с реле К1, К2 и К3

При подаче на реле напряжения (блок 1) срабатывает схема пуска 2, сигнал «0» на её выходе разрешает работу генераторов 3 и 4 (микросхемы) и начинается отсчёт времени. Одновременно схема пуска действует на блок 5, который без выдержки времени включает реле К1. После заполнения счётчика заданным количеством импульсов на выходе микросхемы генератора с делителем частоты 3 цепи временно за-

мыкающего контакта К2 появляется сигнал логической «1», в результате чего срабатывает реле К2. Одновременно начинается заряд конденсатора в схеме управления 5, срабатывает пороговое устройство и на выходе его появляется логический «0», вследствие чего якорь реле К2 отпадает. Время замкнутого положения контакта определяется при этом постоянной времени цепи заряда конденсатора, и его можно регулировать изменением сопротивления этой цепи.

Генератор и делитель частоты 4 замыкающего контакта К3 работает аналогично блоку 3, а управление этим контактом осуществляется так же, как и контактом реле К1.

Выпускаются и реле времени с определённым целевым назначением.

Так, электронное *реле времени «Старт»* (НПФ «Альянс – Электро»), предназначенное для работы в схемах автоматики (АВР, АПВ и пр.), осуществляет контроль наличия напряжения в электрических цепях и их соответствующее переключение при его исчезновении по истечении заданной выдержки времени от 1 до 40 с. Реле отличается высокой точностью отсчёта временных интервалов благодаря применению генератора базовых импульсов с кварцевой стабилизацией частоты. Максимально допустимая мощность нагрузки – 4 кВт.

#### 7.3.4.2. Реле тока и напряжения.

*Реле максимального тока* РСТ11 – РСТ14 предназначены для работы в цепях постоянного и переменного оперативного тока напряжением 220 В. Отсутствие оперативного напряжения приводит к отказу реле. Диапазон уставок по току для каждого типа реле составляет 1 : 4 в пределах от 0,05 до 120 А для всей серии. Отключающая способность контактов выходного реле не более 1 А в цепях постоянного и не более 2 А – в цепях переменного тока.

Принцип работы схемы реле поясняется на рис. 7.35.

Входной сигнал воспринимается промежуточным трансформатором и после выпрямителя (на схеме не показаны) поступает на вход схемы сравнения, содержащей пороговый элемент на операционном усилителе (DA1) и триггер Шмитта (DA2). Порог компаратора DA1 определяется напряжением на блоке резисторов \*R2, сопротивление которого можно изменять ступенями с помощью переключателей уставок (на рис. 7.35 не показаны). Для плавной подстройки уставки служит резистор R1.

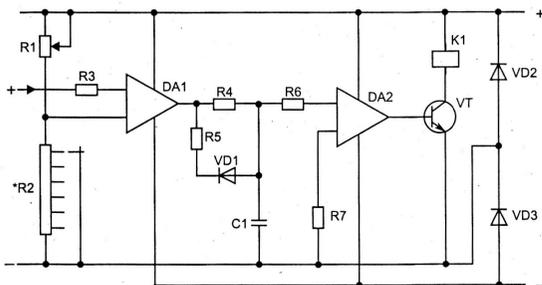


Рис. 7.35. К принципу работы реле РСТ11 – РСТ14

При отсутствии входного сигнала напряжение на выходе компаратора DA1 имеет максимальное положительное значение, до которого и заряжается конденсатор C1. При появлении на входе сигнала, превышающего порог компаратора, напряжение на выходе его меняет знак, и конденсатор C1 перезаряжается. Параметры цепи заряда – разряда выбраны таким образом, что с ростом амплитуды входного тока отрицательное напряжение на конденсаторе увеличивается, а положительное – уменьшается. При токе срабатывания реле отрицательное напряжение на конденсаторе достигает порога срабатывания триггера Шмитта, компаратор DA2 переключается и напряжение на его выходе становится положительным, вследствие чего открывается транзистор VT1 и срабатывает выходное реле K1.

*Реле переменного напряжения РСН 14 – РСН17.* Принципиальные схемы этих реле существенно не отличаются от описанного выше, рис. 7.35. Полный диапазон уставок по напряжению – от 12 до 400 В, потребляемая мощность – от 0,1 до 0,9 В·А. Реле РСН15, РСН17 работают на оперативном напряжении переменного тока, реле РСН14, РСН16 – на постоянном напряжении. Реле минимального напряжения РСН16 и РСН17 отличаются по схеме от реле максимального напряжения полярностью включения операционного усилителя DA1.

*Реле постоянного напряжения РСН11, РСН 12 и РСН18.* Реле серии РСН11 предназначены для применения в схемах контроля изоляции цепей постоянного тока напряжением 220 В, РСН12 – для контроля повышения уровня напряжения, а РСН18 – для контроля понижения напряжения в цепях постоянного тока напряжением 220 В. Оперативное напряжение реле РСН11 – 220 В переменного тока, для схем реле РСН12 и РСН18 оперативное напряжение не требуется. Диапазон изменения уставок реле РСН12 и РСН18 от 180 до 245 В ступенями не менее 5 В, реле РСН11 – от 1,4 до 32 В. Мощность, потребляемая реле при срабатывании, не превышает 6,5 Вт (6,5 В·А). Реле РСН11 имеет один замыкающий контакт, РСН12 и РСН18 – один замыкающий и один размыкающий контакты.

Реагирующий орган реле – двухполярного действия, выполнен на двух операционных усилителях с пороговой характеристикой, между которыми включён выпрямительный мост. При малом входном сигнале выходное напряжение первого усилителя близко к нулю, выпрямительный мост открыт и на выходе второго усилителя удерживается высокое отрицательное напряжение. При увеличении входного напряжения любой полярности напряжение на выходе первого усилителя резко возрастает и на выходе моста появляется положительное напряжение, переключающее второй усилитель. Высокое положительное напряжение на выходе открывает транзисторный ключ, в коллекторную цепь которого включено исполнительное электромеханическое реле. Ступенчатое регулирование уставок реле производится с помощью делителя напряжения на входе реагирующего органа, плавное – переменным резистором на входе операционного усилителя.

Схема реле РСН12 и РСН18 построена на операционном усилителе, работающем в режиме компаратора. Порог переключения компаратора задаётся опорным напряжением, снимаемым с резисторного делителя. Когда напряжение на входе реле меньше уставки, входное напряжение компаратора меньше опорного, а выходное не превышает 1 В. С увеличением входного напряжения до значения, при котором входное напряжение превысит опорное, компаратор переключается и на его выходе появляется высокий положительный потенциал. Выходным напряжением компаратора от-

крывается транзистор с обмоткой электромеханического реле в цепи коллектора, которое при этом срабатывает.

### 7.3.4.3. Реле тока дифференциальное РСТ15.

Реле РСТ15 используется в качестве чувствительного органа дифференциальных защит. Номинальный переменный ток 1 (5) А, оперативное напряжение постоянное 220 В. Реле отстроено от бросков тока намагничивания с аperiodической составляющей и от бросков тока с амплитудой, в несколько раз (до 6,6) превышающей амплитуду синусоидального тока срабатывания. Мощность, потребляемая цепью контроля, 2 В·А на фазу, цепью оперативного напряжения – не более 7 Вт. Реле имеет один замыкающий контакт. Длительно допустимый ток первичной обмотки – до 10 А, уравнильной – 5 А, контактов – 2,5 А.

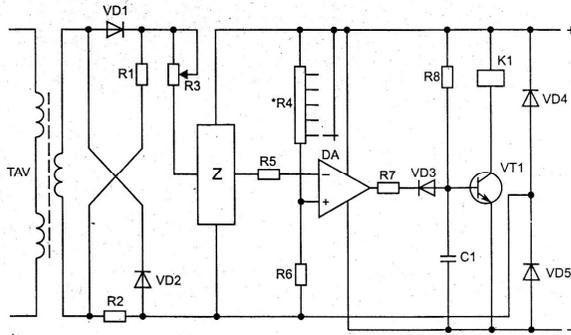


Рис. 7.36 Упрощённая принципиальная схема дифференциального реле тока

Выше отмечалось, что дифференциальная защита должна быть отстроена от бросков намагничивающего тока (БТН) в индуктивных элементах первичной цепи, особенно в трансформаторах. В схеме реле РСТ15 (рис. 7.36) блокировка от БТН достигается применением трансреактора (трансформатора с воздушным зазором) TAV и двухполупериодного выпрямительного моста на диодах VD1 – VD2. Трансреактор по своим динамическим характеристикам близок к дифференцирующему звену, т.е. напряжение на его вторичной обмотке пропорционально производной от тока в цепи его первичных (основной и уравнильных) обмоток. Это означает, что трансреактор передаёт без искажений синусоидальные составляющие (из которых в БТН наиболее выражены первая 50 Гц и вторая гармоники), подавляет аperiodическую и не пропускает постоянную составляющую. Выпрямленное напряжение подаётся на активный фильтр Z, состоящий из пассивной RC – цепи и операционного усилителя. Конфигурация RC – цепи и параметры фильтра выбраны таким образом, что он усиливает первую гармонику (в 2,2 раза), ослабляет вторую (в 3 раза) и пропускает без изменения постоянную составляющую. Установлено, что таким путём обеспечивается отстройка реле от переходных токов небаланса и БТН при токе срабатывания защиты не менее 0,5  $I_{ном}$ , чувствительность реле к броску тока намагничивания резко снижена.

С фильтра сигнал поступает на одноходовый компаратор, собранный на операционном усилителе DA, и далее – в схему временной задержки на R8 – C1. Порог срабатывания компаратора, а следовательно и уставка реле, задаётся резисторами \*R4. Когда входной сигнал отсутствует, напряжение на выходе DA и конденсаторе C составляет примерно – 13...14 В. При срабатывании компаратора напряжение на его выходе скачком изменяется на + 13...14 В, диод VD3 закрывается и конденсатор C начинает перезаряжаться. Когда напряжение на нём превысит смещение на базе транзистора, VT1 откроется и сработает выходное реле K1. Но если до этого момента компаратор возвратится в исходное положение, то конденсатор быстро разрядится через резистор R7 и транзистор не откроется.

При БТН компаратор успевает возвращаться каждый период основной гармонической тока, так что транзистор не открывается и реле не срабатывает. Транзистор открывается только при условии, что непрерывный сигнал от компаратора поступает в течение времени не менее одного периода (здесь 22 мс). Это условие выполняется при КЗ в зоне защиты, когда основная синусоидальная составляющая дифференциального тока достаточно велика и постоянная составляющая выпрямленного напряжения вызывает устойчивое срабатывание компаратора и выходного реле; чувствительность реле в этом случае максимальна.

#### ***7.3.4.4. Реле напряжения обратной последовательности РСН13 – 1.***

Реле предназначено для использования в качестве реагирующего органа в схемах защиты от несимметричных КЗ, а также для сигнализации при их возникновении. Контролируемая величина – трёхфазное линейное напряжение 100 В, оперативное напряжение – 100 В постоянного тока. Диапазон регулирования уставок от 6 до 24,6 В (линейное напряжение обратной последовательности), потребляемая мощность по цепи контроля 0,8 В·А (на фазу), оперативных цепей – до 7 Вт. Реле имеет один замыкающий и один размыкающий контакты на ток до 2,5 А (длительно).

Схема реле содержит на входе пассивный RC – фильтр напряжения обратной последовательности (см. выше). Реагирующий орган содержит два операционных усилителя, включенных по схеме двухходового компаратора. Первый из них задаёт уставку реле, а второй совместно с времязадающей цепью сглаживает пульсации сигнала, подаваемого на исполнительный орган. Когда напряжение на выходе фильтра превышает порог срабатывания реагирующего органа, компараторы переключаются и срабатывают транзисторный ключ и выходное электромеханическое реле.

#### ***7.3.4.5. Реле направления мощности РСМ 13.***

Реле предназначено для использования в РЗиА в качестве органа, реагирующего на значение и направление мощности. Номинальное контролируемое напряжение 100 В, оперативное постоянное 220 В. Диапазон изменения уставок от 2 до 500 Вт. Потребляемая мощность по цепям тока и напряжения порядка 1 В·А, по оперативной цепи 20 Вт.

Реле имеет один замыкающий и один размыкающий контакты на ток до 1А (постоянный) или до 2 А (переменный). Промежуточные трансформаторы TVL и TAL (рис. 7.37) преобразуют входные напряжения и ток реле в пропорциональные им напряжения. Амплитудно – импульсный модулятор UB1 и фильтр нижних частот UZ образуют времяимпульсный умножитель аналоговых сигналов. На один вход широтно – импульсного модулятора UB2 подаётся напряжение с выхода трансформатора

TAL, а на другой его вход – пилообразное напряжение генератора G. На выходе UB2 образуются прямоугольные импульсы, длительность каждого из которых определяется мгновенным значением входного тока реле. На один вход амплитудно – импульсного модулятора UB1 поступает напряжение с выхода UB2, на другой – с выхода трансформатора TVL. На выходе UB1 формируется импульсное напряжение, длительность каждого импульса которого пропорциональна мгновенному значению тока, амплитуда – мгновенному значению напряжения, а площадь – мгновенному значению полной мощности на входе реле. Постоянная составляющая этого напряжения, пропорциональная активной мощности на входе реле, выделяется фильтром низких частот UZ и сравнивается с опорным напряжением на компараторе UC. Компаратор выполнен таким образом, что в момент, когда входная мощность реле равна уставке, длительность импульсов выходного сигнала компаратора равна длительности пауз между ними. Выходное напряжение интегратора UI равно при этом нулю, а в общем случае полярность его зависит от знака разности длительностей импульсов и пауз. Это напряжение после порогового элемента TH поступает на реле К, которое срабатывает при одной полярности напряжения и возвращается при обратной.

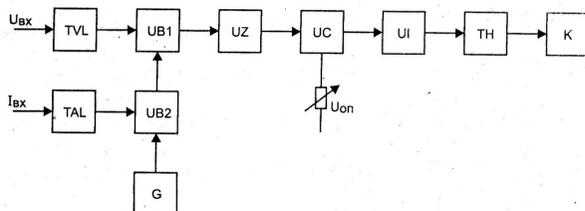


Рис. 7.37. Структурная схема реле РСМ13

#### 7.3.4.6. Реле контроля напряжения и угла сдвига фаз РСНФ-12.

Реле осуществляет контроль наличия напряжения на линии ( $U_L$ ) и шинах ( $U_B$ ) и угла сдвига фаз этих напряжений. Применяется в схемах автоматического повторного включения и синхронизации. Канал сравнения угла сдвига фаз между напряжениями  $U_L$ ,  $U_B$  с заданным значением угла имеет дискретную (через  $2^\circ$ ) шкалу уставок от 4 до  $90^\circ$ . Канал даёт разрешение на включение выключателя синхронизации при наличии напряжения на двух входах и при условии, что угол между ними равен или меньше угла уставки.

Канал измерения напряжения на линии имеет постоянную уставку 50%, канал измерения напряжения на шинах 85% номинального напряжения. Имеются также каналы контроля исправности отдельных цепей и др. Номинальное напряжение от шин и линии – однофазное, до 100 В, длительно допустимый ток контактов 2 А. Основная часть структурной схемы реле воспроизведена на рис. 7.38.

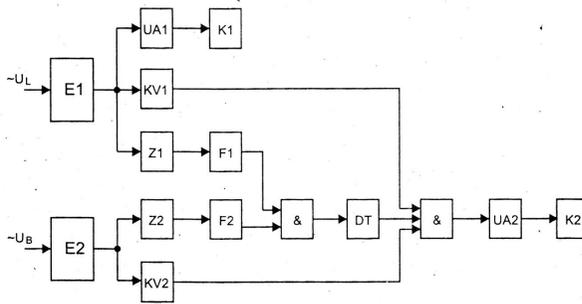


Рис. 7.38. Фрагмент структурной схемы реле РСНФ-12

Напряжения линии  $U_L$  и шин  $U_B$  подаются на изоляционно – согласующие элементы E1 и E2 с трансформатором на входе и компаратором на выходе каждого из них. На один из входов компаратора подано фиксированное напряжение уставки. Если напряжение линии меньше  $0,5U_{н}$ , то на выходе усилителя UA1 появляется напряжение, срабатывает реле K1 и подаётся сигнал «Отсутствие напряжения линии». Если напряжение на шинах больше  $0,85 U_{н}$ , то на выходе релейного элемента KV2 появляется сигнал, разрешающий действие логического элемента «И» в схеме определения угла фазового сдвига напряжений. Фильтры низких частот Z1, Z2 питают формирователи – ограничители F1, F2. При прохождении отрицательной полуволны измеряемого напряжения на входе ограничителей формируются стандартные прямоугольные импульсы напряжения, которые логически суммируются по «И» на входе схемы задержки на срабатывание DT. Время задержки определяет допустимый угол сдвига фаз, при котором сигнал успевает проходить на схему «И». Последняя обеспечивает срабатывание выходного органа (усилителя) UA2 и реле K2 при наличии напряжения линии и шин, значения которого превышают соответственно 50 и 85% номинального, и при угле сдвига фаз не более допустимого. При расхождении векторов напряжения линии и шин элемент времени DT возвращается в положение до срабатывания и далее срабатывать не успевает, так как необходимое для этого время превышает длительность периода. Реле K2 возвращается и появляется сигнал «Неисправность».

При несинхронном режиме напряжение линии с некоторой частотой скольжения смещается относительно напряжения шин, так что положения допустимого и недопустимого сдвига фаз чередуются. Если скольжение велико, реле K2 не работает. При определённом снижении скольжения выдержка времени элемента DT становится достаточной и реле K2 периодически срабатывает, переключая сигналы «Срабатывание реле сдвига фаз» и «Неисправность».

При отключении выключателя линии синхронизм, как правило, утрачивается, а иногда исчезает напряжение на линии. Вне зависимости от этого сигнал «Неисправность» не появляется, реле K1 и K2 не блокируются, при необходимости работает АПВ линии.

## 7.4.5. Релейная защита на базе микропроцессорных устройств.

### 7.4.5.1. Общие сведения.

В настоящее время получают широкое распространение устройства РЗиА на базе микропроцессоров – управляемых «сверхбольших» интегральных схем. Такие защиты реализуются уже не на дискретных релейных элементах, а в виде программ, закладываемых в память микропроцессорных систем.

Применение микропроцессорной техники для устройств РЗиА началось в 80-х гг. XX в. Первые контроллеры были созданы «Шнайдер Групп», АВВ и другими ведущими фирмами – производителями электротехнического оборудования. Создание РЗиА на базе микропроцессоров произошло в связи с существенным снижением стоимости компонентов микропроцессорной техники и успешным внедрением их в различные виды промышленного электрооборудования.

Микропроцессорные устройства РЗиА имеют серьёзные преимущества перед аппаратурой на электромеханических или электронных реле:

1. Повышенная надёжность, которая обеспечивается высокой степенью интеграции применяемых микросхем.
2. Ускорение отключений за счет снижения ступеней селективности.
3. Реализация сложных алгоритмов работы РЗиА программным способом, с возможностью корректировки и без привлечения дополнительного оборудования.
4. Программная перестройка параметров (уставок, характеристик) срабатывания защиты при изменении конфигурации сети, а также дистанционно с компьютера верхнего уровня.
5. Значительно меньшие габариты и масса в сравнении с устройствами РЗиА на основе отдельных электромеханических или статических (электронных) реле.
6. Большой объём и возможность длительного хранения информации об аварийных процессах в защищаемых сетях, о расходе электроэнергии, работе электрооборудования распределительных устройств и пр.
7. Возможность полной самодиагностики устройства.
8. Универсальность аппаратного исполнения для различных видов защит.

В итоге применение микропроцессорных устройств РЗиА существенно повышает бесперебойность электроснабжения потребителей и уменьшает последствия аварий электроустановок. Широко используются цифровые терминалы зарубежных и отечественных фирм типов SEPAM («Шнейдер электрик»), SIPROTEC («Сименс»), Сириус («Радиус») и др.

### 7.4.5.2. Принципы построения микропроцессорных устройств.

**Микропроцессор.** Основным узлом микропроцессорных устройств является микропроцессорный комплект, а «мозгом» его – собственно микропроцессор. В любом микропроцессоре имеются четыре основных элемента: устройство управления, арифметико – логическое устройство, память и устройство ввода – вывода.

*Арифметико – логическое устройство (АЛУ)* по командам устройства управления выполняет арифметические и логические операции над данными, поступающими из устройств памяти или ввода – вывода. Оба устройства, скомпонованные на одной интегральной схеме, образуют центральный процессор (ЦП), выполняющий все функции управления и обработки данных.

*Устройства ввода – вывода* (УВВ) обеспечивают связь ЦП с внешними, или периферийными, устройствами.

*Устройство памяти*, или *запоминающее устройство* (ЗУ) – это место хранения программ и данных.

Центральный процессор связывается со всеми устройствами либо посредством памяти, либо через общие шины. Физически шины представляют собой печатные проводники или кабели, к которым подключаются все блоки системы. Однонаправленная *адресная шина* даёт возможность выбирать информацию или блок, двунаправленная *шина данных* – передавать её в виде команд, адресов и данных. Все операции инициируются центральным процессором. Программа и данные представляются в двоичной форме, называемой *машинным кодом*.

Минимальное количество информации – один разряд двоичного числа называют *бит* (от англ. binary digit – бинарная цифра), последовательность бит образует *слово*. Запись десятичных цифр и алфавитных символов в виде двоичных слов называют *кодированием*. Слова хранятся в специальных блоках – регистрах, представляющих собой набор триггеров, обычно D – типа. По существу весь центральный процессор представляет собой набор различных регистров.

*Устройство управления* содержит два регистра – регистр команд и программный счётчик – и логические схемы для декодирования команд. Назначение регистра команд – сохранять текущее слово команды, согласно которой процессор действует в данный момент. Функции программного счётчика заключаются в том, чтобы образовывать слово, представляющее в памяти адрес следующей команды. Устройство непрерывно осуществляет поочерёдное извлечение команд из памяти и их исполнение, пока не будет достигнут конец программы.

*Арифметико – логическое устройство* представляет собой сложную двухвходовую схему, комбинация сигналов на входе которой однозначно определяет сигнал на выходе. Схема состоит только из логических элементов и потому быстрдействие её ограничивается лишь временем прохождения сигнала от входа к выходу (порядка наносекунд). Основные арифметические операции, выполняемые в АЛУ, это сложение и вычитание. АЛУ взаимодействует со специальным регистром, который называется аккумулятором и хранит одно слово двоичной информации, например, одно из слагаемых или результат операции. Сдвиг двоичного числа в аккумуляторе на одну позицию влево приводит к его удвоению, вправо – делит его пополам (подобно умножению или делению на 10 при сдвиге на один разряд в десятичной системе). Операции сдвига широко используются в подпрограммах умножения, деления и др.

*Устройство памяти*. Память состоит из элементарных ячеек, организованных в некий массив. Каждый элемент памяти – это обычный RS – триггер, способный хранить один бит информации. Группа из восьми битов, обрабатываемая как единое целое (слово), называется *байт*, а 1024 ( $2^{10}$ ) байта – килобайт, Кбайт. Стандартная ячейка памяти имеет ёмкость 1 байт. Ёмкость памяти из 1024 ячеек обозначают как 1К. Для адресации к ним нужно иметь 10 –битный адрес. При 12- битном адресе максимальная ёмкость памяти должна быть  $2^{12} = 4096$ , т.е. 4 К, при 16 – разрядном – 64 К.

Различают основную (внутреннюю) и внешнюю память. *Внутренняя память* – это запоминающие устройства, подключённые непосредственно к шинам адреса и дан-

ных, *внешние* же запоминающие устройства подключаются через устройства ввода – вывода и могут хранить большой объём информации (магнитные ленты, диски).

Различают также *постоянную* и *оперативную* память. *Постоянное запоминающее устройство* (ПЗУ, или ROM, – от англ. Read Only Memory, т.е. память только для чтения) позволяет только считывать информацию, но не допускает даже частичного её изменения (записи). ПЗУ характеризуется большим объёмом хранимой информации, которая не разрушается при отключении питания. *Оперативное запоминающее устройство* (ОЗУ, или RAM – Random Access Memory, т.е. память с произвольным доступом) позволяет как считывать информацию, так и записывать новую. «Произвольный доступ» означает, что к информации можно обращаться, определяя адреса в любом порядке. Основным недостатком всех полупроводниковых ОЗУ является то, что при исчезновении напряжения питания записанная в них информация утрачивается. В ПЗУ хранятся, в частности, программы, в ОЗУ – данные. Микропроцессор может быть выполнен на одном кристалле с ПЗУ и ОЗУ, что повышает помехозащищённость устройства.

ПЗУ представляет собой матрицу диодов или транзисторов. В диодных ПЗУ наличие диода в данной точке соответствует записи в элементе памяти логической 1, а отсутствие – записи 0. Запись информации (программирование) в диодное ПЗУ производится путём выжигания ненужных диодов лазерным или электронным лучом. Наибольшее распространение получили ПЗУ с транзисторными элементами памяти на биполярных или МОП – транзисторах. Здесь соединение одного из электродов с землёй (металлизация) соответствует 0, изоляция от земли – 1. При изготовлении ПЗУ на кристалле формируется базовая матрица без металлизации, затем с помощью специальной маски либо производится металлизация для формирования 0, либо транзистор остаётся неподключённым, если записывается 1. Заложённая изготовителем программа таких ПЗУ является *жёсткой* и изменению не подлежит. Выпускаются также ПЗУ, *программируемые пользователем* (ППЗУ), в которых контактные соединения выполнены тонкими проводящими перемычками, наличие которых соответствует 0, отсутствие – 1. Ненужные перемычки расплавляются в процессе программирования импульсами тока с помощью специального устройства – программатора. Наконец, существуют *перепрограммируемые* ПЗУ с возможностью стирания хранимой информации и повторного программирования (СПЗУ). В зависимости от типа СПЗУ стирание производится электрическим импульсом или ультрафиолетовым облучением.

*Устройства ввода – вывода* (внутренние). При вводе и выводе информации центральный процессор подключается к шине данных на очень короткое время (ок. 1 мкс). Чтобы за это время можно было надёжно записать или считать информацию, устанавливают фиксаторы информации, так наз. *защёлки*. Эту функцию выполняют регистры, которые осуществляют временное хранение информации и сопряжение микропроцессорной системы с внешними устройствами при посредстве буферов. Буферный регистр с контроллером ввода – вывода образует соответственно *порт ввода* или *порт вывода*.

В современных устройствах РЗиА применяются 16- или 32- разрядные микропроцессоры с высокой тактовой частотой, позволяющие выполнять обработку информации за время, меньшее дискретности выборки информации из АЦП. В сложных устройствах используют несколько микропроцессоров.

**Внешние устройства.** Микро-ЭВМ связаны с внешним миром посредством периферийных устройств (магнитные носители, дисплеи, АЦП и ЦАП, отдельные регистры и пр.). Для их функционирования требуются определённые управляющие сигналы, протоколы и способы обмена с микро-ЭВМ, и потому шины обмена информацией подключаются не непосредственно к периферийному устройству, а через так наз. *интерфейс* (лат. *inter* – между). Под этим термином понимают совокупность программных и аппаратных средств сопряжения, установления связи и обмена между компонентами системы.

*Блоки питания* микропроцессорных устройств построены на базе высокочастотных преобразователей напряжения с бестрансформаторным входом, позволяющим использовать постоянное или переменное напряжение питающей сети. Блок подключается к источнику аварийного питания распределительного устройства. Выходные параметры поддерживаются в широком диапазоне питающего напряжения от –60 до +30% номинального. Блок питания обеспечивает стабилизированное напряжение питания микропроцессорного набора –5 В, интерфейса аналоговых сигналов +15, –15 В, релейных входов и выходов 24 В. При исчезновении питающего напряжения блок формирует сигналы, препятствующие ошибочной работе РЗиА, а при восстановлении запускает программу.

*Устройства ввода информации.* Микропроцессорные устройства получают информацию в виде аналоговых, цифровых и логических сигналов. Устройства ввода преобразуют эти сигналы в формат, пригодный для чтения микропроцессором. Аналоговые сигналы (напряжение, ток, температуру и др.) получают от стандартных датчиков систем электроснабжения – в частности, измерительных трансформаторов тока (1 или 5 А) и напряжения (100 В), и преобразуют их (трансформируют и нормируют) для ввода в АЦП. Кроме АЦП, в интерфейс аналоговых сигналов входит *мультиплексор*, позволяющий использовать один преобразователь для нескольких входных сигналов. Частота выборки до 2 кГц позволяет получить осциллограммы аварийных процессов. Устройство ввода может быть выполнено на одном микропроцессоре (например, SPAC 800), который осуществляет сравнение входных сигналов с уставками, выработку аварийных сигналов для основного микропроцессора и запоминание параметров аварийного режима. Для потенциальной развязки и нормирования входных аналоговых сигналов применяют трансформаторы, так как они имеют высокую надёжность и низкую стоимость, хотя и низкую временную и температурную стабильность.

Цифровая информация передаётся по сетевому входу, который может быть выполнен в виде проводной или оптоволоконной линии. Вход используется для передачи сигналов сетевой автоматики, дистанционного управления защищаемым фидером, сигнализации, измерительной информации.

Для ввода сигналов аппаратуры защищаемого фидера (реле, блок – контактов выключателя и пр.) применяют входные оптронные развязки, позволяющие обеспечить потенциальное разделение и нормирование входных логических сигналов с учётом требований помехозащищённости РЗиА. Питание сигнальных цепей осуществляют или от блоков питания микропроцессорных устройств РЗиА или (и) от сети управления или сигнализации распределительного устройства.

*Устройства вывода сигналов.* Микропроцессорные устройства выдают команды на выходные реле РЗиА, работающие как в цепях управления коммутационными ап-

паратами, так и в схемах автоматики и сигнализации. Информация о состоянии РЗА и выключателя защищаемого присоединения передаётся также по сетевому каналу.

*Аппаратура ручного ввода и отображения информации* располагается обычно на передней панели блока РЗА. Для ручного ввода используются кнопки или клавиатура. Количество кнопок на самом микропроцессорном устройстве невелико, так как для ввода большого количества информации применяют внешние устройства – *контроллеры*, пульты ввода, имеющие развитую клавиатуру и дисковые накопители информации. Выводится информация на светодиодные индикаторы, графические дисплеи, жидкокристаллические цифробуквенные табло. Возможно применение одновременно дисплеев и светодиодных индикаторов с целью формирования сигналов срабатывания выходных реле защиты и сигнализации. Это позволяет получить информацию о действии микропроцессорных устройств без вызова на дисплей, с использованием кнопок управления. Дисплей показывает текущие значения фазных токов, а при срабатывании защиты появляются значения аварийных токов, которые фиксируются при отключении защищаемого присоединения. В памяти процессора сохраняется несколько значений аварийных токов, которые можно вызвать на дисплей.

Принцип использования микропроцессорного устройства в релейной защите линии иллюстрируется рис. 7.39.

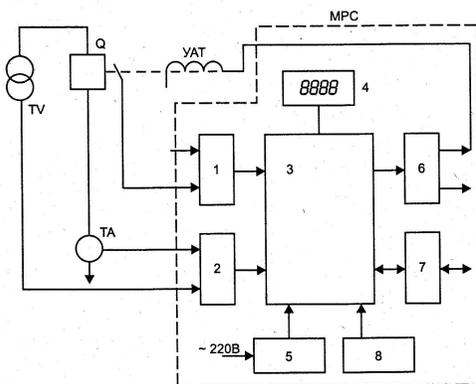


Рис. 7.39. Структурная схема микропроцессорного устройства (МРС) релейной защиты:

1 – интерфейс ввода дискретных сигналов; 2 – интерфейс ввода аналоговых сигналов; 3 – микро-ЭВМ; 4 – дисплей; 5 – блок питания; 6 – блок релейных выходов; 7 – сетевой интерфейс, 8 – клавиатура

#### 7.4.5.3. *Функции, выполняемые микропроцессорными устройствами РЗА.*

Микропроцессорные устройства выполняют функции защиты и управления элементами присоединений, а также функции системной автоматики распределительного устройства. Производители стремятся создать комплектные многофункциональ-

ные устройства РЗА, пригодные для использования в любых присоединениях от 110 до 0,4 кВ. Эта тенденция объясняется тем, что аппаратное исполнение соответствующих микропроцессорных комплектов отличается несущественно и требуется только корректировка программ, а по стоимости многофункциональные устройства, так называемые терминалы, приближаются к микропроцессорным реле. Для защиты некоторых видов электрооборудования (электродвигатели, трансформаторы и др.) остаются специализированные устройства, которые могут представлять собой как узел многофункционального терминала, так и самостоятельное устройство, например, регулятор напряжения силового трансформатора.

Функциональные возможности микропроцессорных устройств РЗА обеспечивают полный комплекс защиты линий 6 – 35 кВ.

**7.4.5.4. Терминалы SEPAM (Schneider Electric) имеют 16 типов различных времятоковых характеристик и набор функций защит.**

1. Многоступенчатая токовая защита (МТЗ).

Ступени МТЗ имеют обратнoзависимые характеристики «время – ток», соответствующие требованиям МЭК 255-4, или им подобные. Общее выражение для основных характеристик можно представить в виде

$$t = A T_{уст} / (K^n - 1)^m,$$

где  $t$  – время срабатывания реле, с;

$K$  – кратность тока в реле по отношению к току уставки;

$T_{уст}$  – уставка по времени, с;

$A, m, n$  – коэффициенты, задаваемые для каждого вида характеристик определенной степени крутизны, а именно:

$A = 0,14; m = 1; n = 0,02$  – простая зависимая характеристика;

$A = 13,5; m = 1; n = 1$  – сильно зависимая характеристика;

$A = 80; m = 1; n = 2$  – очень сильно зависимая характеристика.

Тому же выражению в сумме с  $T_{уст}$  соответствуют при:

$A = 1,25; m = 1,8; n = 1$  – пологая характеристика;

$A = 0,033; m = 3; n = 1$  – крутая характеристика.

Общее выражение соответствует также и тепловой защите без функции памяти при  $A = 35; m = 1; n = 2$ . Несколько более сложной формулой, учитывающей значение тока до аварии, описывается характеристика тепловой защиты с частичной памятью.

2. Максимальная токовая защита с корректировкой по напряжению.

Защита выполняется с пуском по напряжению с одной уставкой или понижает уставку срабатывания МТЗ в зависимости от снижения трёхфазного напряжения. В устройствах SEPAM 2000, например, изменение токовой уставки производится по формуле

$$I = [(4 U / U_{ном}) - 0,2] I_{уст} / 3.$$

3. Защита от замыканий на землю.

Используются датчики тока нулевой последовательности или трансформаторы фазных токов, соединённые по схеме фильтра нулевой последовательности. Защита может быть выполнена с независимой выдержкой времени или с зависимой характеристикой «время – ток».

4. Токсовая направленная защита – выполняется с независимой или с обратнoзависимой выдержкой времени.

5. Направленная защита от замыканий на землю.

6. Максимальная токовая защита обратной последовательности с независимой или обратнoзависимой выдержкой времени.

7. Защита синхронного электродвигателя. Осуществляются защита от затянувшегося пуска, асинхронного хода, ограничение числа запусков с учётом достигнутой температуры, дифференциальная защита статора.

8. Защита минимального и максимального напряжения.

9. Защита по максимальной активной и реактивной мощности.

10. Защита по минимальной и максимальной частоте с независимой или обратнoзависимой выдержкой времени.

Терминал SEPAM серии 20 предназначен для использования в простых защитах, основанных на измерении токов или напряжений. SEPAM серии 40 позволяет одновременно измерять токи и напряжения и осуществить направленные защиты, а также различные функции автоматики и учет электроэнергии. Устройства SEPAM 80 с более широким набором функций могут быть использованы также и для защиты силовых трансформаторов 110 кВ. Объекты защиты обозначаются литерами S – подстанция, T – трансформатор, M – двигатель, B – сборные шины, C – конденсатор, G – генератор.

В составе SEPAM имеется функция «логическая селективность», которая позволяет обеспечить минимальное время срабатывания защит и отключения выключателя при КЗ. Аппаратную поддержку функции осуществляет таймер, который снимает сигнал логической блокировки с последующей защиты, если за время  $t = 0,2$  с выключатель не отключится (см. рис.7.40).

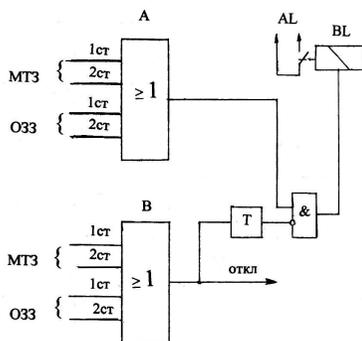


Рис. 7.40. Применение функции «логическая селективность» с максимальной токовой защитой и защитой от замыкания на землю в терминале SEPAM M20:

А и В – группы защит, без выдержки времени и с выдержкой времени, соответственно; Т – таймер; ВL – исполнительное реле; АL – сигнал логической блокировки; 1 ст, 2 ст – ступени селективности защиты.

Расширяется использование микропроцессорных устройств РЗиА для сетей 110 кВ, в том числе дистанционных и токовых защит с высокочастотной блокировкой, дифференциально – фазных защит линий.

Микропроцессорные устройства РЗиА используются и для построения систем нижнего уровня АСУ энергообъектов. В системной автоматике микропроцессорные устройства позволяют с помощью программируемой логики гибко и оперативно реагировать на изменение конфигурации сетей в нормальном и аварийном режимах.

**7.4.5.4. Серия SIPROTEC 4 фирмы SIEMENS** – это линейка современных микропроцессорных устройств защиты, управления и контроля с интерфейсами для дистанционного управления и контроля и гибкими функциональными возможностями. Использование этих устройств позволяет обеспечить экономичное управление работой электрооборудования и надежное электроснабжение потребителей. Неисправности устройства быстро обнаруживаются и распознаются с помощью встроенной функции самодиагностики. Возможен выбор модификации устройства с функцией защиты или управления или с обеими этими функциями. В зависимости от выполняемых функций устройства снабжаются панелями управления с графическим или четырехстрочным текстовым дисплеем. Данные, передаваемые при контроле, могут обрабатываться в устройстве управления подстанциями SICAM SC, отображаться в системе контроля и управления подстанциями SICAM WinCC и поступать через интерфейс дистанционного управления на центр управления верхнего уровня. При управлении операции переключения могут осуществляться как с сетевого центра управления, так и с устройств системы управления подстанциями. Для установки параметров и управления устройствами SIPROTEC от PC служит программный комплект DIGSI 4; в качестве интерфейса пользователя в нем используется окружение операционной системы Windows.

Устройства этой серии оснащены внешними последовательными интерфейсами, предназначенными для синхронизации и управления временем, для подключения дистанционных средств диагностики и PC с программой DIGSI 4, а также дополнительными интерфейсами для специальных приложений, например, при использовании дифференциальной защиты.

Отдельные устройства серии доступны с различными наборами функций, которые окончательно определяются пользователем с помощью программы DIGSI 4. Для создания логических схем в графическом виде (например, при задании условий блокировки или контроля предельных значений измеряемых величин) используется программа DIGSI 4 CFC. Для создания собственных логических схем могут быть использованы общие логические блоки И, ИЛИ и др. и аналоговые блоки управления, например, уставками: ВЫШЕ, НИЖЕ и др. Блоки соединяются между собой для формирования законченных логических программ. В диалоговых окнах определяют все необходимые параметры электроустановки, как то: системные данные (частота, напряжение и пр.); данные измерительных трансформаторов тока и напряжения; данные линейного выключателя. Для удобства переключения наборы параметров разделены на четыре группы уставок А-D. При выборе функций конкретного устройства определяется набор сообщений, отображаемых в программе DIGSI 4 или на па-

нели управления. В первой различают рабочие сообщения (о переключениях, о контроле), аварийные (о КЗ, ОЗЗ и т.п.) и текущие сообщения (о состоянии электроустановки, об операциях переключения и т.д.). В программе DIGSI 4 или на панели управления отображаются также результаты измерений контролируемых величин (их первичные и вторичные значения в единицах СИ и в процентах от номинальных значений), статистические данные, например, число срабатываний выключателя, и значения других величин, вычисляемые устройством.

Ниже в качестве примера дается краткое описание области применения, особенностей и функций устройства SIPROTEC 4 7SJ63 (далее – устройство).

#### Структура устройства.

*Аналоговые входы.* Измерительные входы преобразуют сигналы от трансформаторов тока и напряжения до уровней, позволяющих производить их обработку.

Устройство имеет четыре входа по току, три из которых используются для измерения фазных токов, а четвертый для различных иных целей, например, для измерения токов нулевой последовательности. Три входа по напряжению могут использоваться для измерения фазных или линейных напряжений или напряжения нулевой последовательности  $3U_0$ . После преобразования аналоговые сигналы передаются на усилители с высокоомным входом, преобразуются в АЦП и поступают на вход микропроцессорной системы, где цифровые сигналы обрабатываются по специальным алгоритмам.

*Микропроцессорная система* выполняет следующие функции:

- подготовка и непрерывный контроль измеряемых величин;
- проверка условий срабатывания защит;
- оценка предельных значений контролируемых величин;
- выдача команд управления (включение, отключение и др.) и передача их в коммутационные аппараты;
- регистрация сообщений о событиях, повреждениях, управляющих воздействиях;
- управление операционной системой и внутренними функциями (например, интерфейсы, часы реального времени и др.).

*Двоичные входы и выходы.* На двоичные входы микропроцессора поступает внешняя информация о блокировке ступеней защиты, о положении выключателей, а выходные команды служат для управления внешним оборудованием (выключателями, устройствами защиты, автоматики и сигнализации) посредством контактной аппаратуры.

На *лицевой панели* устройства расположены светодиоды и экран дисплея для отображения информации об измеряемых величинах, сообщениях и состоянии всего устройства. С помощью встроенной пленочной клавиатуры можно получить доступ к находящейся в устройстве информации, а также осуществлять управление выключателями и другим оборудованием. Кратковременные (до 50 мс) перерывы в питании компенсируются за счет встроенного конденсатора.

*Питание* устройства может производиться напряжением от 24 до 250 В постоянного или 115 В переменного тока.

#### Применение.

Устройство может использоваться для распределительных и питающих линий электропередачи любого класса напряжения в сетях с различными режимами работы нейтрали (изолированной, заземленной, заземленной через низкоомное сопротивление).

ние, компенсированной), в радиальных и кольцевых сетях, для линий с односторонним или многосторонним питанием, а также для защиты асинхронных двигателей любой мощности. Устройство реализует все необходимые функции для управления, защиты и контроля положения выключателя. Оно может быть использовано также в качестве резервной защиты.

*Защитные функции.* Основной функцией устройства данного типа является ненаправленная максимальная токовая защита. Она имеет четыре ступени с независимой времятоковой характеристикой, две из которых предназначены для фазных токов и две для токов замыкания на землю, но может использоваться и без выдержки времени в качестве отсечки по току. Можно также выбрать и использовать необходимую стандартную характеристику.

Ненаправленная МТЗ может быть дополнена направленной, а также защитой от отказа выключателя и от ОЗЗ. Дополнительные функции включают в себя токовую защиту обратной последовательности, АПВ, тепловую защиту, защиту от повышения или понижения напряжения или частоты. Для двигателей могут быть использованы защита пусковых режимов, блокировка от многократных включений и контроль уменьшения тока. Кроме того, в устройство включен локатор для определения места повреждения линии.

*Функции управления.* Информация о состоянии электрооборудования подстанции передается путем подключения блок-контактов коммутационных аппаратов к двоичным входам устройства. Эта информация может быть использована для задания блокировок или оценки возможности управления. Количество первичных аппаратов, которыми может управлять устройство, ограничивается только числом имеющихся в нем двоичных входов и выходов.

Возможно ограничить доступ к управлению при проверке полномочий для управления (местное, дистанционное, от DIGSI 4) или режима действия (с блокировками или без них), а также с помощью пароля. Обработка условий блокировки переключения (например, при ошибочном переключении защиты) может производиться с помощью встроенных логических функций.

*Сообщения и измеряемые величины.* Измеряемые значения и вычисленные величины могут быть отображены на экране дисплея и переданы через последовательные интерфейсы. Сообщения могут быть выведены на программируемый набор светодиодов на лицевой панели, отработаны выходными реле и переданы через последовательные интерфейсы.

*Передача информации.* Для передачи информации во внешние устройства (PC, SCADA) используются последовательные интерфейсы. С помощью управляющей программы DIGSI 4 можно передавать уставки и конфигурирование в устройство, просматривать текущие величины, сообщения, снимать осциллограммы.

#### Особенности

- Мощная 32-разрядная микропроцессорная система.
- Комплексный цифровой способ обработки измеряемых величин и управления, от считывания и АЦП до выдачи управляющих команд.
- Полное электрическое разделение внутренних систем устройства от цепей измерения, управления и питания.
- Полный набор необходимых функций для защиты линий, фидеров, электродвигателей и систем шин.

- Постоянное вычисление и отображение измеряемых величин на лицевой панели устройства.
- Простота обслуживания устройства с помощью встроенной панели управления или внешнего РС с управляющей программой DIGSI 4.
- Записи информации можно использовать для анализа или поиска неисправностей.
- Связь с контроллером подстанции или с системой SCADA через модем, шину данных или оптоволоконный кабель.
- Постоянный контроль измеряемых величин, а также самоконтроль состояния аппаратного и программного обеспечения.

#### Набор функций.

##### *Максимальная токовая защита.*

- Две ступени максимального тока с независимой выдержкой времени и ступень с обратной зависимой времятоковой характеристикой, обе для фазной и земляной защит.
- Возможность задания стандартных или определяемых пользователем временных характеристик.
- Возможность блокировки защиты шин или линии.
- Ограничение бросков тока при включении трансформатора.
- Быстродействующее отключение выключателя при включении его на КЗ.

##### *Направленная МТЗ.*

Две ступени направленной МТЗ с независимой и одна ступень с обратной зависимой временной характеристикой, обе для фазной и земляной защит. Направление для каждой фазы определяется независимо при междуфазных повреждениях и при замыканиях на землю.

##### *Загрубление токовых защит при включении.*

Осуществляется динамическая настройка параметров срабатывания и выдержек времени на отключение для МТЗ при длительно отключенной нагрузке. Условия для загрубления токовых защит при включении выключателя наступают в случае, когда он находился в отключенном положении в течение длительного периода времени.

##### *Защита от ОЗЗ.*

- Напряжение  $3 U_0$  вычисляется по трем фазным напряжениям или измеряется на выходе трансформатора напряжения.
- Предусмотрены две ступени защиты от ОЗЗ с независимой выдержкой времени.
- Обеспечивается высокая чувствительность по току срабатывания (до 3 мА).
- Вид времятоковой характеристики может задаваться пользователем.
- Две ступени защиты от ОЗЗ могут действовать как ненаправленные, в прямом или обратном направлении.
- Определение направления повреждения производится путем вычисления активной или реактивной составляющих мощности нулевой последовательности.

##### *Токовая защита обратной последовательности.*

Предусмотрены две ступени с независимой и одна ступень с обратозависимой временной характеристикой.

### *Защита двигателя.*

- Пуск разрешается только в том случае, если ротор имеет достаточный запас по температуре, вычисленной на основе тока статора.
- Учитывается специфика пускового и тормозного режимов.
- Запрещение пуска может быть снято при необходимости аварийного запуска.

### *Защита по напряжению.*

Предусмотрены две ступени защиты от понижения напряжения, которая может блокироваться, и отдельная защита от повышения напряжения.

Напряжение возврата можно регулировать.

### *Частотная защита.*

Четыре ступени могут независимо настраиваться на срабатывание при повышении или понижении частоты с соответствующими выдержками времени.

### *Тепловая защита.*

- Превышение температуры защищаемого оборудования вычисляется с помощью тепловой модели, которая учитывает поступление и потери энергии.
- Уставка времени вводится для вращающихся и остановленных двигателей.
- Уровни срабатывания сигнализации устанавливаются в зависимости от повышения температуры и тока.

### *Защита от отказа выключателя (УРОВ).*

- Отказ выключателя определяется по протеканию тока после выдачи команды на отключение или по положению выключателя.
- УРОВ срабатывает при действии любой защитной функции на отключение выключателя (внутренний пуск), через двоичный вход от внешних защитных устройств (внешний пуск) или от встроенной функции управления (управляемый пуск).

### *Автоматическое повторное включение.*

- Выполняются один или несколько циклов.
  - Длительность бестоковой паузы для первых четырех циклов может задаваться независимо для каждого из них, для остальных – такая же, как для четвертого цикла.
  - Выбор ступеней пуска АПВ можно осуществить отдельно для фазных и земляных защит.
  - Возможен контроль работы выключателя в течение цикла АПВ.
- ### *Определение места повреждения.*
- Запуск этой функции может осуществляться по команде отключения или ее возврату, по действию защитной ступени, по внешней команде.

### *Порядок чередования фаз.*

Задание порядка чередования фаз производится уставкой (статическое) или с помощью двоичного входа (динамическое).

### *Функции, определяемые пользователем.*

- Для создания требуемых функций предусмотрена возможность логического объединения внутренних и внешних сигналов.
- Обеспечивается возможность программирования всех общих логических функций (И, ИЛИ, НЕТ и др.).
- Осуществляется обработка измеряемых величин, добавление нелинейной характеристики для соответствующих входов, контроль отклонения от нуля.

#### *Функции контроля.*

- Работоспособность устройства повышается благодаря самодиагностике внутренних измерительных цепей, блока питания, аппаратного и программного обеспечения.
- Осуществляется контроль вторичных цепей измерительных трансформаторов тока и напряжения и цепей отключения.
- Контролируется порядок чередования фаз.

#### *Управление выключателем.*

• Выключатель может быть отключен или включен с помощью управляющих или программируемых клавиш, через SCADA или интерфейс пользователя с подключенными к нему РС и программой DIGSI 4.

- Осуществляется контроль положения выключателя и выполнения условий блокировки.

#### *Другие функции.*

- Отсчет времени; часы могут быть синхронизированы с помощью внутренних или внешних сигналов.
- Запись и сохранение данных о последних восьми повреждениях.
- Запись, сохранение и передача осциллограмм.
- Запись числа операций и отключенных токов по каждой фазе выключателя.
- Фиксация времени работы защищаемого оборудования под нагрузкой.
- Помощь при наладке, а именно: контроль соединения, определение направления, запуск регистратора.

## Глава 8.

# Наладка устройств релейной защиты и автоматики

### 8.1. Проверка элементов РЗА

#### 8.1.1. Электромеханические реле

##### 8.1.1.1. Общие сведения.

*Механическая часть.* Подвижная система. Состояние механической части реле и контакторов в целом оценивается путём сравнения с другими аппаратами данного типа.

Отсутствие затирания подвижной системы проверяется подтягиванием и отпусканием якоря, после чего система должна свободно и чётко вернуться в исходное положение. Если люфт в осях отсутствует или превышает  $0,15 \dots 0,20$  мм, контактный мостик следует заменить. Зазор между полкой втянутого якоря и магнитопроводом должен составлять  $0,6 \dots 0,7$  мм. Упоры должны быть надёжно зафиксированы, с достаточным трением в резьбе. Положением одного упора определяется ток срабатывания реле, другого – коэффициент возврата. Необходимое трение, не позволяющее указателю уставки самопроизвольно сдвигаться с заданного положения на шкале, обеспечивается затяжкой гайки или прогибом лапок удерживающей планки, в зависимости от конструкции реле.

*Контакты.* Работа контактов проверяется выборочно или при возникновении сомнений в её правильности по следующим факторам.

Линейный контакт должен осуществляться по всей ширине, без просвета. При замыкании и размыкании подвижный контакт должен скользить по неподвижному.

Раствор контактов – кратчайшее расстояние между разомкнутыми контактами – измеряется с помощью щупов. Регулирующим элементом (рис.8.1,а) является пара винт – гайка 1. Если изменить положение гайки на винте, изменится и расстояние А, т.е. раствор контактов.

Провал контакта – это расстояние, на которое может сместиться место касания контактов при полном замыкании, если удалить неподвижный контакт. Провал контакта В (рис.8.1,б) регулируется ходом якоря, а следовательно, и траверсы 2, на которой закреплён подвижный контакт. Поскольку непосредственно измерить провал практически невозможно, контролируют какой – либо другой размер, жёстко связанный с провалом. Считается, что контакт следует заменить, если этот размер уменьшился вдвое против первоначального.

Начальное сжатие – это усилие, создаваемое контактной пружиной в точке первоначального касания контактов и характеризующее упругость пружины в разжатом состоянии. Для определения этого усилия между контактами помещают полоску папиросной бумаги и с помощью динамометра оттягивают подвижный контакт до освобождения полоски.

Конечное нажатие характеризует давление контактов при полностью включённом аппарате. При недостаточном нажатии контакты подгорают, при увеличенном – работают нечётко. Проверка производится аналогично.

Значения указанных параметров регламентируются изготовителем аппарата.

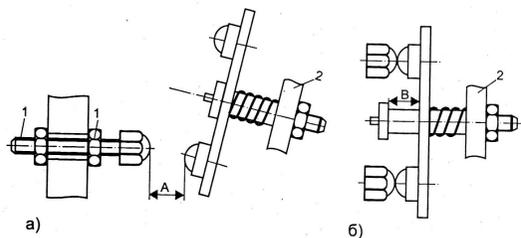


Рис.8.1. Измерение раствора (а) и провала контактов (б)

Контакты с дефектами поверхности зачищают бархатным надфилем и полируют воронилом (гладкой стальной пластиной). Загрязнённые контакты достаточно почистить дощечкой из дерева нехвойных пород. Нельзя протирать контакты керосином, бензином и т.п. жидкостями, от которых остаётся плохо проводящий налёт.

Ход контактов до замыкания не должен быть более 2,5 мм во избежание их отбрасывания при срабатывании и замедления действия реле. Подвижный контакт должен коснуться неподвижного на расстоянии примерно  $1/3$  длины последнего от его переднего края и пройти ещё  $1/3$ , так, чтобы исключить возможность заскакивания контактного мостика или упора его в торец неподвижных контактов. Мостики подвижных контактов должны свободно поворачиваться на своих осях. Контактная пружина неподвижного контакта должна касаться переднего упора без давления.

*Электрические характеристики.* Проверку следует производить при токе и напряжении синусоидальной формы. Начинают проверку с определения напряжения или тока срабатывания и возврата и коэффициента возврата на заданной уставке. При этом следует поднимать напряжение плавно, замыкание и размыкание контактов должно быть чётким. Затем убеждаются в отсутствии вибрации подвижной системы реле при изменении напряжения на нём плавно и толчком.

У максимальных реле напряжение (ток) поднимают от уставки до 120% номинального напряжения или до максимально возможного при КЗ значения тока, причём включение толчком производят ступенями по 0,1 наибольшего значения контролируемой величины. Проверка отсутствия вибрации у минимальных реле производится в обратном порядке – от максимума до уставки. Измеряют параметры срабатывания и возврата вновь и, если они не изменились, считают реле пригодным к эксплуатации. Для уменьшения вибрации контактов реле минимального напряжения вводят якорь глубже под полюса, а у максимального токового реле увеличивают совместный ход контактов.

Ниже рассматриваются особенности наладки конкретных типов реле.

### 8.1.1.2. Реле прямого действия.

*Проверка механической части реле.* Проверка производится при снятой крышке привода.

1. Определяют усилие, необходимое для отключения выключателя. С этой целью удобно воспользоваться специальным устройством, содержащим боёк и удерживающую пружину (разработка ЦЛЭМ Мосэнерго), при освобождении которой боёк ударяет по рычажку отключающего валика привода. Сила удара зависит от натяжения пружины и оценивается по шкале прибора. Испытание начинают при натяжении пружины, заведомо недостаточном для отключения, и затем повышают его до тех пор, пока привод не будет отключаться чётко и безотказно 2 – 3 раза подряд. Полученный результат сравнивают с типовыми данными для таких же приводов. Значительное превышение типовых значений указывает на плохую сборку и регулировку привода, износ или загрязнение деталей и т.п.

2. Проверяют надёжность крепления головки ударника реле. Головка ударника должна быть зафиксирована так, чтобы исключалась возможность её самопроизвольного отвинчивания при вибрации; зазор между нею и рычажком валика автоматического отключения привода должен быть в пределах 5...10 мм.

Приподнимают ударник реле вручную и после расцепления привода определяют свободный ход ударника, который должен быть порядка 2...3 мм.

3. Проверяют состояние выводов катушки реле, зажимов переключателя тока срабатывания. Особое внимание обращается на состояние пружины и надёжность контакта между штепселем и мостом переключателя.

*Электрические характеристики. Проверка токовых реле.*

1. Определяют ток срабатывания реле на заданной уставке. При открытой крышке привода плавно увеличивают ток в катушке реле и фиксируют то его наименьшее значение, при котором головка ударника начнёт медленно подниматься вверх и через некоторое время произведёт отключение привода.

Следует иметь в виду, что ток срабатывания реле без выдержки времени составляет обычно 80...90% номинального (т.е. установленного на штепсельном переключателе), а с выдержкой времени он может быть на 5...10% больше. Дальнейшая проверка ведётся при закрытой крышке и полностью собранном выключателе.

2. Устанавливают заданное время срабатывания реле при токе уставки и снимают зависимость времени отключения выключателя от тока в реле. Выдержка времени должна проверяться при заданном токе КЗ для данного присоединения или при 4...5-кратном токе срабатывания, т.е. в независимой части характеристики реле. Это измерение повторяют 3 – 4 раза и принимают среднее значение, причём разброс не должен превышать  $\pm 0,2$  с.

*Проверка реле минимального напряжения.*

Плавно изменяя подведённое к реле напряжение, измеряют напряжение срабатывания и возврата реле. Напряжение срабатывания определяется при отпадании сердечника и должно быть в пределах 65...35% номинального. Напряжение возврата реле определяется при втягивании сердечника и лежит в пределах 65...85% номинального.

2. У реле РНВ проверяют время срабатывания на заданной уставке. С этой целью устанавливают номинальное напряжение на катушке реле, а затем отключают его, одновременно запуская секундомер. По истечении выдержки времени реле отпадает, отключается выключатель и останавливается секундомер.

3. Проверка заканчивается опробованием реле под рабочим напряжением. При отключении всех трёх фаз со стороны высокого напряжения проверяется действие реле

на отключение или включение выключателя. При последующем включении напряжения проверяется возврат сердечника реле в исходное положение.

### **8.1.1.3. Реле тока и напряжения.**

*Реле РТ40/Ф и РТ40/1Д.* Реле отключается от вторичной обмотки трансформатора и от конденсаторов, встроенных в реле, посредством имеющейся перемычки. Для проверки конденсаторов их отсоединяют, заряжают примерно до 100 В и через несколько минут разряжают: об исправности судят по характерному щелчку и искре.

Снимают зависимость тока в обмотке реле от тока в первичной обмотке трансформатора (до 20 А) с помощью ЛАТРа и понижающего трансформатора, во вторичную цепь которого вводят резистор сопротивлением 15...20 Ом. Отсутствие вибрации проверяется при токах до  $10 I_{уст}$ .

*Реле РТ40/Р.* Настраивается аналогично. Снимаются характеристики намагничивания по всем первичным обмоткам насыщающегося трансформатора (зависимость напряжения от тока в первичной обмотке при разомкнутой вторичной) и проверяется срабатывание реле при подаче тока поочередно в каждую из них. Если значение тока срабатывания отличается от номинального, проверяют исправность диодов выпрямительного моста.

*Реле РНН57.* Производят оценку заглубления реле путём сравнения напряжения срабатывания на заданной уставке при частоте 50 и 150 Гц (мощность источника 35...40 В·А). Если отношение этих значений равно или больше 8, резонансный фильтр настроен правильно.

*Реле РН58.* При существенном отклонении коэффициента возврата от значения, гарантированного изготовителем, следует проверить стабилитроны. При изменении тока через стабилитрон в рабочем диапазоне его значений напряжение на стабилитроне не должно изменяться более чем на 2...5%; можно ограничиться проверкой для двух значений тока, например, 2 и 5 мА.

У некоторых реле с исполнительным органом типа РТ40 и выпрямителем наблюдается повышенная вибрация и большой разброс вблизи порога срабатывания. Если при этом выпрямительный мост исправен, причиной может быть несогласованность полярности обмоток и остаточного намагничивания стали якоря, которую легко устранить переменной мест проводников на выходе выпрямителя.

*Реле максимального тока РТ80, РТ90.* Проверка механической части.

При проверке механической части реле необходимо убедиться в следующем:

а) якорь элемента отсечки поворачивается без трения и имеет свободный ход по оси; при срабатывании правый конец его прилегает к магнитопроводу всей плоскостью;

б) диск не касается полюсов магнитной системы, зазор должен быть равномерным;

в) диск и рама имеют свободный ход в вертикальном направлении;

г) зубчатый сектор свободно вращается и имеет люфт в осевом направлении;

д) при повороте подвижной рамки сектор входит в зацепление с червяком не менее чем на 1/3 глубины резьбы;

е) зазоры между контактами соответствуют паспортным данным. Наличие люфтов проверяется по характерному постукиванию.

Зазоры главных контактов можно отрегулировать подгибанием упоров. При этом следует избегать деформации гибких токоотводов, которые не должны создавать до-

полнительного давления на контакты. Нижний замыкающий контакт должен замыкаться с заметным опережением. Недопустимо даже кратковременное размыкание (отброс) замыкающего контакта после переключения, так как это может привести к разрыву цепи трансформатора тока.

Проверка электрических характеристик. Индукционный элемент желательно проверять при питании от линейного напряжения сети, не прибегая к применению понижающего трансформатора во избежание искажения формы кривой тока. Ток трогания (ток начала свободного вращения диска) не должен превышать 25% тока уставки; большее значение свидетельствует о повышенном трении в подпятниках.

Ток срабатывания индукционного элемента (минимальный ток, при котором червяк входит в надёжное зацепление с сектором) проверяется на рабочей уставке, при выведенной отсечке и максимальной уставке по времени, и не должен отличаться от уставки более чем на  $\pm 5\%$ . При нечётком срабатывании («плавании» рамки) следует подогнуть стальную скобу вниз в сторону электромагнита, имея, однако, в виду, что при этом уменьшается коэффициент возврата. Подрегулировка тока срабатывания осуществляется изменением натяжения арретирующей пружины с помощью регулировочных винтов. Если заданная уставка не совпадает со значениями на шкале, выбирают ближайшую меньшую уставку по шкале и добиваются требуемого значения тока срабатывания затяжкой пружины.

Ток возврата измеряется в момент подхода хвостовика сектора к коромыслу якоря отсечки. Если коэффициент возврата оказывается меньше допустимого, следует уменьшить глубину зацепления червячной передачи или несколько отогнуть скобу от сердечника. Если при этом увеличился ток срабатывания, ослабляют натяжение арретирующей пружины.

Коэффициент возврата проверяют дважды: при плавном снижении и при сбросе тока (рис. 8.2, а).

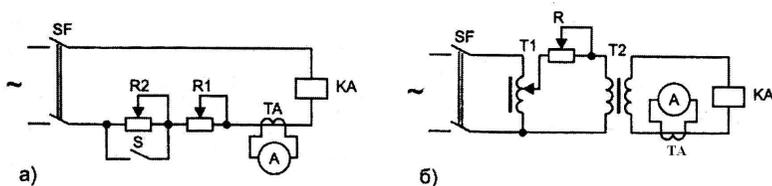


Рис. 8.2. Схемы проверки: а) коэффициента возврата; б) кратности тока отсечки реле РТ80, РТ90

Плавное снижение тока производят при разомкнутом рубильнике S, увеличивая сопротивление резистора R2. Затем при замкнутом рубильнике резистором R1 устанавливают 5 – кратный ток срабатывания индукционного элемента и размыканием рубильника вводят в цепь резистор R2, сопротивление которого регулируется так, чтобы ток стал несколько меньше тока возврата, например  $0,8 I_{ср}$ .

Проверка времени срабатывания индукционного элемента. Подключается электросекундомер и проверяется разброс точек временной характеристики на максималь-

ной уставке по времени при полуторакратном токе срабатывания индукционного элемента. Разброс не должен превышать 1 или 2 с для реле соответственно с четырёх- или шестнадцатисекундной шкалой. Следует произвести не менее трёх отсчётов и принять среднее значение. Повышенный разброс может быть следствием неисправности подпятников или червячной передачи. Заводские характеристики реле изображены на его шкале.

Проверка срабатывания отсечки (рис.8.2,б). Градуировка шкалы кратности тока отсечки (электромагнитного элемента) справедлива только на тех уставках индукционного элемента, на которых производилась заводская калибровка отсечки. В этом случае погрешность не превышает 15%, а на других уставках она достигает 30%. Ток срабатывания отсечки устанавливается в пределах от 2 до 8-кратного значения тока срабатывания индукционного элемента. Технически возможно повысить кратность до 16, но при этом резко возрастает погрешность. Не допускается и применение уставок меньше 2, так как реле может ложно сработать от случайного сотрясения. Время действия отсечки колеблется от 0,04 до 0,20 с.

Проверку производят на рабочей уставке индукционного элемента. При максимальной уставке по шкале времени быстро (во избежание перегрева обмотки реле) устанавливают ток, близкий к заданной уставке отсечки, и с помощью регулировочного винта отсечки добиваются её срабатывания. Для более точного определения разброса тока срабатывания отсечки подают ток толчками с интервалом 5...10 с, немного снижая ток при каждом включении до тех пор, пока отсечка перестаёт срабатывать. При этом значении тока производят несколько включений длительностью по 2...3 с каждое.

Если из 3 – 4 включений подряд отсечка не сработала ни разу, следует немного увеличить ток и через 1 мин повторить включения с интервалом 10 с. Значение тока, при котором отсечка сработает хотя бы один раз из 10, называют начальным током срабатывания. Током надёжного срабатывания отсечки считается то минимальное значение его, при котором отсечка сработает 10 раз подряд. Разница между этими значениями тока (разброс) характеризует механическое состояние узла отсечки. Повышенный разброс, а также вибрация якоря электромагнитного элемента являются признаками неисправности: перекоса или искривления оси якоря отсечки, большого осевого люфта, перекоса или затирания якоря.

Когда ток срабатывания отсечки значительно отличается от уставки, корректируют срабатывание её на уставке 2 с помощью регулировочной головки и вновь проверяют ток срабатывания отсечки на уставках 2 и 8.

Если ток КЗ превышает уставку отсечки более чем в 2 раза, следует убедиться в отсутствии вибрации якоря электромагнитного элемента в диапазоне от двухкратного до значения, соответствующего максимальному току КЗ. Ток подают короткими импульсами (во избежание перегрева обмотки), начиная от максимального, а об отсутствии вибрации судят по тому, что при этом не отпадает промежуточное реле, подключённое через контакты проверяемого. Вибрация вызывается теми же механическими дефектами, что и повышенная погрешность.

Если отсечка не используется, её необходимо вывести.

#### **8.1.1.4. Реле времени.**

Реле РВ100, РВ200. Механическая часть.

1. Часовой механизм должен быть установлен так, чтобы при втянутом якоре, на максимальной уставке по времени, между рычагом, связанным с якорем, и заводным рычагом (роликом) часового механизма был зазор 0,5...1 мм.

2. Убеждаются в том, что при трёхкратном запуске вручную часового механизма не прослушиваются перебои и срывы в работе, а планка с подвижными контактами перемещается равномерно вдоль всей шкалы.

3. Касание подвижного мгновенного контакта должно происходить примерно по центру неподвижного. Зазор между мгновенными контактами должен быть не менее 1,5 мм для реле РВ113 – РВ143 и 2,5 мм для остальных. Регулировка зазора осуществляется подгибанием неподвижных контактных пластинок.

4. Прогиб пластины мгновенного переключающего контакта должен составлять (в средней части) при верхнем её положении 0,5...1,0, при нижнем 1...2 мм.

5. Поперечный люфт якоря в гильзе должен быть около 0,5 мм, а люфты направляющего рычага якоря в пластмассовой колодке 1...1,5 мм. Все люфты, зазоры, прогибы проверяются визуально.

Электрические характеристики.

1. Измеряют сопротивление цепи обмотки с добавочным резистором при отпущенном и подтянутом (вручную) якорем. Результаты измерения должны отличаться на значение сопротивления резистора.

2. Искрогасительный контур проверяется на исправность его элементов. Способность конденсатора сохранять заряд проверяется по искре при разряде (напряжение заряда около 100 В, разряд – через 3 мин). Контакты, управляющие данным реле, не должны искрить.

3. Проверяют напряжение срабатывания и возврата при питании схемы от ЛАТРа или потенциометра, сопротивление которого выбирают на порядок меньше сопротивления реле. Класс точности вольтметров – не ниже 1,5. Напряжение срабатывания реле РВ100, РВ217 – РВ248 определяют при подаче напряжения толчком, напряжение возврата – при плавном снижении напряжения. Напротив, у реле РВ215 – РВ245 напряжение срабатывания определяют при плавном снижении напряжения, а напряжение возврата – при подаче напряжения толчком. В случае включения реле через добавочные резисторы напряжение срабатывания и возврата определяют с этими резисторами. Измерения следует производить по 3 раза и брать среднее значение.

4. Когда напряжение срабатывания или возврата выходит за нормируемые пределы или наблюдается повышенная вибрация, проверяют выпрямительное устройство. При обнаружении дефекта диоды (выпрямительный мост) или резистор заменяют.

5. Проверка времени срабатывания производится на рабочей уставке, если она остаётся неизменной, или на всех уставках, если в период эксплуатации реле уставка может быть изменена оперативным персоналом. Измерения производятся электросекундомером, при номинальном напряжении.

6. Время срабатывания и время замкнутого положения протаскиваемых (временно замыкающих) контактов измеряется три раза и принимается среднее значение. Для фиксации показаний секундомера при измерении времени срабатывания целесообразно использовать промежуточное реле, которое запускает секундомер при замыкании протаскиваемого контакта и останавливает его при размыкании этого контакта. Продолжительность замкнутого состояния протаскиваемого контакта регулируется изменением провала неподвижных контактов.

Разброс времени срабатывания (разность между максимальным и минимальным временем срабатывания) определяется как среднее из трёх измерений на одной и той же уставке при номинальном напряжении. Повышенный разброс свидетельствует о неисправности часового механизма. Полученные значения должны находиться в следующих пределах, с:

Максимальная выдержка времени	1,3	3,5	9,0	20,0
Разброс времени	0,06	0,12	0,25	0,80
Время замкнутого состояния проскальзывающих контактов	0,05...0,12	0,1...0,4	0,25...0,75	0,6...1,6

*Реле РВМ-12, РВМ-13. Механическая часть.*

1. Проверяя микродвигатель, надо иметь в виду следующее. При напряжении на статоре 55 В ротор двигателя должен вращаться с синхронной частотой 500 об/мин и надёжно входить в зацепление с зубчатым колесом. После отключения тока ротор должен чётко опуститься на нижний упор.

2. Рама с подвижными контактами должна свободно вращаться в подшипниках и иметь осевой люфт 0,2...0,4 мм.

3. Такой же люфт должна иметь промежуточная ось редуктора. В зацеплении с ведущей шестерёнкой двигателя не должно быть затирания. Изменение зазора в зацеплении производят перемещением двигателя.

4. Воздушный зазор между накладками пластин неподвижных контактов в их разомкнутом состоянии должен быть 3,4...4,0 мм.

*Электрические характеристики.*

1. Измеряют ток срабатывания и возврата при питании каждого насыщающегося трансформатора и подаче тока толчком.

2. Проверяется разброс времени срабатывания реле на последней уставке шкалы при полуторакратном токе срабатывания. При изменении тока в первичной обмотке насыщающегося трансформатора до 20-кратного номинального разброс должен быть не более 0,12 с у реле РВМ-12 и 0,25 с у реле РВМ-13.

3. Надёжность работы контактов и отсутствие вибрации проверяется при поочерёдном питании каждого насыщающегося трансформатора.

4. Не допускается работа более двух контактов с одинаковыми уставками, а также установка двух проскальзывающих контактов в крайнее левое (замкнутое) положение.

#### **8.1.1.5. Промежуточные и указательные реле.**

Эти реле не имеют специальных устройств для изменения электрических параметров и поэтому регулировку механизма реле и проверку его электрических характеристик следует производить одновременно. Проверяют механическую часть и контакты, в частности:

1. лёгкость хода якоря, чёткость возврата в исходное положение;
2. зазоры между якорем и сердечником;
3. люфты подвижных частей;
4. положение подвижных контактов относительно неподвижных;

5. межконтактные зазоры, провалы, совместный ход замыкающих, размыкающих контактов;
6. одновременность замыкания, размыкания контактов – посредством медленного перемещения от руки якоря реле.

Электрические параметры связаны с характеристиками механической части и контактной системы следующим образом:

1. При уменьшении зазора между якорем и сердечником уменьшается напряжение (ток) и время срабатывания реле.
2. При уменьшении конечного зазора уменьшается напряжение (ток) возврата и увеличивается время возврата реле.
3. При ослаблении натяжения возвратной пружины уменьшается напряжение (ток) и время срабатывания, уменьшается напряжение (ток) и увеличивается время возврата реле.
4. Увеличение числа замыкающих контактов ведёт к повышению напряжения (тока) и уменьшению времени возврата реле.
5. Увеличение числа размыкающих контактов приводит к уменьшению напряжения (тока) и времени срабатывания реле.

Характеристики механической части и контактной системы отдельных промежуточных реле.

*Реле РП23,25.* Межконтактный зазор должен составлять не менее 2,5 мм; у реле РП23 между ограничителем хода якоря и самим якорем должен быть зазор 0,5...2 мм. В обесточенном состоянии реле РП25 зазор между хвостовиком скобы якоря и выступом упорной колодки должен составлять 0,5...0,8 мм; при втянутом якоря подвижная контактная система должна иметь свободный ход 0,5...1,5 мм; зазоры между полюсами сердечника и якорем должны отсутствовать. Совместный ход контактных пластин – около 1 мм.

*Реле РП210.* Зазор между якорем и сердечником обесточенного реле – не более 1 мм, между замыкающими контактами – не менее 1 мм; провал контактов – не менее 0,3 мм.

*Реле РП220.* При обесточенном реле зазор между якорем и немагнитной прокладкой переднего полюса должен быть около 1 мм; регулировка производится упорным винтом. Зазор между контактами должен быть не менее 1 мм.

*Реле РП230.* Провал контактов должен быть в пределах 0,7...1,0 мм.

*Реле РП250.* Межконтактный зазор должен быть не менее 2,5 мм, совместный ход контактов – не менее 0,5 мм, зазор между якорем и концом скобы магнитопровода примерно 2,4 мм. В начальном положении траверса должна упираться в якорь, а после срабатывания иметь свободный ход 0,5...1,5 мм.

Регулирование межконтактного зазора и совместного хода контактов осуществляется перемещением неподвижных контактов. Корректировать время действия реле можно размещением и количеством демпферных шайб: уменьшение их числа вызывает сокращение времени срабатывания и возврата, а приближение к воздушному зазору – увеличение времени срабатывания реле.

*Реле РП321,341,342.* Ход якоря должен быть 3...4 мм, осевой люфт около 0,5 мм. У реле РП321 зазор между изоляционной рамкой и подвижными пластинами переключающих контактов при опущенном якоря должен быть 0,5...1,0 мм, а между замыкающими контактами – примерно 2,5 мм. Зазор между замыкающими контактами

повышенной мощности должен быть 1,5...2, а между размыкающими – не менее 2 мм.

Положение якоря в притянутом состоянии регулируется перемещением магнитопровода, ход якоря – подгибанием упоров. Грубую регулировку межконтактных зазоров выполняют подгибанием язычка хвостовика якоря, тонкую – подгибанием контактных пластин.

*Реле промежуточные двухпозиционные (ПП8,9,11,12).* Зазоры между контактами, выведенными на зажимы цоколя, должны быть не менее 1,8 мм, а между контактами в цепях катушек 1,0...1,3 мм.

Электрические характеристики.

1. Напряжение срабатывания по основной обмотке (посредством которой реле выполняет свою основную функцию в схеме РЗиА) должно быть не более 70%, напряжение возврата – не менее 5% номинального (для реле с замедлением на возврат допускается 1%).

2. Определяют ток (напряжение) удержания по дополнительной обмотке, выполняющей вспомогательные функции (удержание реле, торможение и пр.). Для этого подают номинальное напряжение (ток) на основную и дополнительную обмотки, отключают основную обмотку и плавно снижают напряжение (ток) на дополнительной обмотке. Минимальные значения параметров, отсчитываемые в момент возврата реле, должны быть: ток удерживания – не более 80, а напряжение не более 70% номинального значения.

3. При плавном снижении напряжения (тока) основной обмотки якорь реле отпадать не должен, в противном случае следует проверить полярность обмоток.

4. Определяют время действия реле, для которых задана уставка по времени.

5. Проверяется работа реле при напряжении 80 и 110% номинального.

В реле *МКУ-48* начальное расстояние порядка 2,5...2,8 мм между сердечником и якорем регулируют перемещением специального упора, в отверстие которого входит конец якоря. Конечное расстояние не регулируется: якорь ложится на край магнитопровода. Чтобы якорь не залипал, на нём установлен медный упор. Ход контактов равен 2...3 мм, регулировка производится подгибанием упорных пружин.

Во всех схемах и конструкциях реле, а особенно при шунтировании обмоток, время замедления зависит от продолжительности нахождения его под напряжением. В некоторых схемах защиты дополнительное замедление при возврате реле достигается включением параллельно его обмотке конденсаторов или резисторов. Кроме того, в полной схеме защиты обмотка проверяемого реле может шунтироваться обмотками других реле, резисторами, конденсаторами и пр. Необходимо поэтому проверку времени замедления реле в схеме устройства РЗиА проводить с учётом возможного шунтирования его обмотки и обеспечить заданное время приложения напряжения.

*Указательные реле РУ21, РУ1.* Барабанчик реле должен вращаться свободно. Глубина зацепления между зубом скобы барабанчика и выступом якоря должна быть 1,0...1,5 мм. Люфт якоря регулируется перемещением скобы, зацепление – подгибанием регулировочной скобы.

Напряжение срабатывания реле РУ21 при параллельном включении – до 80% номинального, ток срабатывания при последовательном включении близок к номинальному (около 200 ампервитков). Напряжение срабатывания реле постоянного то-

ка РУ1 – не более 70%, переменного – не более 80% номинального; ток срабатывания не превышает номинального значения.

### **8.1.2. Реле дифференциальных, направленных и фильтровых защит.**

#### **8.1.2.1. Реле дифференциальных защит серий РНТ (рис. 7.7) и ДЗТ10.**

1. Осмотр и проверку механической части, изоляции проводят так же, как и для электромагнитных реле.

2. Проверяют срабатывание исполнительного органа – реле ПТ40, для чего последнее отключают, сняв перемычку. Подают в реле синусоидальный ток, измеряют напряжение и ток срабатывания (в начальный момент втягивания якоря), а также коэффициент возврата. Значения этих величин нормируются в пределах, соответственно: 3,5...3,6 В; 0,16...0,17 А; 0,80...0,85. Момент срабатывания реле можно определить по характерному звуку и скачку стрелки прибора; измерения следует производить приборами класса 0,5.

Для обеспечения синусоидальной формы кривой тока при использовании нагрузочного трансформатора или ЛАТРа рекомендуется последовательно с обмоткой реле вводить резисторы, минимальное сопротивление которых выбирается в зависимости от числа витков первичной обмотки реле:

Число витков обмотки	5	10	20	40	60	120	180
Сопротивление, Ом	1,5	3	5	10	15	30	50

Если реле требует регулировки, нужно отвести указатель уставки вправо до отказа и при токе 0,16...0,17 А выбрать такое начальное положение якоря относительно полюсов магнитопровода, при котором напряжение на обмотках реле было бы 3,5...3,6 В. Регулировка производится перемещением магнитопровода, коррекция – левым упорным винтом. Затем указатель устанавливают на заводскую риску и изменением натяжения противодействующей пружины добиваются срабатывания реле при указанном значении тока, после чего вновь измеряют напряжение срабатывания.

Коэффициент возврата регулируется конечным положением якоря (с помощью правого упорного винта) и изменением нажатия контактных пружин. Полка якоря должна заходить под полюсы электромагнита не далее чем на 2/3 их ширины, а зазоры между ними должны быть одинаковыми и равными 0,3...0,4 мм. Во избежание вибрации подвижной системы между упорными винтами и якорем сохраняется небольшой (до 1 мм) зазор.

3. Проверяют МДС срабатывания реле поочередной подачей синусоидального тока в рабочие обмотки, предварительно набрав для них максимальное число витков на колодках НТТ. В цепи короткозамкнутой обмотки устанавливается заданное значение сопротивления  $R_K$ . Проверку реле ДЗТ производят при отсутствии тока в тормозных обмотках. МДС каждой обмотки должна составлять  $100 \pm 5$  Ав. Подрегулировку выполняют резистором  $R_{ш}$ , шунтирующим вторичную обмотку НТТ. При значительных отклонениях МДС от нормы следует проверить правильность выполнения ответвлений обмотки, сравнивая распределение напряжений по ответвлениям данной и аналогичной обмоток.

4. Проверяют короткозамкнутую обмотку  $w_K$  реле РНТ: следует убедиться, что при изменении сопротивления резистора  $R_K$  от нуля до рабочей уставки и замкнутой цепи

этой обмотки МДС срабатывания почти не изменяется, а при размыкании цепи – уменьшается на 20...30%. Если эти условия не соблюдаются, то при токе в первичной цепи, близком к току срабатывания, ток в цепи обмотки  $w_k$  будет практически отсутствовать.

5. Проверяют отсутствие взаимной индукции между тормозной и вторичными обмотками реле ДЗТ. С этой целью отключают исполнительный орган от НТТ и в тормозную обмотку с полным числом витков подают ток, соответствующий максимально допустимому току КЗ. При этом напряжение на разомкнутой вторичной обмотке реле не должно превышать 4% напряжения срабатывания исполнительного органа, т.е. 0,14 В.

Проверяют коэффициент надёжности (иначе – коэффициент отстройки) на рабочей уставке. Первичный ток синусоидальной формы подаётся в рабочую обмотку реле РНТ или в последовательно соединённые рабочую и тормозную обмотки реле ДЗТ. У реле ДЗТ10 число витков этих обмоток выбирается с тем условием, чтобы коэффициент торможения был равен 0,35; у реле ДЗТ11 число витков тормозной, рабочей и уравнительной обмоток выбирают равным соответственно 24 и 35 + 34.

Определяют первичный ток срабатывания реле, фиксируют якорь исполнительного органа в исходном положении и измеряют вторичные токи в цепи обмотки исполнительного органа при значениях первичного тока в 2 и 5 раз больше тока срабатывания. Соответствие рассчитанных значений коэффициентов надёжности приведённым выше нормам является важным критерием правильной настройки реле: меньшие значения свидетельствуют о снижении надёжности работы реле при внутренних повреждениях, большие – об ухудшении отстройки реле от бросков намагничивающего тока.

7. Проверка тормозных характеристик. При внешних повреждениях тормозные обмотки НТТ обтекаются синусоидальным током, а первичные (рабочие) – несинусоидальным. При внутренних повреждениях тормозные и рабочие обмотки обтекаются синусоидальным током, причём угол между векторами токов в тормозной и рабочей обмотках может изменяться в пределах 0...360°. Тормозные характеристики, представляющие собой зависимость МДС срабатывания от МДС торможения, снимаются при пропуске по обеим обмоткам синусоидального тока.

Тормозные характеристики проверяют по контрольным точкам при наибольшем и наименьшем торможении. Торможение наиболее эффективно при угле между векторами токов в рабочей и тормозной обмотках в пределах  $0 \pm 30^\circ$ , наименьший эффект будет при угле  $30 \pm 90^\circ$ . Проверка контрольных точек, соответствующих торможению, производится при наименьшем торможении, соответствующих срабатыванию, – при наибольшем торможении. На практике выбирают значения углов 0 и 90° между напряжениями на обмотках: так, если на рабочую обмотку подано напряжение между фазами А и В, то тормозную обмотку подключают на то же напряжение или на фазу С. Если полученные точки тормозной характеристики отличаются от типовой больше чем на 10%, необходимо использовать фазорегулятор, а более чем на 5% – снять полные тормозные характеристики (4 – 5 точек до МДС торможения 800...1000 Ав). Большое различие характеристик может свидетельствовать о неисправности тормозной обмотки или о других дефектах.

8. Проверяют надёжность контактов реле при изменении тока рабочей обмотки в диапазоне, соответствующем 1,05...5 МДС срабатывания. Дальнейшее увеличение

тока не требуется ввиду насыщения НТТ. Испытание проводится как при плавном подъёме первичного тока, так и толчком при разных значениях тока.

Проверяется однократность замыкания и размыкания контактов, отсутствие вибрации и искрения. Предварительная регулировка контактов и устранение вибрации производятся без тока, окончательная – с нагрузкой, на которую они работают в схеме защиты. По окончании испытания размагничивают сердечник НТТ путём поочередного повышения и снижения первичного тока в пределах от нуля до пятикратного тока срабатывания.

9. Измеряют ток срабатывания реле на рабочих уставках со стороны каждого плеча защиты. Для реле ДЗТ измеряют ток срабатывания с включённым торможением (если возможно) и без него.

#### **8.1.2.2. Реле направления мощности. Механическая часть.**

1. В случае затирания осей в подпятниках их выворачивают, очищают от загрязнений с помощью заострённой палочки из дерева нехвойных пород. При установке на место регулируют сначала положение нижнего подпятника, потом верхнего.

2. Проверяют свободный ход подвижной системы, для чего отпускают возвратную пружину и снимают контактную плату. Отводят до упора подвижный контакт и отпускают его, после чего подвижная система должна сделать 8 – 10 полных колебаний; меньшее число будет свидетельствовать о затирании (дефекты подпятников, погнутость оси, засорение зазоров, задевание за полюса сердечника).

3. Контактная колодка должна быть установлена так, чтобы угол встречи контактов составлял 35...40°. С увеличением этого угла возрастает разрывная способность контактов, но появляется опасность их отскока и подгорания. Совместный ход контактов должен быть в пределах 1...1,5 мм. Регулировка осуществляется прогибом гибкой пружины неподвижного контакта, которая должна опереться на конец упорной пластины только в конце совместного хода контактов. Расстояние между подвижным и неподвижными контактами должно быть 1...1,5 мм.

4. Возвратная пружина должна иметь правильную спиральную форму, зазор между витками должен оставаться равномерным при повороте подвижной системы в пределах, ограниченных упорами. Положение витков пружины корректируется лёгким изгибом поводка, к которому крепится её внешний конец.

Электрическая часть.

Определение потребляемой мощности. С этой целью измеряют ток в обмотке напряжения при номинальном (100 В) напряжении на ней и падение напряжения на обмотке тока при номинальном токе реле.

Проверка и устранение самохода. Самоход – вращение подвижной системы реле, вызываемое только током или только напряжением. Самоход в сторону размыкания контактов загрубляет реле, результатом чего может стать отказ защиты, а самоход в сторону замыкания может привести к ложному действию её. Самоход по напряжению проверяют при разомкнутой цепи токовой обмотки, самоход по току – при замкнутой накоротко обмотке напряжения. Напряжение поднимают от 0 до 110 В, а ток подают толчками, постепенно увеличивая его от номинального до максимального значения, соответствующего КЗ на шинах подстанции.

Вращающий момент самохода появляется в результате несимметрии магнитной системы. Устраняют его, как правило, поворотом стального сердечника вокруг своей

оси. Допускается незначительный самоход, который можно компенсировать закручиванием противодействующей пружины на угол не более  $15^\circ$ .

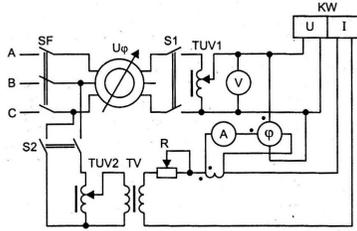


Рис.8.3. Схема определения электрических характеристик реле направления мощности: TUV1, TUV2 – автотрансформаторы; TV – нагрузочный трансформатор;  $U_\varphi$  – фазорегулятор

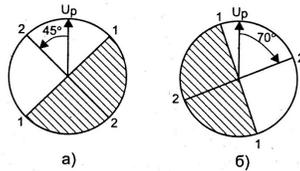


Рис.8.4. Упрощённые угловые характеристики реле типов RBM171 (а) и RBM178 (б): 1-1 – линия нулевых моментов; 2-2 – линия максимальных моментов

3. Проверка зоны действия, угла максимальной чувствительности и однополярных зажимов реле (рис.8.3) производится при напряжении 100 В, номинальном токе и рабочей затяжке пружины. Посредством фазорегулятора изменяют угол между током и напряжением от 0 до  $360^\circ$  и обратно, отмечая по фазометру значения углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , при которых реле замыкает контакт. Угол максимальной чувствительности определяют как

$$\varphi_{\text{м.ч}} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$$

Если отклонение  $\varphi_{\text{м.ч}}$  от паспортного значения не превышает  $5^\circ$ , то однополярные зажимы обозначены правильно.

Получить более наглядную картину и определить зоны действия и отказа (заклинивания) реле можно построением угловых характеристик, как, например, на рис. 8.4. Для этого на миллиметровой бумаге откладывают вектор напряжения  $U_\varphi$  и из начала его как из центра проводят окружность радиусом, равным длине вектора. Этот вектор принимают в качестве оси, от которой ведут отсчёт углов в направлении вращения часовой стрелки.

На окружности с помощью транспортира отмечают точки, соответствующие замыканию и размыканию контактов, и соединяют их прямой. Это – линия нулевых моментов, а перпендикулярная ей линия, проходящая через центр окружности, – линия максимальных моментов. Полуокружность, соответствующая замкнутому состоянию контактов, – это зона действия реле на срабатывание (незаштрихованный полукруг); другая полуокружность – зона действия на заклинивание (заштрихованный полукруг). Угол между вектором напряжения  $U_p$  и линией максимальных моментов 2-2 и есть угол максимальной чувствительности реле.

4. Проверка чувствительности (мощности срабатывания) реле. Производится при рабочей натяжке возвратной пружины, номинальном токе и угле между током и напряжением, равном углу максимальной чувствительности. Угол рабочей натяжки пружины находится в пределах  $90 \dots 180^\circ$ , для реле РБМ обычно около  $120^\circ$ .

Плавное повышение напряжения, добиваются срабатывания реле, затем снижают напряжение и определяют коэффициент возврата, который должен быть не ниже 0,6. Чувствительность, т.е. минимальная мощность срабатывания реле, определяется по выражению

$$S_{cp} = U_{cp} I_{p.n.},$$

где  $U_{cp}$  – напряжение срабатывания,  $I_{p.n.}$  – номинальный ток реле. Мощность срабатывания не должна превышать значений, гарантируемых изготовителем.

Когда фазорегулятор и фазометр отсутствуют, разрешается вести проверку при углах, отличающихся от угла максимальной чувствительности, так как при небольшой разнице в значениях угла мощность срабатывания существенно не изменяется.

5. Проверка работы контактов реле выполняется при подведении к нему мощности срабатывания, а также при подведении и сбросе обратной мощности. Нагрузка контактов должна быть такой же, как и в рабочей схеме защиты. Значения мощности выбирают в пределах от  $1,2 S_{cp}$  до максимального, которое подсчитывается по следующим формулам:

для защиты от междофазных КЗ

$$S_m^{(2)} = \frac{3 U_d I_{к.м}^{(3)}}{4 n_T n_{н.т}} ;$$

для защиты от замыканий на землю

$$S_{mo} = \frac{9 U_o I_o}{n_T n_{н.т}} ,$$

где  $S_m^{(2)}$  – максимальная мощность, подводимая к реле при двухфазном КЗ у шин подстанции в зоне защиты;  $I_{к.м}^{(3)}$  – ток трёхфазного КЗ в максимальном режиме;  $3U_o/n_{н.т} = 100$  В и  $3I_o/n_T$  – соответственно напряжение и ток нулевой последовательности в цепи реле при однофазном КЗ вблизи шин подстанции в зоне защиты;  $n_T$ ,  $n_n$  и

$k_{н.т}$ -коэффициенты трансформации соответственно трансформаторов тока, трансформаторов напряжения схем звезда-звезда и звезда-разомкнутый треугольник.

Если отброс контактов может вызвать ложное действие защиты, следует проверить работу реле при подаче и сбросе обратной (в сторону размыкания контактов) мощности. Для этого на реле подают обратную мощность, изменяя её в пределах от  $10 S_{ср}$  до максимально возможного значения при КЗ на шинах подстанции, а затем сбрасывают её одновременным отключением тока и напряжения. При этом не должно быть сильного отбрасывания подвижной системы от упора, которое могло бы вызвать замыкание подвижного контакта с неподвижным. Отброс уменьшают дополнительной затяжкой пружины, увеличением межконтактного расстояния, а если замыкание контактов устранить не удаётся, то в действие защиты вводят необходимое замедление.

### ***8.1.2.3. Фильтр – реле тока и напряжения обратной последовательности.***

*Фильтр – реле тока.* Прежде всего надо проверить заводские уставки реле при имитации двухфазных и однофазных замыканий. Значения тока срабатывания исполнительного реле, измеренные на входе фильтра при данном виде КЗ, должны совпадать с точностью до 3...5%, а отношение средних (из трёх измерений) значений тока срабатывания в режимах однофазного и двухфазного КЗ должно быть близко к  $\sqrt{3}$ .

Проверку ведут в следующем порядке. Закорачивают выходные зажимы реле и на двух крайних (при новом включении) или на рабочих (при повторной проверке) уставках по шкале измеряют ток срабатывания исполнительных реле, подключая поочередно фазы А-В, В-С и С-А. Измеренные значения тока должны быть в  $\sqrt{3}$  раз больше уставки на шкале, так как реле градуируется по фазному току обратной последовательности. Коэффициент возврата реле должен быть не менее 0,75. Измеряется также напряжение на выходе нагруженного фильтра при токах срабатывания на рабочей уставке, а у реле РТФ1, кроме того, падение напряжения на резисторах R1 и R2 (рис.7.15). Для всех измерений напряжения на вторичной стороне трансформатора и трансреактора требуется вольтметр с пределами измерения 3...6 В (для реле РТФ1 на номинальный ток 1 и 5 А и РТ2 на 5 А) и 15...30 В (реле РТ2 на 1 А).

Для оценки линейности фильтра определяется возможное значение напряжения на выходе фильтра при расчётной кратности тока трёхфазного КЗ. Если это значение неизвестно, измерения производят при 10-кратном номинальном токе. Порядок подачи тока тот же, что и при проверке тока срабатывания. Разность напряжений при любых двух измерениях из трёх не должна превосходить напряжения на выходе фильтра при токе срабатывания реле. Это испытание целесообразно совместить с проверкой на вибрацию контактов электромеханического исполнительного органа после его испытания.

Настройка фильтра (в случае необходимости) сводится к регулировке сопротивлений переменных резисторов. В одну из обмоток трансформатора тока и одну – трансреактора, включённых встречно, подают синусоидальный ток двойного номинального значения и при отключённой цепи выпрямительного моста измеряют падение напряжения на резисторах R1 и R2 и напряжение на выходе фильтра. Нормально значения всех трёх напряжений должны быть равны между собой. В противном случае приступают к настройке, начиная её с изменения сопротивления резистора R2;

затем измеряют выходное напряжение, изменяют, если потребуется, сопротивление  $R_1$  и т.д. до тех пор, пока разница между указанными значениями напряжения не уменьшится до 2...3%. Судить о настройке фильтра можно и по значениям углов: угол между первичным током и напряжением на резисторе  $R_2$  должен быть равен  $60^\circ$ , а угол между напряжениями на резисторах  $R_1$  и  $R_2$  –  $120^\circ$ ; подстройка – как в предыдущем варианте.

После этого следует повторить измерения при обтекании током двух других фаз трансформатора тока и трансреактора. Расхождение в результатах измерений, выполненных одним и тем же прибором, не должно превышать 5%. В заключение вновь сравнивают токи срабатывания реле при имитации КЗ.

Когда настроить фильтр указанными способами не удаётся, проверяют отдельные элементы фильтра. Измеряется сопротивление постоянному току вторичных обмоток трансформатора тока и трансреактора, снимаются их вольт-амперные характеристики (ВАХ трансреактора должна быть линейной), проверяется коэффициент трансформации трансформатора тока, а у трансреактора, кроме того, измеряется сопротивление взаимоиנדукции при обтекании током одной из его первичных обмоток.

*Фильтр – реле напряжения РНФ1М.* Настройку фильтра проверяют имитацией двухфазных коротких замыканий, подавая напряжение на каждую пару входных зажимов фильтра и закорачивая перемычкой один из них с третьим, оставшимся свободным. Выходное напряжение, измеренное в точках N – M (рис.7.12) при каждом из таких опытов, не должно отличаться от среднего более чем на 2...3%. При больших отклонениях фильтр регулируют.

С этой целью подают входное напряжение, равное 100 В, и при отсоединённой нагрузке измеряют напряжение на всех элементах схемы и на её выходе. Напряжения на элементах каждого плеча должны быть 86,5 и 50,0 В (отношение  $\sqrt{3}$ ), а напряжение на выходе –  $\sqrt{3}/2$  от входного, т.е. 86,5 В. Регулировкой резисторов добиваются достижения указанных значений с точностью до 1%.

Поднимая напряжение на входе фильтра от нуля до напряжения срабатывания выходного реле, измеряют его значение  $U_{cp}$ . Линейное напряжения срабатывания реле будет  $U_{2\text{лин}} = U_{cp}/\sqrt{3}$ . Уставки по линейному напряжению обратной последовательности можно изменять от 6 до 12 В, отклонение значения  $U_{cp}$  от уставки допускается не более 8%. Коэффициент возврата должен быть не менее 0,75. Отсутствие вибрации контактов проверяют при подаче на вход фильтра напряжения от  $1,05 U_{cp}$  до 120...130 В.

### **8.1.3. Статические реле**

#### **8.1.3.1. Проверка радиоэлектронных компонентов.**

При поиске неисправностей в схемах статических реле, а также при выборе элементов испытательных схем возникает необходимость проверки отдельных компонентов.

*Резисторы и конденсаторы.* Прежде всего следует убедиться в отсутствии внешних повреждений и в соответствии параметров, обозначенных на корпусе, тем, которые требуются для данной схемы согласно спецификации или предварительному расчёту, выбору по каталогу.

При осмотре резистора обращают внимание на целостность корпуса, лакового покрытия, выводов проводникового элемента. Сопротивление резистора измеряют омметром или мегаомметром. Перемещение движка переменных резисторов должно быть плавным, без заеданий, плавно и монотонно должно изменяться и сопротивление этих резисторов.

Особо следует обратить внимание на выбор резистора по мощности, имея в виду, что обозначенное на его корпусе номинальное значение мощности является предельным значением длительно допустимой рассеиваемой мощности, при котором температура резистора может достигать  $300^{\circ}\text{C}$ . Чтобы не подвергать перегреву другие компоненты схемы и продлить срок службы резистора, его выбирают так, чтобы в длительном режиме рассеиваемая мощность была существенно меньше номинальной. Вместе с тем полезно иметь в виду и то обстоятельство, что в режиме кратковременной или повторно – кратковременной нагрузки резистор может пропускать значительно больший ток, чем номинальный. Как известно, если через резистор сопротивлением  $R$  проходит ток  $I$ , то рассеиваемую мощность можно подсчитать по формуле  $P = I^2R$ , а при подключении резистора на напряжение  $U$  она рассчитывается как  $P = U^2/R$ .

*Конденсаторы.* Когда возникает сомнение в исправности конденсатора, его проверяют на пробой и короткое замыкание путём измерения сопротивления между выводами и между выводами и металлическим корпусом конденсатора. Пробой, не выявленный на низком напряжении источника питания омметра, может обнаружиться при проверке изоляции между теми же выводами с помощью мегаомметра.

Параметры конденсаторов с твёрдым диэлектриком сохраняются длительное время, электролитические же конденсаторы подвержены старению, которое сопровождается высыханием электролита и потерей ёмкости. Ориентировочно о ёмкости конденсатора можно судить по характеру изменения тока, подаваемого толчком от источника постоянного тока, например, от батарейки: у исправного конденсатора вначале наблюдается бросок тока, затем – постепенное его уменьшение почти до нуля.

Измерить ёмкость конденсатора с необходимой точностью можно соответствующими приборами или методом амперметра – вольтметра на переменном (синусоидальном) токе:  $C = 10^6 I / \omega U$ , где  $C$  – ёмкость конденсатора, мкФ;  $I$  – ток через конденсатор, А;  $U$  – напряжение на нём, В;  $\omega$  – угловая частота;  $\omega = 314$  1/с при частоте источника питания  $f = 50$  Гц. Для улучшения формы тока и ограничения его значения рекомендуется включать в цепь конденсатора резистор, сопротивление которого равно примерно 10% ёмкостного сопротивления конденсатора.

Электролитические конденсаторы устанавливаются, как правило, в цепях постоянного или выпрямленного тока, и обычно выводы конденсатора подключаются к положительному полюсу цепи, а металлический корпус – к отрицательному (общей точке цепи, к металлическому корпусу устройства). У конденсаторов иной конструкции полярность выводов должна быть обозначена.

*Диоды и транзисторы.* Все полупроводниковые приборы очень чувствительны к температуре, поэтому определять их параметры следует с учётом этого обстоятельства, желательно при комнатной температуре. Монтаж выполняется таким образом, чтобы эти приборы располагались вдали от источников тепла. При пайке или лужении выводов рекомендуется применять припой с низкой температурой плавления,

пользоваться маломощным паяльником и касаться им вывода прибора на время не более 2...3 с на расстоянии не менее 3...5 мм от корпуса.

Рабочие значения тока, напряжения, мощности должны быть существенно ниже предельных. При снижении тока и напряжения до 70% предельного значения надёжность полупроводниковых приборов возрастает в десятки раз.

Следует учитывать также форму кривой тока и характер нагрузки. Приводимые в справочниках средние значения токов выпрямительных диодов соответствуют работе вентиля на активную нагрузку, при угле проводимости 180 град.эл. В этом случае амплитудное значение тока в 3,14 раза, а действующее в 1,57 раза превышает его среднее значение. При работе диодов в выпрямителях на активно – ёмкостную нагрузку эти отношения могут быть гораздо больше, в зависимости от коэффициента пульсации на выходе выпрямителя. Так, при коэффициенте пульсации 0,1% амплитудное значение тока может достигать 15, а действующее – 3,5 среднего значения. Поэтому для данных схем рекомендуется снижать рабочий ток через каждый диод не менее чем в 2,2 раза против максимально допустимого среднего значения по справочнику.

При последовательном включении диодов обратное напряжение на каждом из них должно быть примерно одинаковым. Но так как обратное напряжение на диоде в такой цепи определяется падением напряжения на его обратном сопротивлении, значение которого у различных вентилях может отличаться в несколько раз, обратное напряжение на одном или нескольких вентилях может превысить допустимое значение. Для выравнивания обратного напряжения на последовательно соединённых вентилях их шунтируют резисторами, сопротивление которых должно быть в 3...5 раз меньше обратного сопротивления диодов.

При параллельном включении диодов принимают меры к равномерному распределению тока между ними. В противном случае токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально прямому сопротивлению диода и могут превысить максимально допустимое значение. Для выравнивания токов последовательно с вентилями вводят резисторы, сопротивление которых должно быть по крайней мере втрое больше прямого сопротивления диодов.

Разумеется, для обеих схем вентиля подбираются одного типа и с близкими значениями параметров: при последовательном соединении – с одним и тем же номинальным обратным напряжением (одного класса), при параллельном – с тем же или близким значением прямого падения напряжения (одной группы).

Общую оценку работоспособности диода можно произвести с помощью омметра: у исправного прибора прямое сопротивление на несколько порядков меньше обратного. Показания омметра «0» или «∞» указывают первое – на пробой, второе – на обрыв выводов или разрушение полупроводниковой структуры диода. Надо только выбирать предел измерения омметра так, чтобы измерительный ток не превысил допустимого для данного диода значения.

Общую оценку пригодности транзистора также можно произвести с помощью омметра. Прямое сопротивление перехода эмиттер – коллектор составляет обычно у транзисторов малой мощности 50...100 Ом, средней и большой – 10...30 Ом. Обратное сопротивление перехода должно быть у транзисторов малой мощности порядка десятков и сотен килоом, средней и большой мощности – свыше 1 кОм.

Более полное суждение о качестве транзистора можно получить путём измерения его основных параметров (рис. 8.5). *Обратным током* коллекторного перехода  $I_{к.о}$  называют ток, протекающий через переход коллектор – база при отключённом эмиттере и заданном обратном напряжении  $U_{обр}$  между коллектором и базой. Измерение тока  $I_{к.о}$  выполняют по схеме рис.8.5,а. Сопротивление резистора в цепи базы, защищающего схему от коротких замыканий, выбирают по выражению

$$R \approx 0,1 U_{обр} / I_{к.о}.$$

*Начальный ток коллектора*  $I_{к.н}$  – это ток в цепи коллектора при замкнутой цепи эмиттер- база и заданном напряжении на коллекторе. Измерение тока  $I_{к.н}$  выполняют по схеме рис. 8.5,б. Сопротивление резистора  $R_б$  в базовой цепи составляет 500...1000 Ом для маломощных транзисторов, для мощных – до 2 Ом. Токоограничивающее сопротивление рассчитывают по формуле

$$R \approx U_{обр} / I_{к.н}.$$

Значения напряжения питания в схемах 8.5,а и 8.5, б оговариваются в паспортных данных транзистора.

*Коэффициент усиления* по току определяется по схеме рис.8.5,в. В одном из положений переключателя устанавливают ток базы  $I_{б1}$ , в другом – измеряют соответствующий ему ток коллектора  $I_{к1}$ . Далее устанавливают ток базы  $I_{б2} = (1,3...1,5) I_{к1}$  и измеряют ток  $I_{к2}$ . Коэффициент усиления рассчитывают как

$$\beta \approx (I_{к2} - I_{к1}) / (I_{б2} - I_{б1}).$$

Приближённый характер расчёта обусловлен нелинейностью зависимости  $I_k(I_b)$ .

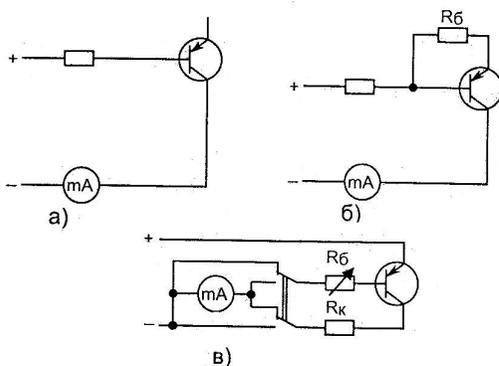


Рис. 8.5. Схемы измерения параметров транзистора: а) обратного тока коллекторного перехода; б) начального тока коллектора; в) коэффициента усиления по току

*Логические схемы. Интегральные микросхемы.* Проверить отдельные элементы этих схем невозможно, достаточно лишь убедиться в работоспособности схемы. Для этого необходимо подать на вход схемы нормированный сигнал и наблюдать за её реакцией. При этом удобно пользоваться портативными логическими устройствами типа логического пробника, разработанными собственными силами либо выпускаемыми промышленностью. Ряд моделей таких пробников был разработан организациями ГПИ Тяжпромэлектропроект.

Одна из них (П-1) предназначена для индикации состояния транзисторно – транзисторных логических элементов (микросхем серии К155 и т.п.). Информация об уровне сигнала получается при касании иглы пробника проверяемой точки схемы. Уровню «логическая 1» соответствует свечение индикатора, «логический 0» – отсутствие свечения, а неопределённый уровень сигнала индицируется цветом свечения. Особенностью пробника является устройство для растяжения импульсов, позволяющее индицировать узкие одиночные импульсы длительностью не менее 50 нс или серии импульсов частотой до 10 МГц.

Модель ИЛС-4 предназначена для испытания логических элементов серии «Логика Т». Число команд – 11, из них 10 потенциальных и одна импульсная с регулируемой длительностью от 2 до 20 мс. Число контролируемых сигналов – 12, из них 2 с запоминанием.

Разнообразные логические пробники, удобные для выполнения наладочных работ, предлагаются иными фирмами. Так, фирма Conrad Electronic выпускает портативный (масса 50 г) логический тестер MOD 625 для проверки элементов ТТЛ- и КМОП- логики. Тестер имеет встроенный жидкокристаллический индикатор импульсов и мультивибратор. Входное сопротивление 120 кОм, максимальная частота 50 МГц, минимальная необходимая длительность импульса 10 нс. Генератор 0,5/400 Гц, с переключением. Сопротивление входа синхронизации 1 МОм.

Проверку сложных бесконтактных схем на функционирование производят поэтапно. На первом этапе проверяются элементарные составные части (модули) устройства: ячейки, субблоки, блоки. Для этой цели используются тестеры или специальные устройства, поставляемые изготовителем. На втором этапе проверяется функционирование более сложных узлов, например, комплектных устройств. Эти операции осуществляются с помощью специализированных имитаторов, вырабатывающих определённый набор сигналов для воспроизведения реальных режимов работы узла. Для программируемых систем предусматриваются тестовые программы проверки. На заключительном этапе проводится проверка работы устройства в рабочем режиме.

При обнаружении неисправного элемента или узла следует сразу же заменить его на исправный, а затем по возможности выявить конкретный дефект неисправного модуля. Большинство дефектов бывает связано с ошибками внутриблочного монтажа, некачественным монтажом и пайкой печатных плат, повреждением печатных проводников. Вышедшие из строя диоды, транзисторы, микросхемы подлежат замене.

Возможны также неисправности, связанные с временем распространения сигналов. Если время прохождения логических сигналов от входа к выходу по нескольким независимым путям оказывается примерно одинаковым, то возникают так наз. «гонки» сигналов и неопределённые комбинации их, что приводит к появлению ложных

сигналов на выходе. Для отыскания причин таких дефектов проверяют параметры сигналов по всему тракту их прохождения от входа к выходу. Эти работы производятся с помощью осциллографа и специальной аппаратуры, они достаточно трудоёмки и сложны.

Ввиду того, что микросхемы и узлы автоматики на их основе имеют высокое входное сопротивление и малое потребление, они подвержены влиянию электромагнитных помех. Различают помехи внутреннего происхождения или внешнего. Источниками внешних электромагнитных помех могут быть тиристорные преобразователи, электродвигатели, коммутационные аппараты. Внутренние помехи могут быть обусловлены особенностями элементной базы, паразитными связями, взаимным влиянием отдельных узлов через источники питания и др. Хотя основные мероприятия по обеспечению помехоустойчивости стремятся осуществить ещё на стадии проектирования, а затем и монтажа, полностью устранить влияние помех удаётся при этом не всегда.

Статической называют помеху, время воздействия которой на данный логический элемент значительно превышает время его переключения, динамической – такую помеху, длительность которой соизмерима со временем переключения. В общем случае допускается наличие помехи, значение которой заведомо недостаточно для переключения логической схемы. Для схем серии К155, например, максимально допустимое напряжение статической помехи на входе принимают равным 0,4 В.

Импульсные (динамические) помехи могут вызываться следующими факторами: отражениями в линиях связи от их неоднородностей или несогласованных нагрузок; перекрёстными наводками между линиями связи; паразитными связями между микросхемами по цепям питания и заземления; искажением формы сигнала; «гонкой» сигналов; наводкой от внешних электромагнитных полей. Помехи, вызванные взаимодействием соседних сигнальных линий, называют перекрестными. Для уменьшения таких помех необходимо располагать проводники возможно ближе к проводящей поверхности, увеличивать расстояние между проводниками или применять витые пары. Линия в виде витой пары имеет фиксированное волновое сопротивление, не зависящее от расстояния до проводящей поверхности, что облегчает согласование линии связи как с источником, так и с приёмником сигнала.

Сигналы передаются по данной линии связи без искажения лишь при отсутствии отражённых волн от конца линии. Для этого сопротивление приёмника должно быть равно волновому сопротивлению линии, т.е., как говорят, приёмник и линия должны быть согласованы. Если же это условие не соблюдается, то согласования можно добиться, включив между линией и приёмником согласующее устройство, например, трансформатор.

Кроме изложенных, на стадиях монтажа и наладки можно осуществить следующие общие рекомендации по обеспечению помехоустойчивости цифровых и логических устройств. Все металлические части и экраны выводятся на отдельный контакт разъёма, который подключают к шине «земля» комплектного устройства, избегая при этом соединения «шлейфом». Не рекомендуется подавать на разъёмы блоков сигналы от внешних устройств без промежуточной электрической развязки.

С целью снижения статических помех напряжение питания должно быть стабилизированным и максимально сглаженным. Разводка питания по блокам должна выполняться радиально с применением свитых проводов. Для подавления импульсных

помех от источников питания устанавливаются сетевые С- или LC- фильтры. Сетевые трансформаторы должны иметь электростатические экраны между первичной и вторичной обмотками, позволяющие в 10...15 раз снизить паразитную межобмоточную ёмкость, которая может достигать сотен пикофард.

Внутренние линии связи должны быть возможно короче. Одиночные провода не следует укладывать в жгут. Несогласованные витые пары допускается укладывать в плоские жгуты и в группы проводов без увязки их в жгуты. Длинные линии связи выполняются согласованными витыми парами или коаксиальным кабелем. Монтаж линий связи между блоками и переключателями, тумблерами и т.п. выполняется экранированными или одиночными проводами, собранными в жгут с общей экранной оплёткой. Не допускается укладка в один жгут информационных цепей с цепями коммутации и индикации, а также с цепями переменного тока 50 Гц.

Внешние связи. Цепи внешних сигналов получают питание:

цепи входных сигналов, поступающих от контактных коммутационных аппаратов (кнопок, переключателей и т.п.), – от источников питания внешних устройств соответствующего комплектного устройства;

цепи выходных сигналов комплектного устройства – от источника питания внешних устройств этого комплектного устройства.

Внешняя информация может быть подразделена на три группы:

команды, поступающие от контактных или бесконтактных аппаратов;

информация в виде параллельного кода;

последовательность импульсов.

Сигналы первой группы рекомендуется передавать кабелями связи, имеющими парную скрутку проводов. Сигналы второй группы могут передаваться по кабелям связи с общим экраном, поверх которого наложена изоляция, а сигналы третьей – с помощью коаксиальных кабелей. При передаче цифровых и импульсных сигналов с частотой более 10 кГц целесообразно применение одно- и многополюсных коаксиальных кабелей.

В промышленных установках с преобладанием низкочастотных полей (50...1200 Гц) целесообразно применение стального экрана в качестве основного, дополнительное же применение медного экрана оправдано лишь при воздействии высокочастотных (свыше 10 кГц) электромагнитных полей. При передаче низкочастотных сигналов, в том числе и аналоговых, могут использоваться двухполюсные и многополюсные кабели и провода связи.

### ***8.1.3.2. Промежуточные реле и реле времени.***

Сопrotивление изоляции реле с электронными компонентами измеряют мегаомметром на 500 В; оно должно быть не ниже 50 МОм. Предварительно следует проверить отсутствие замыканий на землю в схеме реле посредством омметра, ЭДС источника питания которого не превышает 15 В. При испытании изоляции повышенным напряжением цепи с электронными элементами должны быть отключены.

Проверяется работа реле при пониженном до 80% и повышенном до 110% номинального значении напряжения. Реле времени проверяют на рабочей уставке, а также и на других, если они заданы.

Обнаружить неисправности в схеме можно путём сравнения проверяемого реле с заведомо исправным. Для этого оба реле подключают к одному источнику питания и

подводят к ним напряжение (ток) в пределах 0,5...1,5 уставки. Далее измеряют напряжение в одинаковых точках схемы обоих реле и сравнивают полученные результаты.

При замыканиях на землю в цепях оперативного постоянного тока возможно ложное срабатывание высокоомных промежуточных реле (РП16, РП18 и др.), которые к тому же могут самоудерживаться через сопротивление контроля изоляции. Для предотвращения этих явлений необходимо настроить реле на напряжение срабатывания 0,6...0,7 номинального. В тех случаях, когда ложное срабатывание реле может привести в действие коммутационные аппараты или устройства противоаварийной автоматики, искусственно снижают сопротивление цепи обмотки, шунтируя её резисторами. Номинальная рассеиваемая мощность этих резисторов должна быть порядка 15...20 Вт, сопротивление 5,1 кОм для сети оперативного тока 220 В и 1,2 кОм для сети 110 В. В общем случае сопротивление шунтирующего резистора выбирается таким, чтобы результирующее сопротивление было не более 4 кОм при 220 В и не более 1 кОм при 110 В. Ввиду значительного тепловыделения эти резисторы должны монтироваться вне корпуса реле.

#### 8.1.3.3. Реле тока и напряжения.

К реле подводится оперативное напряжение (регулируемое), на вход подаётся контролируемая величина (напряжение или ток), значение которой регулируется автотрансформатором или потенциометром. Измерительные приборы в контролируемых цепях должны иметь класс точности 0,5. С помощью кнопочных переключателей на шкале набирается сумма чисел, соответствующая заданной уставке:

$$N = (A_{уст} / A_{мин}) - 1,$$

где  $A_{уст}$  и  $A_{мин}$  – соответственно заданная и минимальная уставки по току (реле РСТ11 – РСТ14) или по напряжению (реле РСН14 – РСН17);

$$N = U_{уст} - 180 \text{ (реле РСН12, РСН18).}$$

Уставка реле контроля изоляции выставляется непосредственно в единицах измерения (у РСН11 – в вольтах).

Вначале измеряют ток или напряжение срабатывания реле и определяют коэффициент возврата, который должен быть не ниже 0,9 для максимальных реле и не выше 1,1 для реле минимального напряжения, если не нормируются иные значения. Проверяется работа реле при пониженном на 20% напряжении оперативного тока. Далее 3 – 4 раза включают реле при повышенных значениях контролируемой величины: токовые реле при 10-кратном токе уставки, реле напряжения – при 110% номинального напряжения. Если после этих испытаний параметры срабатывания не изменились, реле считают исправным. У биполярных реле РСН11 расхождение значений напряжения срабатывания при прямой и обратной полярности не должно превышать 10%.

В случае неисправности реле следует найти и заменить повреждённый элемент. Когда при визуальном осмотре обнаружить его не удаётся, проверяют напряжение в контрольных точках и сравнивают результаты с заводскими данными. Для разных экземпляров реле расхождение может составлять 10...15%; измерения производят с помощью электронных и цифровых вольтметров, осциллографов.

У реле РСТ11 – 14 и РСН 14 – 17 напряжение измеряется относительно нулевого потенциала схемы. В первой контрольной точке ХР1 измеряется напряжение на выходе компаратора – постоянное до срабатывания реле и периодическое, с импульсами прямоугольной формы, после его срабатывания. Во второй контрольной точке ХР2 измеряется напряжение, которое управляет компаратором и имеет небольшое отрицательное значение, в третьей – напряжение выхода компаратора, положительное или отрицательное.

В схеме реле РСН11 на первой контрольной точке измеряется напряжение выхода компаратора, на второй и третьей – положительное и отрицательное оперативное напряжение, на четвёртой разность между нестабилизированным (48 В) и стабилизированным (15 В) выпрямленным напряжением. Измерения производятся относительно точки «-» контролируемого напряжения.

В схемах реле РСН12, РСН18 оперативное напряжение измеряется на первой контрольной точке, выходное напряжение компаратора – на второй и напряжение цепи управления исполнительным электромагнитным реле – на третьей.

Напряжение срабатывания электромагнитного реле должно быть не более 27 В для реле РСН11 и 66 В для реле серий РСТ11 – 14, РСН14 – РСН17, РСН12, РСН18.

#### **8.1.3.4. Реле тока дифференциальное (РСТ15).**

После проверки реле на функционирование настраивают его на рабочей уставке в следующем порядке. Подают оперативное напряжение 220 В постоянного тока на зажимы питания схемы и регулируемое переменное напряжение от внешнего источника – на входные зажимы трансреактора. Плавно увеличивая входной ток, фиксируют срабатывание реле и определяют основную относительную погрешность по формуле

$$\delta I = \frac{I_{\text{ср}} - I_{\text{ср.расч}}}{I} 100\%,$$

где  $I_{\text{ср}}$  – среднее из результатов трёх измерений тока срабатывания на выбранной уставке;  $I_{\text{ср.расч}}$  – расчётное значение тока срабатывания.

При получении погрешности  $\delta I > 10\%$  или в случае отказа реле проверяют его электрическую схему. Убедившись в наличии оперативного напряжения, выставляют минимальные уставки срабатывания. Наблюдают форму кривой напряжения в контрольных точках, измеряют его при отсутствии входного тока и при номинальном токе и сравнивают полученные значения с имеющимися в заводских инструкциях, протоколах аналогичных испытаний и др. документах.

При необходимости проверяют частотную характеристику фильтра и задержку на срабатывание. Для снятия частотной характеристики вход фильтра подключают к регулируемому источнику синусоидального напряжения и, изменяя частоту от нуля до двойной номинальной, при входном напряжении  $U_{\text{вх}} = 1 \dots 2$  В, измеряют напряжение  $U_{\text{вых}}$  на выходе фильтра и вычисляют отношение  $U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ . Выдержка времени определяется сначала совместно для элемента задержки и выходного реле, затем измеряют собственное время срабатывания последнего, подав «минус» напряжения питания непосредственно на его обмотку. Само это реле проверяется только в случае отказа в

работе и при условии исправности схемы от её входа до выхода компаратора. Изменяя напряжение на реле, определяют напряжение срабатывания, которое не должно превышать 60 В. В случае неисправности печатной платы её следует заменить.

#### **8.1.3.5. Реле напряжения обратной последовательности (РСН13).**

Испытание проводят с помощью источника регулируемого трёхфазного напряжения, которое получают либо от комплектной установки, фазорегулятора, трёхфазного автотрансформатора, либо собирают схему из реостатов или однофазных автотрансформаторов. В сети 3 х 220 В два автотрансформатора соединяют по схеме неполной звезды, в сети 3 х 380 В применяют понижающие трансформаторы 380/220 В или соединяют три ЛАТРа звездой.

С помощью кнопочных переключателей задают требуемую уставку по напряжению обратной последовательности так, чтобы сумма чисел на шкале реле была равна

$$N = U_{уст} - U_{мин},$$

где  $U_{уст}$  – заданное линейное напряжение уставки;

$U_{мин} = 6 В$  – напряжение минимальной уставки.

Линейное напряжение переменного тока поочередно подводят к двум входным зажимам реле, а третий соединяют с одним из них, имитируя тем самым двухфазное короткое замыкание. Составляющая линейного напряжения обратной последовательности будет при этом в  $\sqrt{3}$  раз меньше напряжения, подводимого к реле. Измеряют напряжение срабатывания и возврата реле при всех трёх сочетаниях замкнувшихся фаз. Если измеренные значения напряжения срабатывания соответствуют уставке, а разница между ними не превышает 2%, реле считается исправным.

На реле подаётся симметричная система линейных напряжений 100 В прямой последовательности, причём асимметрия не должна превышать 1 В. Совместной регулировкой резисторов в плечах входного фильтра сводят к минимуму напряжение небаланса. При правильно настроенном фильтре напряжение на его выходе обычно не превышает 1 В.

Для проверки реагирующего органа следует поменять подключение к реле любых двух фаз и постепенно повышать переменное напряжение до срабатывания реле. Если при этом линейные напряжения срабатывания отличаются от уставки более, чем это допускается техническими условиями, то настройку реле корректируют посредством регулируемого резистора на входе компаратора. Потенциалы в контрольных точках должны соответствовать заводским данным.

Исполнительный орган проверяют в случае, когда при наличии асимметрии реле не срабатывает, в то время как фильтр и реагирующий орган исправны. Напряжение срабатывания электромеханического выходного реле не должно превышать 60 В.

#### **8.1.3.6. Реле направления мощности (РСМ13).**

Посредством ЛАТРа ко входу реле подводится напряжение 100 В, а с помощью другого ЛАТРа и понижающего трансформатора подаётся ток. Оперативное напряжение постоянного тока должно регулироваться в пределах 175...245 В. Исходным для реле минимальной мощности является состояние большой нагрузки, когда ток равен номинальному, для реле максимальной мощности – состояние минимальной нагрузки.

Выставляют расчётную уставку, измеряют параметры срабатывания и подсчитывают коэффициент возврата реле при номинальном оперативном напряжении 220 В. Измерения повторяют при пониженном на 20% (до 176 В) и повышенном на 10% (до 242 В) от номинального значения оперативного напряжения. При всех переключениях реле дребезг контактов должен отсутствовать. В случае отклонения полученных данных от паспортных производят поэлементную проверку реле.

а) ШИМ. Проверяют работу генератора пилообразного напряжения и широтно – импульсного модулятора по кривым напряжения на входе и выходе ШИМ. В схеме предусмотрены переменные резисторы для балансировки напряжения и изменения глубины модуляции и коэффициента усиления по току. ШИМ управляет амплитудно – импульсным модулятором (АИМ).

б) АИМ представляет собой два разнополярных транзисторных ключа. Предельные значения амплитуды положительных и отрицательных импульсов на выходе АИМ, измеренные на эмиттерах этих транзисторов, должны быть равны. На входе канала напряжения имеется РС – корректор фазы с регулируемым резистором, посредством которого можно влиять на угловую погрешность и угол максимальной чувствительности реле.

в) Фильтр низкой частоты. Кривая напряжения на выходе фильтра, которую можно наблюдать на выводе переключателя уставок, должна быть сглаженной.

г) Исполнительный орган. Напряжение срабатывания выходного реле не должно превышать 60 В. Измерение производят, изменяя напряжение на входных зажимах оперативного тока и подавая на измерительный вход напряжение больше уставки. Если исправное реле не срабатывает, следует проверить элементы схемы исполнительного органа, особенно полупроводниковые.

#### **8.1.3.7. Реле контроля напряжения и угла сдвига фаз РСНФ12.**

Первичные обмотки трансформаторов напряжения линии и шин соединяют последовательно и на их выводы подают трёхфазное напряжение, регулируемое по значению и углу сдвига фаз посредством потенциометров (реостатов). Регулировка напряжения на первом трансформаторе должна обеспечиваться в пределах от 45 до 110 В, на втором – от 80 до 100 В, а угол между векторами этих напряжений – в пределах  $\pm 90^\circ$ . Рабочая уставка реле по каналу сравнения фаз напряжения определяется по выражению

$$N = \varphi - \varphi_{\text{мин}}$$

где N – сумма чисел на шкале уставок;

$\varphi$  – рабочая уставка, град.эл;

$\varphi_{\text{мин}} = 4$  – минимальная уставка, град.эл.

Измеренное значение уставки не должно отличаться от расчётного более чем на 10%, коэффициент возврата не должен быть больше 1,2.

Изменяя входное напряжение, проверяют установленные параметры реле и работу сигнализации каналов напряжения и сравнения фаз. Коэффициент возврата реле по каналу контроля напряжения линии должен быть не более 1,2, по каналу контроля

напряжения шин – в пределах 0,85...0,95. Работу схемы тестирования проверяют при угле сдвига фаз, равном нулю.

Если результаты проверки не удовлетворяют требованиям технических документов, следует проверить потенциалы в контрольных точках и убедиться в исправности элементов схемы. Напряжение срабатывания выходных реле должно быть не выше 16 В, напряжение возврата не ниже 2...3 В.

#### **8.1.4. Микропроцессорные устройства РЗА.**

Основным отличием методик наладки этих устройств от применяемых при наладке устройств защиты на электромагнитных или полупроводниковых реле является программный ввод параметров срабатывания защиты и логики работы системной автоматики (АВР, АПВ) и сигнализации.

Установка и изменение параметров выполняются с помощью кнопок на передней панели устройства или с внешнего пульта управления, который подключается к разъему на лицевой панели. Первичную настройку уставок защиты удобнее выполнять с выносного пульта, т. к. он имеет более развитую клавиатуру и ввод параметров существенно упрощается. Вводимые функции и параметры настройки отражаются на буквенно-цифровом индикаторе. С помощью кнопок выполняется перемещение по страницам меню и обеспечивается доступ к желаемым функциям настройки параметров.

В качестве примера ниже рассматривается вкратце настройка устройства защиты на основе микропроцессорного блока типа Seram 2000 производства GROUP SCHNEIDER (Франция).

Наладка устройства начинается с *установки* используемых *входов*, определяющих состав защиты присоединения. Установка выполняется изменением положения микровыключателей на монтажной панели, к которой подводят провода от периферийных устройств (трансформаторов тока и напряжения, выключателя и пр.). При этом определяют для каждой фазы:

- первичный ток трансформатора тока;
- вторичный ток трансформатора тока (5 или 1 А);
- способ измерения тока  $3I_0$  – как сумму фазных токов или с помощью трансформатора тока нулевой последовательности;
- способ контроля фазного напряжения;
- способ контроля напряжения нулевой последовательности  $3U_0$  – как суммы фазных напряжений или с помощью трансформатора напряжения по схеме разомкнутого треугольника.

*Ввод функций* осуществляется в соответствии с проектной схемой и картой уставок присоединения. Основное меню для настройки параметров состоит из трех страниц: меню основных параметров; меню защиты; меню параметров эксплуатации и логической схемы управления. В меню основных параметров вводят паспортные данные сети и оборудования:

- номинальная частота сети (50 Гц);
- данные по трансформаторам тока:  
первичный ток,  
число трансформаторов тока,  
номинальный ток присоединения (электродвигателя, силового

трансформатора),

номинальный ток трансформатора нулевой последовательности;

- данные по трансформаторам напряжения: номинальное первичное и вторичное напряжение, количество трансформаторов напряжения, метод измерения  $3U_0$ ;
  - время интегрирования для ваттметров при измерении активной и реактивной энергии;
  - направление энергии и мощности;
- скорость передачи и адрес пересылки данных по сети.

При текущей эксплуатации эти данные не меняются.

*Настройка параметров защит.*

Меню защит позволяет последовательно выбрать все заданные виды защит присоединения и установить вид характеристики и параметры срабатывания функций. Пределы регулирования параметров определяет и показывает меню. Ввод параметров выполняется цифровыми кнопками и перемещением курсора по данным на дисплее.

Настройка схемы управления и сигнализации присоединения. Используемые логические функции должны быть определены в проекте в виде схемных решений и задания параметров (АПВ, АВР). При настройке схемы в меню необходимо определить активность соответствующих входов и выходов схемы. На входы устройства подаются сигналы состояния выключателя и общеподстанционного оборудования, выходные сигналы служат для включения (отключения) выключателя и сигнализации о срабатывании защит или состоянии параметров сети, отличающихся от заданных.

В зависимости от вида присоединения (электродвигатель, силовой трансформатор, питающий фидер) число и вид используемых входов и выходов существенно отличаются. Для наиболее распространенных видов присоединений имеются стандартные карты настройки, позволяющие определить необходимый набор присоединения входов и выходов устройства. Часть временных функций, используемых в большинстве присоединений (время импульса включения – отключения выключателя), установлены при заводской настройке. При необходимости они также могут быть изменены. Сигнализация может быть выполнена с выдачей сигналов в систему сигнализации подстанции на релейной аппаратуре и одновременной передачей аварийных и предупредительных сигналов по сети на компьютер.

Параметры настройки микропроцессорного устройства заносят в «карту регулировки», которая является документом, отражающим результаты настройки системы защиты, управления и сигнализации присоединения.

### **8.1.5. Устройства автоматки.**

#### ***8.1.5.1. Цепи управления, блокировки и сигнализации.***

Эти цепи испытываются согласно требованиям, предъявляемым ПУЭ (1.8.37, изд.7-е) ко всем вторичным цепям. Измеряется сопротивление изоляции, производится испытание её повышенным напряжением. Автоматические выключатели и контакторы проверяются многократными включениями и отключениями при номинальном и пониженном до 90% (включение) и до 80% номинального (отключение) напряжении оперативного тока (не менее 5 раз). Полностью собранные схемы прове-

ряются на функционирование при номинальном и пониженном значениях напряжения оперативного тока, % номинального:

схемы защиты и сигнализации – 80;

схемы управления

на включение – 90;

на отключение – 80.

Схемы на бесконтактных логических элементах испытываются на функционирование при пониженном до 85 и повышенном до 110% напряжении оперативного тока путём изменения напряжения на входе в блок питания.

Кроме того, имеет свою специфику наладка схем различного назначения. При проверке схем управления приводами коммутационных аппаратов необходимо обратить внимание на состояние блокировочных контактов в цепях отключающих и включающих катушек и на правильность их регулировки. Блок – контакты не могут точно повторять положение главных контактов выключателя. Движение подвижного контакта КСА начинается несколько позже и заканчивается несколько раньше, чем поворот вала выключателя. Для того, чтобы выключатель надёжно включался, блокировочный контакт в цепи катушки отключения должен замыкаться в конце хода привода на включение, но немного раньше замыкания главных контактов, чтобы обеспечить надёжное отключение выключателя при включении его на короткое замыкание. Угол поворота валика КСА должен быть около  $90^{\circ}$ . Наименьший угол между рычагом на валике и ведущей его тягой должен быть не менее  $30^{\circ}$ , иначе весь механизм слишком близко подойдёт к мёртвой точке. Блок-контакт в цепи контактора включения электромагнитного привода должен размыкаться как можно позже, чтобы обеспечить надёжность включения, а также разрыва цепи по окончании операции включения.

Регулировка блок-контактов различных типов осуществляется:

- а) изменением длины тяги, управляющей валиком блок-контактов;
- б) перестановкой конца тяги в различные отверстия рычага на валике;
- в) поворотом рычага;
- г) поворотом подвижных контактов на своём валике.

Для увеличения времени замкнутого состояния блок-контактов две или три соседние шайбы подвижных контактов сдвигают между собой по граням вала и включают их параллельно. Для повышения длительно допустимого тока блок-контакты соединяют параллельно, для увеличения разрывной мощности – последовательно. При регулировке необходимо тщательно проверить исправность отдельных элементов контактной системы и надёжность передачи к ней от вала переключателя. Регулировка контактов производится при медленном включении выключателя вручную (пружинные и ручные приводы) или домкратом (электромагнитные приводы) и опробуется при нормальном включении и отключении выключателя.

Проверка устройств сигнализации состоит в следующем:

- а) проверка элементов устройств центральной сигнализации (кнопок, ключей, светоиндикаторов и табло, резисторов и др.);
- б) проверка шинок сигнализации и их связей;
- в) наладка отдельных схем (мигания, импульсной сигнализации и пр.) и проверка действия их от кнопок, ключей и при имитации сигналов;
- г) наладка индивидуальной и групповой сигнализации.

При проверке табло и сигнальных ламп обращается внимание на исправность ламп, правильность выбора цвета свечения (светофильтров), состояние контактов гнезд, чёткость и правильность надписей на табло. Проверяются все внешние и внутренние контактные соединения, качество паек, чистота и надёжность штепсельных контактов.

Для обеспечения длительного срока службы сигнальных ламп накаливания последовательно с лампой включают ограничительный резистор, сопротивление  $R_{ог}$  которого выбирают так, чтобы ток в лампе не достигал номинального значения даже при повышенном напряжении сети, но в то же время свечение лампы оставалось достаточным:

$$R_{ог} = U_{л} (1,25 U_{с} - U_{л}) / P_{л},$$

где  $U_{с}$  и  $U_{л}$  – номинальные напряжения сети и лампы;  $P_{л}$  – номинальная мощность лампы. Мощность резистора выбирают с таким расчётом, чтобы нагрев его не оказывал заметного влияния на соседние элементы схемы.

При проверке шинок сигнализации следует убедиться в том, что надписи на каждой шинке соответствуют её назначению, а также в отсутствии связи между различными шинками.

Для проверки реле импульсной сигнализации, в частности, РИС-Э2М, на него подают номинальное напряжение и устанавливают ток в первичной цепи импульсного трансформатора равным 30...35 мА. Кратковременно замыкая и размыкая цепь, убеждаются в надёжном срабатывании и отпуске реле. Затем, установив предварительно в этой цепи ток 1,5 А, проверяют действие реле при подаче дополнительно импульса тока, значение которого не должно превышать 50 мА. Опробуют работу цепей съёма сигнала с центрально пульта и от реле времени. Далее проверяют работу реле при повышенном до 1,15 и пониженном до 0,8 номинального напряжении оперативного тока. Если реле не срабатывает или срабатывает при пусковом токе больше 50 мА, наиболее вероятной причиной могут быть дефекты транзисторов.

Сопротивления резисторов  $R_N$  (рис. 6.34), через которые запускаются реле импульсной сигнализации, выбираются из условий, Ом:

Для реле РИС-Э2, РТД11-04, РТД-12

$$R_N \leq U_{с} / 0,2,$$

для реле РИС-Э2М, РТД 11-01

$$R_N \leq U_{с} / 0,05.$$

При номинальном напряжении  $U_{с} = 220$  В обычно устанавливают сопротивление  $R_N = 800 \dots 1000$  Ом в первом случае и 3900 Ом – во втором. Соблюдение этих условий обеспечивает допустимый ток соответственно 5 А (приём до 20 сигналов с током до 250 мА каждый) и 1,5 А (приём до 30 сигналов по 50 мА). Уменьшение сопротивлений повышает надёжность срабатывания реле, но снижает число принимаемых сигналов из-за насыщения импульсного трансформатора.

Как известно, в сетях с малым током замыкания на землю при неопасных однофазных замыканиях защита действует на сигнализацию. Если в качестве фильтра токов нулевой последовательности в защите используется кабельный насыщающийся трансформатор тока (ТНП), то при проверке монтажа ТНП необходимо иметь в виду следующее.

Провод заземления кабельной воронки должен проходить через окно ТНП и далее подсоединяться к заземляющему устройству (рис.6.20); на участке от воронки до места установки ТНП броня кабеля и заземляющий проводник должны быть надёжно изолированы от стали ТНП, равно как и броня и воронка – от хомутов или скоб, крепящих кабель к заземлённым конструкциям.

Отстройка защиты от токов растекания оценивается по небалансу токов в заземляющем проводнике и броне кабеля. Для этого проводник отсоединяется от заземляющего устройства и между ними включается источник тока. Ток небаланса измеряется во вторичной обмотке ТНП. Когда ток от источника больше тока однофазного замыкания, ток небаланса должен быть в 2...3 раза меньше уставки защиты.

Изоляция сердечника ТНП и крепящих скоб или хомутов относительно брони кабеля испытывается мегаомметром на 2500 В. Снимается характеристика намагничивания ТНП  $U = f(I)$ . Проверяется взаимодействие устройства с центральной сигнализацией. Наконец, проверяют устройство сигнализации рабочим током и напряжением, для чего измеряют ток или напряжение непосредственно на входе реле, фиксируя при этом значения первичного тока нагрузки проверяемого присоединения.

Надёжность действия электромеханических блокировок определяется, в основном, исправностью блокировочных механизмов (замков, рычагов и т.п.). Нарушение правильной работы механических блокировок обычно вызывается дефектами механизмов или их неправильной регулировкой. В шкафах КРУ, например, деформация установочных рычага, открывающего защитные шторы, может привести к тому, что при выкатывании подвижного элемента шторы не закроются. Плохо отрегулированные подвижные контакты заземляющего разъединителя могут не дойти полностью до включённого положения; при разрегулировке механизма элегазовых КРУ могут не пройти команды на операцию В или О.

#### **8.1.5.2. Устройства АПВ и АВР.**

Прежде всего надо проверить устройства АПВ и АВР на выполнение основных требований к ним, изложенных в пп.6.3.4.4 и 6.3.4.5.

При проверке комплектных реле АПВ определяется время заряда конденсатора, для чего у реле РП-58, например, подаётся оперативное напряжение на зажимы 6 – 7. Время заряда фиксируется по секундомеру от момента подачи напряжения до момента срабатывания промежуточного реле КЛ1 (рис.6.35). Последнее не должно срабатывать, если время до замыкания основного контакта реле времени КТ не превышает 22 с, а если это время достигает 26 с, промежуточное реле должно срабатывать всегда. Время заряда конденсатора до напряжения срабатывания промежуточного реле КЛ1 можно регулировать изменением нажатия на контактную систему реле. Замыкание основного контакта реле времени должно приводить к срабатыванию реле КЛ1, если время с момента подачи напряжения, равного 80% номинального, до момента замыкания основного контакта составит 90 с.

При проверке промежуточного реле определяются токи и напряжения срабатывания, возврата или удерживания по каждой обмотке. В удерживающей обмотке устанавливается ток, равный 80% номинального, или напряжение, равное 70% номинального, затем реле вручную устанавливается в положение после срабатывания и проверяется на удерживание в этом положении при обесточенной рабочей обмотке.

У комплектного реле РПВ-258 при включении реле времени КТ1 через 62 с после подачи напряжения замыкание проскальзывающего контакта с выдержкой времени 1с не должно вызывать срабатывания промежуточного реле КЛ1, а при включении КТ1 через 86 с замыкание проскальзывающего контакта с уставкой 9 с должно приводить к срабатыванию реле КЛ1 и КН. Якорь реле КЛ1 должен удерживаться в притянутом состоянии при протекании через токовую обмотку реле тока, равного 90% номинального тока удерживания.

Замыкание проскальзывающего контакта КТ1 с уставкой 9 с должно приводить к срабатыванию реле КЛ1, если реле времени будет запускаться через  $180 \pm 10$  с после подачи 80% номинального напряжения. Промежуточное реле не должно срабатывать, если время с момента подачи номинального напряжения до момента замыкания конечного контакта реле КТ1 не превышает 63 с, и должно срабатывать во всех случаях, когда указанный промежуток времени достигнет 85 с. Если время с момента подачи 80% номинального напряжения до момента замыкания конечного контакта реле времени равно 190 с, промежуточное реле также должно сработать.

При испытании уставка проскальзывающего контакта реле времени КТ1 должна быть на 4...6 с больше уставки конечного контакта для того, чтобы промежуточное реле КЛ1 не сработало от замыкания проскальзывающего контакта. При отключении тока якорь реле КЛ1 должен возвращаться в исходное положение. После каждого измерения конденсатор С2 необходимо разрядить.

Для обеспечения надёжной работы промежуточного реле, токовая обмотка которой включена последовательно с обмоткой электромагнита выключателя, номинальный ток обмотки реле должен быть не менее чем на 20% ниже тока катушки включения, ток срабатывания реле – на 35% ниже тока катушки отключения выключателя. Когда обмотки промежуточного и указательного реле соединены последовательно с катушкой электромагнита отключения выключателя, при подаче пониженного оперативного напряжения, равного 80% номинального, все три аппарата должны чётко срабатывать. Если указательное реле отрегулировать не удаётся, его следует заменить или включить параллельно обмотке промежуточного реле резистор, чтобы увеличить ток через обмотку указательного реле. Выключатели должны быть опробованы в сложных циклах (ВО, ОВ и ОВО).

В схеме АВР следует обратить внимание на отсутствие ложных и обходных цепей во всех возможных вариантах её работы. Как и для АПВ, проверяются элементы механической передачи к блок – контактам выключателя, их регулировка. Рычажную передачу к КПП необходимо отрегулировать таким образом, чтобы она соответствовала положению пружин независимо от способа натяжения. Проверяются и регулируются уставки реле АВР.

Длительность импульса на включение резервного выключателя должна быть достаточной для его надёжного срабатывания, но не чрезмерной. Поэтому выдержка времени на отпускание реле времени, отпадающего при отключении выключателя от защиты, принимается равной времени включения резервного выключателя с запасом

примерно 0,5 с, например, 1,1 с для реле типа РП-252 или 1,5...2,0 с для реле серии РЭ-500, РЭВ-800. Необходимо иметь в виду, что время задержки на отпадание этих реле резко уменьшается при понижении оперативного напряжения. В связи с тем, что это обстоятельство может привести к отказу в работе схемы АВР, проверка времени отпадания таких реле должна производиться при напряжении 80% номинального и является обязательной.

Определяется уставка времени возврата к рабочей схеме питания при возобновлении напряжения на основном источнике питания. Этот переход осуществляется с помощью реле времени, через проскальзывающий контакт которого включается выключатель ввода, а через замыкающий контакт отключается секционный выключатель. Время срабатывания замыкающего контакта устанавливается максимально возможным для данного типа реле (например, 20 с для реле РВ-248), а уставка проскальзывающего контакта должна быть меньше на время, равное времени действия максимальной защиты, с запасом 2,5...3,5 с.

### 8.1.5.3. Блоки питания.

Блоки питания *серий БП11 и БПТ11* (рис.8.6).

1). Измеряется сопротивление изоляции цепей относительно корпуса мегаомметром на 1000 В при закороченных диодах и конденсаторе. Сопротивление изоляции должно быть не менее 10 МОм.

2) Уставку на ток наступления феррорезонанса принимают меньшей минимального значения тока срабатывания защиты. Выбирают уставку по номинальному напряжению на выходе ( $U_{\text{вых. н}}$ ).

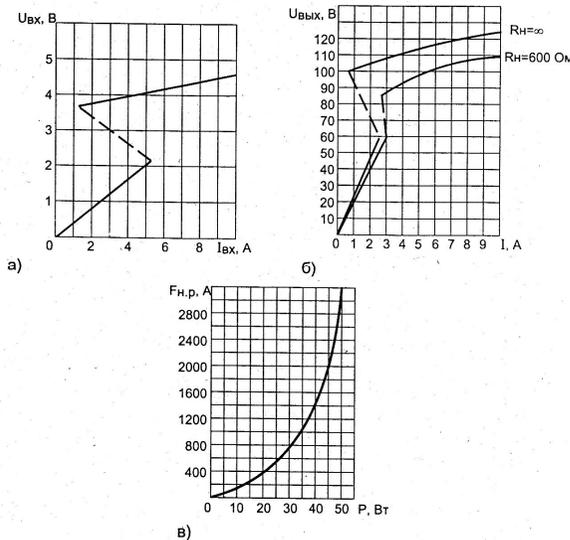


Рис. 8.6. Характеристики блока БПТ11: а – вольт-амперная характеристика холостого хода ( $w_1 = 45$ ); б – зависимость выходного напряжения от первичного тока ( $w_1$

= 2 x 45 последовательно,  $U_{\text{вых. н}} = 110 \text{ В}$ ); в – зависимость МДС надёжной работы от мощности нагрузки при  $U_{\text{вых}} = 0,8U_{\text{вых. н}}$  и уставке  $U_{\text{вых. н}} = 110 \text{ В}$ .

3) На выбранных уставках снимают характеристику холостого хода в виде зависимостей входного  $U_{\text{вх}}$  и выходного  $U_{\text{вых}}$  напряжений от входного тока  $I_{\text{вх}}$  при определенном количестве витков  $w_1$  первичной обмотки трансформатора блока (рис.8.6, а,б); определяют ток наступления феррорезонанса и ток надёжной работы блока при холостом ходе.

4) Снимают характеристику  $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})$  при сопротивлении  $R_{\text{н}}$  на выходе блока, соответствующем максимальной мощности нагрузки; определяют ток и МДС надёжной работы блока (рис.8.6, в).

5) Опробуют действие защиты первичным или вторичным током.

#### *Блок БПН11.*

1). Сопротивление изоляции, измеренное мегаомметром на 1000 В, при закороченном выходе блока должно быть не менее 10 МОм.

2). Измеряется выпрямленное напряжение блока при заданных уставках ( $U_{\text{вых. н}}$  и  $U_{\text{вх. н}}$ ) и схеме питания (однофазная или трёхфазная).

3). Определяют напряжения надёжной работы блока при холостом ходе и максимально возможной (в конкретной схеме защиты) нагрузке; оба значения не должны выходить за пределы нормируемых.

4). Опробуется действие защиты при питании её оперативных цепей от данного блока.

#### *Блоки БПТ1002.*

1). При закороченных выходных зажимах измеряют мегаомметром на 1000 В сопротивление изоляции: вход – корпус; выход – корпус; вход – выход; оно должно быть не менее 10 МОм.

2) Определяют напряжение выхода при первичном токе 10 А, заданной уставке выходного напряжения и числе витков первичной обмотки  $w_1 = 200$ . Ток регулируют с помощью реостата, форма тока должна быть синусоидальной; напряжение выхода при холостом ходе – не более 130 и 260 В для уставок 110 и 220 В соответственно; напряжение выхода должно быть не менее 90 В при уставке 110 В и нагрузке 10 Ом и 180 В при уставке 220 В и нагрузке 40 Ом.

Определяют МДС начала феррорезонанса.

3). Выбирается и устанавливается на блоке число витков  $w_1$  насыщающегося трансформатора в зависимости от коэффициента трансформации и нагрузочной способности трансформатора тока. При питании блока от двух параллельно или последовательно соединённых трансформаторов тока значения напряжения на вольт-амперной характеристике соответственно уменьшаются или увеличиваются.

4). Собирается схема для снятия вольт-амперных характеристик (рис.8.7), которая позволяет учесть погрешность трансформаторов тока; при этом токовые цепи должны быть собраны, а первичная обмотка обесточена. Разомкнув рубильник S, снимают зависимости входного  $U_{\text{вх}}$  и выходного  $U_{\text{вых}}$  напряжений от входного тока  $I_{\text{вх}}$  (характеристика холостого хода блока) на рабочих уставках. Определяется ток надёжной работы – то минимальное значение тока на входе блока, при котором обеспечивается выходное напряжение  $U_{\text{вых}} \geq 0.85 U_{\text{вых. н.}}$ .

Характеристику снимают при повышении и снижении напряжения. Если МДС начала феррорезонанса выходит за пределы допустимых значений, её корректируют

изменением числа витков обмотки дросселя или трансформатора, на которые включён конденсатор резонансного контура.

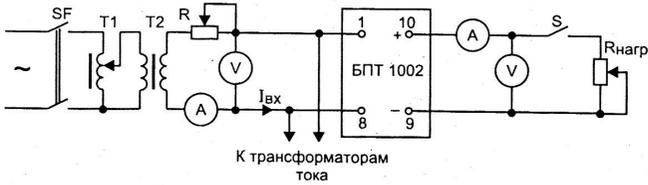


Рис.8.7. Схема для снятия характеристик  $U_{вх} (I_{вх})$ ,  $U_{вых} (I_{вх})$  и определения тока надёжной работы блока БПТ1002

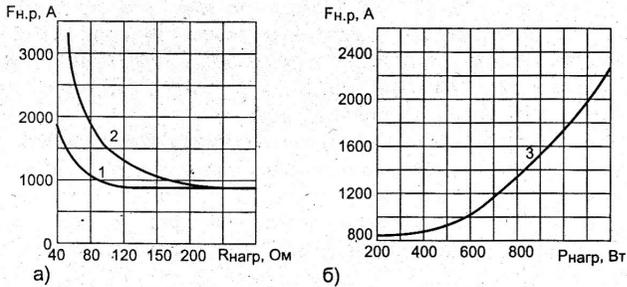


Рис. 8.8. Зависимость МДС надёжной работы блока БПТ1002 от сопротивления для уставки  $U_{вых.н} = 220 \text{ В}$  (а) и от мощности нагрузки (б): 1 –  $U_{вых} = 0,8 U_{вых.н}$ ; 2 –  $U_{вых} = U_{вых.н}$ ; 3 –  $U_{вых} = 0,85 U_{вых.н}$

5). Снимается характеристика  $U_{вых} (I_{вх})$  при сопротивлении нагрузки на выходе блока, соответствующем максимальной мощности нагрузки в цепях оперативного тока, и определяется ток надёжной работы.

6). Полученные значения тока надёжной работы  $I_{н.р}$  при холостом ходе и нагрузке блока сравниваются с токами КЗ и уставками защит, для чего вычисляют первичный ток надёжной работы блока:

$$I_{н.р} = I_{вх.н.р} n_T / k_{сх},$$

где  $n_T$ ,  $k_{сх}$  – соответственно коэффициент трансформации и коэффициент схемы соединения трансформаторов тока, питающих блок. Принимают  $k_{сх} = \sqrt{3}$ , когда эти трансформаторы включены на разность токов фаз и когда они работают параллельно с блоками напряжения (БПНС2); во всех остальных случаях  $k_{сх} = 1$ .

7). Производят поверочный расчёт обеспеченности питания оперативных цепей выпрямленным током. При использовании только блоков БПТ ток  $I_{н.р}$  должен быть

меньше, чем ток двухфазного КЗ в минимальном режиме (например, в конце самой длинной отходящей линии) с учётом коэффициента отстройки 1,2 и меньше, чем ток срабатывания защиты в этом режиме. Если оказывается, что указанные условия выполняются с большим запасом, то для облегчения работы трансформаторов тока и самого блока целесообразно уменьшить число витков  $w_1$  трансформатора блока. Рекомендуется, чтобы вольт-амперная характеристика трансформатора тока проходила выше ВАХ блока при токах более 5 А.

Когда используется комбинированный блок питания (с блоками напряжения БПНС2 или БПН1002), расчётным видом повреждения является трёхфазное КЗ, при котором напряжение на входе блока напряжения равно нулю, а нагрузка на блок питания максимальна, т.е. КЗ на шинах НН или СН подстанции.

Следует иметь в виду, что в расчётах токов КЗ за трансформатором с РПН необходимо учитывать положение переключателя, так как сопротивления КЗ трансформатора в крайних положениях РПН могут различаться в 1,5...2 раза.

8). Проверяют отключение выключателей от устройств РЗА при питании цепей оперативного тока от блока (блоков), подключённого по постоянной схеме и к стороннему источнику. Желательно выполнить это испытание во время прогрузки первичным током.

9). При токе, близком к номинальному, измеряют входные токи и напряжения на выходе блоков. Затем в первичную цепь кратковременно подают ток, незначительно превышающий расчётное значение тока надёжной работы блока, поочередно имитируя междуфазные КЗ. В каждом случае убеждаются в отключении выключателей от контактов защиты при максимальной нагрузке блока. Если мощность нагрузочных устройств недостаточна, ограничиваются испытанием вторичным током по схеме 8.7.

10). Для снижения волновых перенапряжений в блоке при КЗ в сети следует включить параллельно первичной обмотке трансформатора блока последовательно соединённые конденсатор ёмкостью 0,5...1 мкФ и резистор сопротивлением 160...230 Ом.

#### *Блок БПН 1002.*

1) Проверяется изоляция – так же, как и для токового блока.

2) На платах блока выставляют уставки первичного и вторичного напряжения.

3) Собирают схему рис. 8.9: Т1, Т2, Т3 – автотрансформаторы (или потенциалрегулятор) мощностью не менее 1500 В·А на фазу; вольтметр на входе блока поочередно переключается для измерения линейных напряжений. Снимается характеристика холостого хода (рубильник S разомкнут).

Собирают цепь, показанную на рис.8.9 штриховыми линиями. При напряжении  $U_{вх} = 0,1 U_{вх.н}$  включают автомат SF2, измеряют ток КЗ блока и пересчитывают его на номинальное напряжение для проверки чувствительности защиты.

При  $U_{вх} = U_{вх.н}$  измеряют ток потребления блока и вычисляют значение потребляемой мощности, которое не должно быть более 25 В·А на фазу.

Выходное напряжение блока пропорционально входному напряжению и числу вторичных витков трансформатора блока. При  $U_{вх} = 1,1 U_{вх.н}$  выходное напряжение должно быть не более 140 или 280 В на уставке 110 или 220 В соответственно.

4) По схеме рис. 8.9 снимается нагрузочная характеристика блока  $U_{вх} = f(R_{нагр})$  при напряжениях выхода  $U_{вых} = 0,85 U_{вых.н}$  и определяется напряжение надёжной работы блока.

5) См. выше «Блок БПТ1002», п.8.

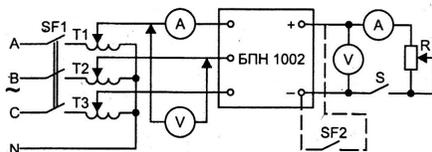


Рис. 8.9. Схема испытания блока питания БПН1002 (или БПНС2)

### Блоки питания стабилизированного напряжения БПНС 2.

1) Измеряют сопротивление изоляции, зашунтировав предварительно диоды и конденсаторы.

2) Снимают частотную характеристику фильтра измерительного органа и фильтра в выходной цепи по схеме рис.8.10. При напряжении генератора 10...20 В минимум тока через первый фильтр и максимум тока через второй должны наступить при частоте  $100 \pm 5$  Гц. Скорректировать резонансную частоту можно изменением воздушного зазора дросселя фильтра. Реле, включённые параллельно элементам фильтра, при измерениях не отсоединяют.

3) Проверка блока в режиме холостого хода (рис.8.9). При значении трёхфазного напряжения на входе, равном 0,5 номинального, выходное напряжение должно быть в пределах 187...195 В, а при 1,1 номинального – не более 242 В. Регулировку последнего осуществляют изменением глубины отрицательной обратной связи магнитного усилителя.

При трёхфазном питании снимают характеристику зависимости тока управления от напряжения на выходе. Положение характеристики относительно осей координат и тем самым значение стабилизированного напряжения на выходе блока устанавливают регулировкой сопротивления резисторов и количества стабилитронов узла стабилизации.

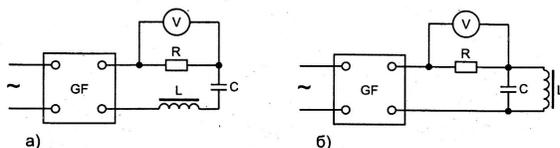


Рис.8.10. Схема проверки фильтров второй гармоники:

а – в цепи выхода; б – в цепи управления

4) Снимают характеристики  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  по схеме рис. 8.9 при изменении напряжения входа от 0,5 до 1,1 номинального в режимах холостого хода и нагрузки с  $R_{\text{нагр}} = 40$  Ом, контролируя симметрию фазных токов на входе блока. Характеристики должны находиться в зоне допустимых значений. По снятым кривым определяют напряжение надёжной работы блока при холостом ходе и сопротивлении нагрузки 40

Ом или при минимальном сопротивлении нагрузки, соответствующем срабатыванию РЗ и отключению выключателей.

Длительная нагрузка блока не должна превышать 1000 Вт, а при отключении выключателей – 2500 Вт.

5. Проверяют пределы изменения напряжения на выходе блока при однофазном питании в режиме холостого хода и с нагрузкой 40 Ом. Напряжение подаётся на два зажима трёхфазного ввода, один из которых соединяют с третьим зажимом. Напряжение на выходе должно оставаться в пределах 187...242 В.

6. Проверяют действие защиты от перегрузок и КЗ. При номинальном трёхфазном напряжении на входе блока закорачивают его выходные зажимы «+» и «-» посредством автоматического выключателя (SF2 на рис.8.9) и измеряют время отключения блока автоматическим выключателем на входе.

7. Определяют потерю напряжения в проводах, соединяющих источник питания с блоком, как разность между значениями входного напряжения при отключённом и включённом автомате на входе и максимальной нагрузке блока.

8. Проверяют коэффициент пульсаций на выходе сглаживающего фильтра с нагрузкой. При номинальном напряжении на нагрузке 80 Ом коэффициент пульсации должен быть

$$k_{\text{п}} = \frac{U_{\text{н}}}{2U_{\text{н}}} 100 \leq 3\%,$$

где  $U_{\text{п}}$  – размах переменной составляющей напряжения выхода (измеряется с помощью осциллографа);  $U_{\text{н}}$  – номинальное напряжение выхода.

9) Проверяют действие защиты (автоматики) при питании оперативным током по постоянной схеме от испытуемого блока, на который подают питание от а) постоянного источника и б) от трансформатора напряжения или трансформатора собственных нужд.

10) Измеряют пофазно вторичный ток трансформатора напряжения, нагруженного на блок питания. В случае превышения допустимого значения тока рекомендуется часть нагрузки перенести на трансформатор собственных нужд.

11) Когда блок напряжения, подключённый к источнику на шинах ВН подстанции, используется самостоятельно, без токовых блоков, то для обеспечения питания оперативных цепей выпрямленным током остаточное напряжение при трёхфазном КЗ на стороне НН или СН трансформатора в минимальном режиме должно быть больше напряжения надёжной работы блока (коэффициент отстройки 1,1).

*Блоки питания и заряда. Блок БПЗ-401.*

1) Сопротивление изоляции между токоведущими частями и корпусом должно быть не менее 10 МОм; измеряется при закороченных диодах, конденсаторах и снятом поляризованном реле.

2) Проверяется реле, контролирующее наличие зарядного напряжения: напряжение срабатывания должно быть не выше 0,7 номинального первичного, коэффициент возврата – не менее 0,25.

3) При номинальном напряжении на входе измеряют выпрямленное напряжение блока в режимах а) холостого хода и б) нагрузки на минимально допустимое сопро-

тивление: 50 Ом при уставке по выходному напряжению 110 В и 200 Ом при уставке 220 В. Выпрямленное напряжение холостого хода должно быть не более 130 и 260 В, а при нагрузке – не менее 95 и 190 В на уставках 110 и 220 В соответственно.

4) Опробуется действие защиты при питании оперативным током от блока.

Блок БПЗ-402.

1) Сопротивление изоляции токоведущих частей – не менее 10 МОм; при измерении выход закорачивается.

2) Количество витков первичной обмотки выбирают путём сравнения вольт-амперных характеристик так же, как и для блока БПТ 1002. Кроме того, необходимо убедиться, что максимальная МДС трансформатора блока не превышает допустимого (по условиям ограничения перенапряжения на первичной обмотке) значения при наибольшем токе КЗ.

3) Снимают характеристики холостого хода  $U_{\text{вх}} = f(I_{\text{вх}})$  и  $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})$  при рабочих уставках по числу витков  $w_1$  и напряжению  $U_{\text{вых. н.}}$  определяют ток наступления феррорезонанса и ток надёжной работы блока. Характеристики снимают при повышении и понижении напряжения. Значение напряжения на выходе при токе  $I_{\text{вх}} = 1,25 I_{\text{уст}}$  должно соответствовать техническим данным.

4) Снимают характеристику  $U_{\text{вх}} = f(I_{\text{вх}})$  при сопротивлении на выходе блока, соответствующем максимальной расчётной мощности нагрузки, и определяют первичный ток надёжной работы блока.

5) Опробуют действие защиты при питании оперативных цепей от блока.

*Блоки конденсаторов.*

1) Блоки конденсаторов должны размещаться вблизи привода выключателя или релейной панели. Сопротивление изоляции между жилами кабеля, соединяющего блоки конденсаторов с зарядным устройством и нагрузкой, должно быть не менее 5...7 МОм.

2) Измерение сопротивления изоляции блока конденсаторов относительно корпуса производится мегаомметром на 1000 В при закороченных диодах и конденсаторах, между обкладками конденсаторов – мегаомметром 500 В. Измерив установившееся значение сопротивления изоляции между обкладками, которое должно составлять не менее 5...10 МОм, разряжают конденсатор на резистор сопротивлением порядка нескольких кОм.

3) Проверяют напряжение заряда конденсаторов и потребление зарядного устройства. Если заряд производится от блоков БПЗ-401 или БПЗ-402, то на вход первого подают номинальное напряжение, а на вход второго – ток  $1,25I_{\text{уст}}$ . После измерения конденсаторы необходимо разрядить.

4) Определяют минимальное значение напряжения или тока на входе зарядного устройства, при котором чётко срабатывает реле или электромагнит, питаемый энергией разряда конденсаторов.

5) Проверяют совместную работу блоков конденсаторов и зарядных устройств в схеме РЗиА действием на электромагниты выключателя, короткозамыкателя или отделителя.

После каждого испытания конденсаторы блока разряжают.

## **8.2. Комплексная проверка РЗиА.**

### **8.2.1. Общие испытания и проверка вторичной коммутации.**

#### **8.2.1.1. Подготовительные работы.**

Ещё на стадии подготовки наладочных работ на подстанции необходимо:

- ознакомиться с проектом и техническими документами фирм – изготовителей электрооборудования и устройств РЗиА;
- произвести поверочный расчёт и согласование уставок реле защит;
- подобрать соответствующие заводские инструкции, справочную и техническую литературу, формы протоколов;
- подготовить средства измерений и испытаний, инструменты, приспособления и материалы (аппараты, провода и т.п.), а также средства техники безопасности.

При ознакомлении с проектом следует изучить пояснительную записку, схемы первичной и вторичной коммутации, параметры электрооборудования. Необходимо ознакомиться с размещением высоковольтного оборудования, панелей, щитов управления и сигнализации, источников питания оперативным током, выписать паспортные данные электрооборудования, реле и др. и сопоставить их с проектной спецификацией.

Анализируются принципиальные схемы управления коммутационными аппаратами, РЗиА, АПВ, АВР и др. и устанавливается, соответствует ли их выполнение требованиям директивных документов, электроснабжающей организации и владельца подстанции. Работа схем прослеживается по отдельным цепям (защит, управления, блокировок, измерения и сигнализации) и в целом. При обнаружении в принципиальных схемах ошибок, дефектов, несоответствия техническим требованиям должны быть найдены правильные решения, а соответствующие изменения – согласованы с владельцем электроустановки и, если необходимо, с проектной организацией и отражены в исполнительных схемах.

#### **8.2.1.2. Цепи трансформаторов тока (ТА).**

В цепях токовых защит обращают особое внимание на правильность соединений обмоток трансформаторов тока, их полярность. Очень серьёзные последствия может повлечь за собой обрыв токовых цепей. Контрольные приборы для проверки устройств защит, измерений должны подключаться к токовым цепям через специальные зажимы и испытательные блоки без разрыва цепи тока. При отключении приборов и устройств, установленных в цепях трансформаторов тока, следует предварительно закортить цепи подвода тока, для чего на сборках зажимов должны быть предусмотрены специальные перемычки. Если в условиях эксплуатации высока вероятность нарушения контактных соединений в токовых цепях (например, из-за вибрации машин и механизмов при установке КРУ, КТП в машинных залах), следует предусмотреть такие меры, как усиление крепления трансформаторов тока, применение многожильных медных проводов, повышение надёжности контактов.

Проверку замкнутого состояния цепей тока можно произвести с помощью омметра. С этой целью прибор включают в рассечку нулевого провода и, поочерёдно подключая фазные провода, измеряют каждый раз сопротивление между фазным и нулевым проводами. Результаты этих измерений отражают различие между фазами по

количеству включённых аппаратов и протяжённости цепей, а также выявляют разомкнутые цепи и неисправные контакты.

Испытание под нагрузкой можно выполнить подачей тока во вторичную или первичную цепь от постороннего источника питания. Во вторичную цепь ток подают от однофазного источника GA, подключая его поочерёдно на каждую пару фаз и фазу с нулём (рис. 8.11). В первичную цепь ток подают от однофазного или трёхфазного источника. При использовании однофазного нагрузочного устройства фазы первичной цепи соединяются временными перемычками так, как это показано на рис.8.12

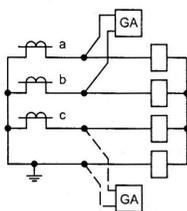


Рис. 8.11. Проверка вторичных цепей трансформаторов тока

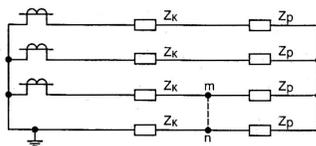


Рис.8.12. Проверка целостности нулевого провода вторичных цепей трансформаторов тока однофазным первичным током

Проверка схем соединения вторичных цепей ТА первичным трёхфазным током от постороннего источника, хотя и более трудоёмкая, применяется при наладке дифференциальных защит трансформаторов и др. электроприёмников большой мощности, так как обеспечивает необходимую уверенность в правильности сборки токовых цепей. С этой целью устанавливают трёхфазную закоротку на одной стороне силового трансформатора, за трансформаторами тока, а трёхфазное напряжение от нагрузочного устройства достаточной мощности (обычно от сборки 380 В) подают на другую сторону. Предварительно рассчитывают возможный ток и определяют, на какой стороне трансформатора предпочтительно установить закоротку. Если, в частности, напряжение 3 x 0,4 кВ подать на сторону 6–10 кВ понижающего силового трансформатора, то значение испытательного тока на стороне НН будет в пределах 0,5...1 номинального. Измеряют вторичные токи во всех трёх фазах и в нулевом проводе.

Обязательным испытанием является проверка схемы соединения вторичных цепей ТА первичным трёхфазным током нагрузки. Измеряют вторичные токи во всех трёх фазах и нулевом проводе.

Анализируя результаты измерений и векторные диаграммы (если необходимо), составляют заключение о правильности схемы и исправности ТА. Соотношение токов, векторные диаграммы, а также наиболее вероятные ошибки и неисправности при различных схемах токовых цепей приводятся в справочных пособиях.

Когда цепи ТА соединены по схеме «звезда» и нагрузка симметрична, можно проверить целостность нулевого провода измерением тока небаланса в нём. Если проверка производится во время снятия векторных диаграмм прибором типа ВАФ, охватывают клещами прибора нулевой провод, устанавливают режим измерения «фаза»

и, вращая лимб, наблюдают за стрелкой индикатора: в случае обрыва нулевого провода стрелка не отклоняется от нуля.

Можно определить целостность нулевого провода и по схеме рис.8.12. В этом случае контролируют ток в нулевом проводе, который появляется за счёт искусственной асимметрии нагрузки фаз ТА, создаваемой установкой временной перемычки тп, при условии  $Z_k < Z_p$ , где  $Z_k$  – сопротивление жилы кабеля,  $Z_p$  – сопротивление реле. Если это условие не соблюдается, включают последовательно с  $Z_p$  резистор сопротивлением 5...10 Ом.

Каждая группа электрически соединённых вторичных обмоток ТА должна быть заземлена только в одной точке: на ближайшей от ТА сборке зажимов или на зажимах самого трансформатора тока. Одноимённые выводы всех вторичных обмоток ТА, питающих счётчики и приборы, заземляют через зажим на фланце трансформатора.

### **8.2.1.3. Цепи трансформаторов напряжения (ТВ).**

В цепях напряжения обращают внимание на заземление обмоток трансформатора напряжения и наличие защиты от КЗ. Место защитного заземления должно быть выбрано вблизи места установки ТВ. Заземление обмоток ТВ, соединённых в звезду и разомкнутый треугольник, производится непосредственно на трансформаторе или на ближайшей сборке зажимов отдельными заземлителями. Защита от КЗ должна выполняться, как правило, автоматическими выключателями, в том числе в цепи  $3U_0$ . Цепи напряжения должны быть проложены симметрично.

Чтобы предотвратить наведение в близко расположенных цепях напряжений, которые могут исказить значение и фазу сигналов и вызвать неправильное действие защиты, все проводные связи одного и того же назначения следует выполнять в одном и том же кабеле. Например, трёх- или четырёхпроводные цепи от основных вторичных обмоток трансформатора должны подаваться на щит одним кабелем. Двухпроводная цепь от обмотки однофазного трансформатора или от дополнительных обмоток (цепь  $3U_0$ ) также не должна разделяться по разным кабелям. Кабели от основных и дополнительных обмоток ТА до щита следует прокладывать рядом по всей длине. Не допускается раздельная разводка заземлённых и незаземлённых вторичных цепей ТВ жилами разных кабелей, так как при этом сумма токов в жилах каждого в отдельности кабеля не равна нулю; в результате возрастает индуктивное сопротивление кабеля и искажаются векторные диаграммы напряжений, подводимых к реле защиты.

Если требуется, измеряют полное (комплексное) сопротивление вторичных цепей переменному току методом амперметра – вольтметра. Это позволяет учесть не только активную, но и индуктивную составляющую сопротивления, которая может быть значительной (длинные соединительные провода, катушки расцепителей и др.). В проверяемую цепь должны входить все элементы схемы. В цепях обмоток, соединённых «звездой», измеряют сопротивление каждой пары фаз и каждой фазы с нулевым проводом и вычисляются средние значения сопротивления фазы и нулевого провода.

Потери напряжения во вторичных цепях ТВ можно измерить непосредственно, если расстояние от трансформатора до панели реле или измерительных приборов невелико. При больших расстояниях рекомендуется определять эту величину расчётным путём, пользуясь результатами измерения нагрузки и сопротивления цепей. С этой

целью измеряется угол сдвига фаз между током наиболее нагруженной фазы и её напряжением и рассчитывается потеря линейного напряжения  $\Delta U \approx \sqrt{3} IR \cos \varphi$  или, не прибегая к определению  $\cos \varphi$ , с некоторым расчётным запасом принимают  $\Delta U \approx \sqrt{3} IR$ , где  $I$  и  $R$  – ток нагрузки и активное сопротивление фазы. Если нагрузка питается только по двум фазам без нулевого провода, то потерю напряжения можно принять равной  $2IR$ . Измерения и расчёты следует производить при максимально возможном значении тока нагрузки. Измеренные или вычисленные значения потерь напряжения не должны превышать: от TV до счётчиков 0,5; до щитовых приборов 1,5; до реле защиты 3%.

Одновременно измеряют нагрузку всех фаз трансформатора напряжения. Амперметр включают в каждый кабель, подключённый к релейному щиту, или в ближайшем к трансформатору шкафу так, чтобы он учитывал всю нагрузку TV; класс точности прибора – 0,5. Поскольку нагрузка в цепях устройств РЗА неравномерна по фазам и при срабатывании этих устройств изменяется по-разному, необходимо внимательно проанализировать работу РЗА и выявить режим, в котором создаётся наибольшая нагрузка на TV.

Для всех TV обязательна проверка работы максимальной токовой защиты в опыте короткого замыкания во вторичных цепях с измерением тока КЗ. Выбирается такой вид КЗ, при котором значение тока будет минимальным, а место КЗ – в конце участка, защищаемого данным автоматом или предохранителем. Включение на КЗ производится дополнительным автоматическим выключателем. Кратность срабатывания электромагнитных расцепителей принимается обычно равной 3,5 номинального тока. В цепях схемы «разомкнутый треугольник» устанавливают автомат на номинальный ток 2,5 А.

Вместе с тем токовая защита вторичных цепей трансформатора напряжения не должна срабатывать от кратковременных бросков ёмкостного тока линии электропередачи, к которой он подключён, а также от пусковых токов нагрузки. Чтобы проверить отстройку от зарядного тока, несколько раз включают и отключают линию. Значительные пусковые токи возникают в связи с тем, что питающиеся от TV электромагнитные аппараты имеют меньшее сопротивление и, соответственно, потребляют больший ток при включении, когда якорь (сердечник) отпущен, чем в рабочем режиме, когда он подтянут. Чтобы проверить отстройку максимальной защиты от пусковых токов, рубильником или проверяемым автоматом несколько раз включают полную нагрузку трансформатора и убеждаются, что защита при этом не срабатывает.

На всех шинках, рядах зажимов, к которым подключены цепи напряжения, измеряют линейные и фазные напряжения, а также напряжения всех проводов относительно земли. Измеряют напряжение небаланса  $3 U_0$ , которое должно составлять 1...3 В. Это значение, а также симметрия линейных и фазных напряжений схем «звезда» и «треугольник» подтверждают правильность монтажа вторичных цепей. Там же проверяют чередование фаз и маркировку проводов, затем поочерёдно подключают к цепям напряжения аппаратуру панелей, щитов, ячеек.

Фазировку производят на щитах, панелях, входных зажимах или между рядами зажимов разных ячеек РУ с трансформаторами напряжения. При этом вторичные цепи последних должны быть связаны электрически, например, заземлением их одноимённых точек. Вольтметром проверяют напряжение между каждым зажимом той и

другой цепей: напряжение между одинаковыми фазами должно быть близко к нулю, между разноимёнными – двойному линейному напряжению. Поэтому следует выбирать вольтметр с верхним пределом измерения не ниже 200 В и переходить на меньшие пределы, лишь убедившись в правильности сборки схемы.

В цепях управления выключателями прослеживают работу схемы в различных положениях ключа управления и блокировки от «прыгания» (многократного включения – отключения выключателя), в цепях сигнализации проверяют выбор добавочных сопротивлений, правильность подключения сигнальных реле и максимальное количество одновременно подаваемых сигналов.

#### **8.2.1.4. Монтаж вторичных цепей.**

Внешним осмотром проверяется качество выполнения монтажа и составляется дефектная ведомость. Она передаётся монтажной организации для устранения недоделок и ремонта или замены оборудования, которое не соответствует проекту, параметрам объекта или находится в состоянии, препятствующем его нормальной эксплуатации.

Монтаж схем вторичной коммутации можно подразделить на два вида: внутренний и внешний. Внутренний – вторичная коммутация релейных панелей, щитов управления и сигнализации, приводов выключателей, камер КСО, КРУ, КТП – выполняется на заводах-изготовителях. Ошибки и дефекты монтажа здесь маловероятны и, если встречаются, носят обычно массовый характер, т.е. повторяются во всех экземплярах данного типа оборудования, установленного на подстанции. Чаше требуют проверки внешние связи – между панелями, щитами, камерами и пр. При однослойном простом монтаже проверка может выполняться визуально, путём просмотра каждого отдельного провода. Скрытый монтаж проводов (жгуты, многослойный монтаж, прокладка в перфорации, трубах), кабельные связи проверяются «прозвонкой» – с помощью «пробников», телефонных гарнитур, телефонной и радиосвязи (в разных помещениях). Прозванивают выборочно те цепи, исправность которых вызывает обоснованные сомнения, полная же прозвонка всех цепей схемы нецелесообразна из-за чрезмерной затраты времени и не всегда возможна (печатный монтаж, например).

#### **8.2.2. Токовые и токовые направленные защиты.**

##### **8.2.2.1. Максимально-токовая защита (МТЗ) от перегрузки и многофазных коротких замыканий.**

Проверка МТЗ от постороннего источника тока. Собирают схему защиты полностью и включают выключатели, на которые она должна действовать. Подают оперативное напряжение и производят проверку защиты первичным током от испытательного устройства, содержащего нагрузочный трансформатор, регулятор напряжения (автотрансформатор) и измеритель тока.

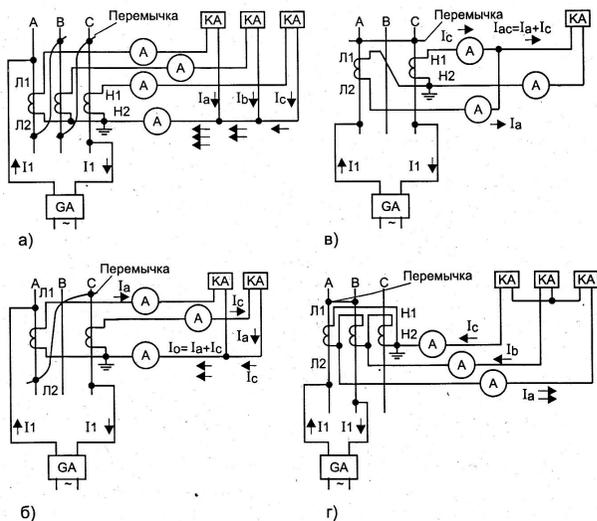


Рис. 8.13. Схемы проверки токовых цепей МТЗ при питании первичным однофазным током от постороннего источника и соединении обмоток ТА:

а – в звезду; б – в неполную звезду; в – на разность токов двух фаз; г – в треугольник; GA – нагрузочное устройство; КА – реле тока

В зависимости от схемы защиты собирают одну из схем рис.8.13 и, подав ток в первичные цепи трансформаторов тока, повышают его до значения примерно 0,3...0,5 тока срабатывания защиты. При этом измеряют первичные и вторичные токи, проверяют коэффициенты трансформации ТА и правильность токораспределения в фазных и нулевом проводах. Ток в нулевом проводе должен быть:  $I_0 = I_a + I_b + I_c$  (рис.8.13,а) или  $I_0 = I_a + I_c$  (рис.8.13,б). Далее поднимают первичный ток до срабатывания реле защит на максимальной уставке и измеряют соответствующие значения первичных и вторичных токов. Поскольку эта проверка является завершающей и разрывать полностью собранные цепи нежелательно, вместо амперметров на рис.8.13 целесообразно использовать токоизмерительные клещи.

Проверка МТЗ на переменном токе с дешунтированием токовых цепей. Проверяется надёжность действия электромагнитов отключения после дешунтирования катушек переключающим контактом промежуточного реле. При этом сопротивление вторичной цепи трансформатора тока увеличивается за счёт введения в неё катушек отключения, а ток соответственно уменьшается. Необходимо, однако, чтобы он остался больше тока возврата промежуточного реле, так как в противном случае реле опадёт и вновь зашунтирует катушку отключения. Это условие обеспечивается, если ток катушки отключения будет меньше тока срабатывания промежуточного реле в 1,5...2 раза.

Ток срабатывания катушки отключения можно снизить до 3...4 А при выполнении следующих требований:

для реле РТМ и электромагнитов отключения касание бойком рычага отключающего валика должно происходить как можно позже, т.е. когда тяговое усилие их сердечников имеет наибольшее значение;

для всех реле и электромагнитов запас хода бойка после расцепления отключающего механизма должен быть около 2 мм; это достигается регулировкой длины бойка.

Необходимо также проверить расчётом надёжность работы переключающих контактов реле, предназначенных для дешунтирования токов, до определённых значений, обычно до 150 А.

#### **8.2.2.2. МТЗ от однофазных замыканий на землю.**

При использовании в сетях с малым током замыкания на землю трансформаторов тока нулевой последовательности необходимо иметь в виду следующие особенности.

При наличии нескольких параллельных кабелей на каждом из них устанавливается трансформатор тока. Вторичные обмотки ТА соединяются последовательно и к ним подключается реле тока. В этом случае чувствительность защиты оказывается меньше, чем при питании реле от отдельного ТА, и ещё меньше – при параллельном соединении обмоток.

Для кабельных линий с трансформаторами тока типа ТЗЛ, ТНП должны быть соблюдены условия п.6.3.4.7, рис.6.20. Провод, заземляющий кабельную воронку, должен быть изолирован. Расстояние от ТНП до концевых кабельных воронок должно быть не менее 0,7 м, а до ближайших участков ошиновки – не менее 1,5...2 м. Для ТНП шинного типа эти расстояния могут быть несколько меньше (0,5 и 1...1,5 м соответственно). Кабели располагаются в окне сердечника в один ряд или в два ряда в шахматном порядке, симметрично относительно центра окна. Рекомендуются, чтобы сопротивление соединительных проводов между ТНП и реле не превосходило 1 Ом. При большой протяжённости соединительные провода экранируют; экран заземляют в одной точке.

Проверяют исправность изоляции концевых воронок и брони кабелей на участке между ТНП и защищаемым оборудованием, подавая поочерёдно ток в рассечку заземляющих проводов каждого кабеля, проходящего сквозь окно ТНП. При токе 10...20 А напряжение на обмотке исполнительного реле не должно превосходить 4...5 мВ.

Цель подмагничивания включается на те фазы, при которых напряжение небаланса будет наименьшим. Следует убедиться, что ток небаланса во вторичной обмотке ТНП, обусловленный подмагничивающим напряжением 100 В, не превышает 2...4% тока срабатывания реле защиты от замыкания на землю. Корректируют эту величину, подматывая в ту или иную сторону витки обмотки подмагничивания.

Проверяют защиту первичным током, для чего ток от постороннего источника пропускают через жилу силового кабеля, предварительно заземлив её и один из выводов нагрузочного устройства. Если такое испытание затруднительно, допускается подавать ток в провод, пропущенный через окно ТНП. Защиту, включённую на трёхтрансформаторный фильтр токов нулевой последовательности, проверяют подачей тока от постороннего источника на первичные обмотки ТА каждой фазы.

На заключительном этапе проверяют взаимодействие защит и устройств сигнализации с другими защитами, автоматикой, схемами управления и общестанционной

сигнализации, а также действие защит на коммутационные аппараты. Проверка производится при оперативном напряжении 80 и 100% номинального, замыканием контактов вручную.

Направленные защиты, как известно, предполагают наличие реле направления мощности, в связи с чем и наладка защит сводится, в основном, к проверке действия этих реле. Состав и объём проверки определяется режимом работы сети и видом короткого замыкания.

#### **8.2.2.3. Направленная защита от многофазных коротких замыканий.**

Действие защиты можно проверить по векторной диаграмме рабочих токов и напряжений при имитации режима трёхфазного КЗ, который принципиально не отличается от режима симметричной нагрузки.

При построении векторной диаграммы подводимые к реле напряжения принимаются за систему координат. По выражению для вращающего момента данного реле или опытным путём определяется угол, при котором вращающий момент становится равным нулю, и под этим углом относительно вектора напряжения  $U_{bc}$  проводится линия изменения вращающего момента. В качестве примера на рис.8.14 приведено построение векторной диаграммы для реле РБМ 171, включённого по 90-градусной схеме на напряжение  $U_{bc}$  и ток  $I_A$ . Поскольку при трёхфазном КЗ на защищаемом присоединении активная и реактивная мощности направлены от шин к месту повреждения, вектор первичного тока  $I_{AK3}$  фазы А (показан пунктирной линией) отстает от напряжения своей фазы на угол  $\varphi_{K3}$  и находится вблизи линии максимальных моментов. Этот вектор расположен в зоне работы реле, которое должно замкнуть свои контакты и разрешить действие защиты на отключение.

Вектор тока в реле должен располагаться не ближе  $20^\circ$  к линии изменения знака вращающего момента. Если этот вектор оказывается вблизи линии нулевых моментов, реле направления мощности будет находиться в инертном состоянии. В этом случае рекомендуется подать в реле ток другой фазы, например, ток  $I_b$  фазы В. Реле включено правильно, если оно замыкает свои контакты при направлении активной мощности от шин, а реактивной – к шинам.

Подводить к реле рабочие токи и напряжения следует сразу после снятия векторной диаграммы, чтобы диаграмма токов нагрузки не успела измениться. Неправильная работа реле мощности чаще всего бывает вызвана ошибочной полярностью обмоток измерительных трансформаторов, реле и др. Когда реле мощности выполняет блокирующие функции и включено с обратной полярностью, следует учитывать, что зоны срабатывания и заклинивания у них отличаются от заводских на  $180^\circ$ .

#### **8.2.2.4. Направленная защита нулевой последовательности.**

Проверка производится по векторной диаграмме тока нагрузки и рабочего напряжения при имитации однофазного КЗ у шин подстанции. При этом напряжение повреждённой фазы снижается до нуля, и по ней протекает ток к месту КЗ.

Однофазное КЗ создают искусственно, подавая на выводы проверяемой защиты ток повреждённой фазы и напряжение нулевой последовательности, равное сумме напряжений неповреждённых фаз. С этой целью в реле поочередно подают три фазных тока и устанавливают, в каком случае реле будет иметь достаточно большой момент на срабатывание или заклинивание.

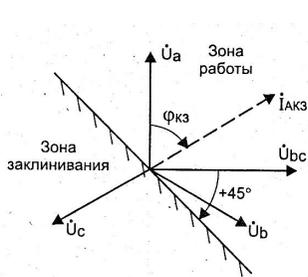


Рис. 8.14. Векторная диаграмма напряженного режима защиты междуфазных КЗ с реле направления мощности РБМ171.

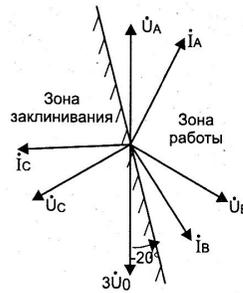


Рис.8.15. Векторная диаграмма напряженного режима защиты нулевой последовательности с реле РБМ178.

Для создания напряжения нулевой последовательности из напряжения разомкнутого треугольника исключают напряжение той фазы, на которой имитируется КЗ: первичную цепь этой фазы разрывают, а обмотку TV закорачивают. Можно также имитировать однофазное КЗ и по вторичным цепям напряжения, подключив к реле вместо свободного конца обмотки данной фазы TV тот её вывод, который связан с другой фазой в схеме разомкнутого треугольника. В обоих случаях напряжение на реле будет  $3U_0 = U_B + U_C = -U_A$ .

В качестве примера на рис.8.15 приведена векторная диаграмма применительно к реле РБМ178. Построение её аналогично описанному выше для защит от междуфазных КЗ с реле РБМ171. На векторную диаграмму токов нагрузки наносят линию нулевых моментов под углом  $20^\circ$  (внутренний угол реле). Реле направления мощности включено правильно, если вектор тока находится в зоне работы реле.

Когда вектор тока повреждённой фазы оказывается вблизи линии нулевых моментов, через реле пропускают поочерёдно токи всех трёх фаз и анализируют поведение реле. Если активная и реактивная мощности направлены от шин подстанции в линию и реле, включённое на напряжение  $3U_0$ , при токе  $I_A$  чётко замыкает свои контакты, при токе  $I_B$  имеет небольшой момент на замыкание, а при токе  $I_C$  чётко заклинивает, то реле включено правильно.

По условиям термической стойкости напряжение на реле следует подавать кратковременно.

Дистанционная защита.

### 8.2.3.1. Опробование.

Замыкая и размыкая контакты вручную, проверяют работу защиты по принципиальной схеме. При использовании в качестве элемента сравнения полупроводниковых нуль-индикаторов проверяют выходные цепи от контактов реле исполнительных органов, а при опробовании магнитоэлектрических реле их контакты закорачивают. Опробование осуществляют при оперативном напряжении, равном 80% номинального. Окончательная проверка защиты производится имитацией аварийных режимов при номинальном оперативном напряжении.

1) Проверяют действие дистанционных реле от тока при разомкнутых цепях напряжения по уставкам I, II и III зон. Измеряют токи срабатывания дистанционных и пусковых реле и сравнивают их с максимальными токами нагрузки, что позволяет оценить возможность ложной работы защиты при исчезновении вторичного напряжения TV.

2) Проверяют поведение защиты при двухфазном КЗ, когда напряжение повреждённых фаз уменьшается до нуля. При имитации повреждения вблизи шин в зоне действия защиты к реле подводят максимальный ток двухфазного КЗ под углом  $\varphi_{м.ч}$  к напряжению в предаварийном режиме. Защита должна работать с выдержкой времени I зоны. При имитации КЗ вне зоны аварийный ток подводят под углом  $\varphi_{м.ч} + 180^\circ$ .

3) Проверяют поведение защиты при имитации трёхфазного КЗ вблизи шин в зоне работы и «за спиной» (т.е. при обратном направлении тока), надёжность работы выходных реле и время срабатывания защиты. При максимальном значении тока в этом режиме измеряется также время замкнутого состояния контактов выходного реле.

Контролируют поведение защиты при имитации трёхфазного КЗ «за спиной» при минимальном значении аварийного тока, так как в этом режиме вероятность ложного срабатывания защиты наиболее велика.

Имитируя повреждение на фазах АВ, ВС и СА, измеряют время срабатывания (на контактах выходного реле) при заданных углах и токах настройки. Временная характеристика проверяется для следующих уставок сопротивления:

Ступень	I	II	III
Сопротивление	$0; 0,5 Z_I; 0,9 Z_I$	$1,1 Z_{II}; 0,9 Z_{II}$	$1,1 Z_{III}; 0,9 Z_{III}; 1,1 Z_{III}$

При значениях Z, равных  $1,1 Z_I$  и  $1,1 Z_{II}$ , регулируется выдержка времени защиты; при  $Z = 1,1 Z_{III}$  защита работать не должна.

В заключение следует убедиться, что при подаче и снятии трёхфазного напряжения защита не срабатывает.

### **8.2.3.2. Проверка защиты рабочим током и напряжением.**

Для подтверждения правильности сборки схем трансформаторов тока и напряжения и подключения их цепей к панели проверяются:

- исправность и правильность подключения к панели цепей напряжения – измерением линейных и фазных напряжений и фазировкой с другими панелями и цепями напряжения;
- исправность и правильность подключения токовых цепей путём снятия векторной диаграммы и сопоставления её с действительным направлением первичной мощности в линии;
- правильность подключения фильтра обратной последовательности (напряжения или тока), для чего измеряются токи небаланса в обмотках исполнительных реле. Если ток небаланса превышает 50% тока возврата поляризованного реле, необходимо повторно проверить симметрию токов нагрузки в фазах и с помощью переменных резисторов в плечах фильтра свести небаланс к минимуму. Изменив чередование фаз напряжения (тока) на обратное, фиксируют состояние реле (срабатывает – не срабатывает) при значительно возросшем токе;

– правильность подключения устройства блокировки при неисправности в цепях напряжения (отключение автоматических выключателей или обрыв в одной, двух или трёх фазах TV) путём измерения тока небаланса в обмотке поляризованного реле, блокирующего защиту; в нормальном режиме, а также в симметричных режимах при междуфазных КЗ и при замыканиях на землю, ток небаланса не должен превышать 50% тока возврата реле. Считается, что блокировка будет действовать надёжно, если ток в реле при отключении напряжения превышает ток срабатывания более чем в 4 раза.

По окончании проверки восстанавливают нормальную схему цепей напряжения и вновь измеряют ток небаланса в рабочем режиме.

Дистанционные защиты в сетях 35 – 110 кВ принадлежат к числу наиболее сложных; технология наладки конкретных видов их подробно описывается в соответствующих руководствах и инструкциях.

## **8.2.4. Дифференциальные защиты.**

### **8.2.4.1. Общие рекомендации.**

Как правило, проверку защиты производят первичным током нагрузки при рабочем напряжении. Предварительную проверку выполняют током от однофазного или трёхфазного источника, напряжение которого (в пределах от 0,4 до 10 кВ) выбирается в зависимости от мощности испытуемой цепи, а ток КЗ источника должен быть соизмерим с номинальным током последней.

При имитации КЗ вне зоны защиты измеряют значения и фазы токов как в плечах ДЗ, так и в дифференциальной цепи, токи и напряжения в исполнительных органах дифференциальных реле. Измерение тока небаланса производится миллиамперметром с небольшим внутренним сопротивлением при токе нагрузки не менее 10...20% номинального значения. При меньших токах значение тока небаланса может оказаться достаточно малым для того, чтобы привести к ложному выводу об исправности токовой защиты даже при неправильном соединении токовых цепей.

Значительно меньше трудозатрат и времени требует проверка от постороннего источника малой мощности, например, трехфазного с напряжением 380 В и током КЗ порядка нескольких десятков ампер, т.е. 5...10% номинального тока испытуемой цепи. При этом можно установить векторные соотношения токов плеч ДЗ, но состояние дифференциальных цепей и правильность выравнивания МДС дифференциальных реле достоверно не определяются.

Проверку ДЗ током от постороннего источника производят в следующем порядке.

1. При имитации КЗ вне зоны защиты: а) измеряют токи в фазных, нулевых и дифференциальных проводах; б) измеряют токи (напряжения) небаланса измерительных органов дифференциальных реле; в) снимают векторные диаграммы токов в фазных и нулевых проводах плеч защиты.

2. Имитацию КЗ в зоне защиты осуществляют закорачиванием, отсоединением и заземлением плеча ДЗ или поочерёдным снятием крышки испытательного блока каждого плеча. Измерения выполняют в том же порядке, как и при имитации КЗ вне зоны.

Окончательная проверка ДЗ производится током нагрузки первичной цепи под рабочим напряжением. Значение тока небаланса, измеренное в полностью собранной схеме защиты, сравнивается с данными, полученными для других защит того же типа

в одинаковых условиях. Ток небаланса должен быть значительно меньше, чем необходимо для срабатывания защиты. При токе нагрузки 0,5...1,0 номинального небаланс считается допустимым, если напряжение на обмотке исполнительного органа дифференциальных реле не превышает 4% напряжения срабатывания.

#### 8.2.4.2. Продольная ДЗ кабельных линий.

Проверка схемы может быть произведена с помощью постороннего источника однофазного тока. Нагрузочное устройство подключается поочерёдно к двум фазам в начале КЛ, на другой стороне которой устанавливается временная закоротка между теми же фазами. В этом случае имитируется КЗ на линии вне зоны защиты. Если линия реактивирована, то для снижения требуемой мощности нагрузочного устройства реакторы следует зашунтировать. При правильно собранной схеме ДЗ и подаче тока, например, в фазы А – В, как это показано на рис.8.16,а, токи в фазах должны быть:  $I_{a1} = I_{b1} \approx I_{a2} = I_{b2}$ ;  $I_{c1} = I_{c2} = 0$ ; токи в реле и ток небаланса должны быть близки к нулю.

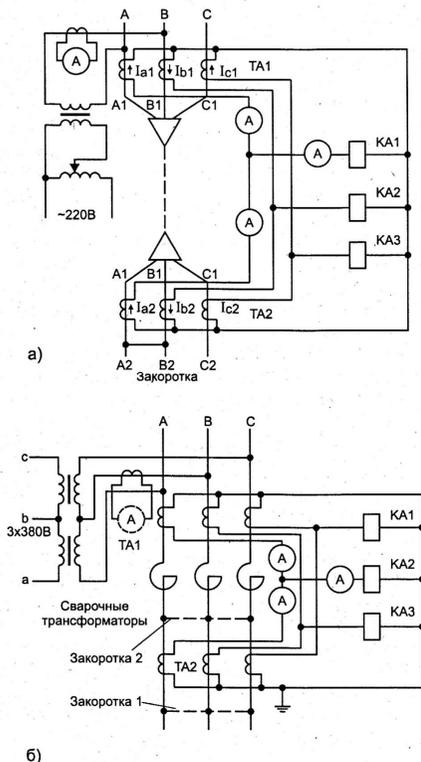


Рис.8.16. Схемы проверки дифференциальной защиты линий током нагрузки: а – от однофазного источника; б – от трёхфазного источника.

Проверку ДЗ трёхфазным током можно выполнить с помощью двух однофазных нагрузочных трансформаторов, например сварочных, включённых по схеме неполной звезды (рис.8.16,б). Здесь установка закоротки 1 позволяет имитировать КЗ вне зоны защиты (сквозное КЗ), закоротки 2 – в зоне защиты. В первом случае фазные токи в начале и конце линии примерно равны, а через реле протекает лишь ток небаланса. Во втором случае каждое реле обтекается током, близким к току данной фазы в зоне действия защиты.

В реактированной линии с индуктивным сопротивлением реакторов 8...10% возможно также проверить дифференциальную защиту током нагрузки от сети 380 В достаточной мощности.

#### ***8.2.4.3. Направленная поперечная дифференциальная защита двух параллельных линий и ДЗ шин.***

Проверка производится пофазно током нагрузки от постороннего источника. Нагрузочное устройство подключается к обеим линиям со стороны питания, а с противоположной стороны трансформаторов тока линии соединяются временной перемычкой. При этом ток в обмотке реле должен быть вдвое больше тока в плече защиты. После включения линий под нагрузку измеряется ток небаланса в реле. Схема защиты может быть проверена также путём отключения одной из линий либо включением только одной линии, либо поочерёдным снятием крышек испытательных блоков плеч защиты – током нагрузки при рабочем напряжении.

Проверка направленности защиты производится так же, как и для реле направления мощности, включённых на полные токи и напряжения. Имитация аварийных условий осуществляется поочерёдной подачей тока нагрузки пофазно в реле каждой из параллельных линий. Под действием каждого из фазных токов одной линии подвижные системы реле должны отклоняться в ту же сторону и замыкать цепь отключения одной и той же линии, а при поочерёдной подаче токов одноимённых фаз – отклоняться в разные стороны.

Построение векторной диаграммы и определение зоны работы защиты производится так же, как и для реле направления мощности защит от однофазных и междуфазных КЗ, только в данном случае строятся векторы вторичных токов обеих линий. При этом вектор вторичного тока нагрузки и вектор первичного тока в одной из линий должны совпадать, в другой – находиться в противофазе. Если активная и реактивная мощности направлены от шин подстанции, и реле, включённое на напряжение  $U_{AC}$ , с током  $I_{a1}$  отключает первую линию, а с током  $I_{a2}$  – вторую, то реле включено правильно.

Проверку ДЗ шин производят от постороннего источника трёхфазного или однофазного тока. Сначала проверяют цепи трансформаторов тока обходного или шиносоединительного выключателя РУ, желательно от трёхфазного источника (например, от трансформатора собственных нужд), и снимают векторные диаграммы. Соединяют данный выключатель последовательно с любым другим, за этим последним устанавливают закоротку и подают ток в первичную цепь выключателей. Снимают векторные диаграммы и измеряют ток небаланса в дифференциальных цепях, значение которого должно быть при этом близко к нулю. Далее переносят закоротку за третий выключатель и повторяют те же операции.

В схеме дифзащиты двойной системы шин шиносоединительный выключатель должен быть снабжён двумя комплектами трансформаторов тока. В пределах РУ токовые цепи этих комплектов должны быть разобщены. Соединение токовых цепей защит обеих систем шин должно быть выполнено на панели дифференциальной защиты шин после избирательных органов.

## **8.2.5. Защита силовых трансформаторов и автотрансформаторов.**

### **8.2.5.1. Защита с газовыми и струйными реле.**

Для внутреннего осмотра реле из его корпуса сливается масло. У поплавковых и лопастных реле особое внимание обращается на установку и крепление грузов, регулирующих плавучесть поплавков и чувствительность лопасти. Проверяется лёгкость хода и отсутствие заедания в движущихся частях, отсутствие трещин в поплавках и стеклянных баллончиках ртутных контактов, особенно в местах вывода электродов. Выводы должны располагаться сверху колбочек.

Изоляционный промежуток между контактами проверяется мегаомметром 1000 В при погруженной в масло выемной части реле. Дефектные контакты излучают фиолетовый свет, сопротивление изоляции их близко к нулю. Контакты испытываются 10-кратным замыканием и размыканием при токе ок. 1 А и напряжении 220 В постоянного тока. Для реле производства инофирм значение тока принимается по данным изготовителя, а при их отсутствии – как для отечественных. Если после испытания на стекле или ртути образуется налёт, реле бракуется.

При осмотре выемной части чашечных реле тщательно проверяется надёжность крепления деталей, люфты, лёгкость хода и отсутствие заедания движущихся частей, расстояние между подвижными и неподвижными контактами (2...3 мм), их параллельность и расположение в одной плоскости. Ход движущихся частей проверяется нажатием от руки; подвижные контакты должны скользить по середине пластин неподвижных контактов

Проверяется действие реле на сигнал (при понижении уровня масла в результате скопления определённого количества газа в верхней части реле – обычно около 400 см<sup>3</sup>, у реле Бухгольца – 300 см<sup>3</sup>) и на отключение (при полном уходе масла из реле). Эта проверка производится, как правило, в собственном корпусе реле: на крышке его открывается кран для доступа воздуха, а через нижнюю пробку медленно сливается масло. Чтобы при заполнении газом или воздухом нижней части реле отключающий элемент не срабатывал, нужно убедиться, что уровень масла, при котором он срабатывает, ниже уровня, обеспечивающего свободный выход газов в расширитель. Разность этих уровней определяет запас надёжности, значение которого задаётся изготовителем в зависимости от чувствительности отключающего элемента к скорости потока масла и от диаметра трубопровода (не менее 10 мм).

В обслуживаемых установках отключение трансформатора при понижении уровня масла нежелательно. Однако при серьёзных повреждениях, сопровождающихся бурным газообразованием, требуется отключение трансформатора. В таких случаях, например, при повреждениях в контакторе устройства РПН, происходит интенсивное разложение масла, струя которого вместе с газами направляется по трубопроводу в расширитель. Для контроля струи устанавливается либо газовое, либо специальное струйное реле, всегда работающее на отключение. В таких реле струя попадает на пластину, которая поворачивается, а связанный с нею магнит приближается к герко-

ну, вызывая замыкание его контакта. Реле имеет контрольно – возвратное устройство, с помощью которого можно не только вернуть реле в исходное положение, но и замкнуть его контакты для проверки как самого реле, так и цепей защиты. Сопrotивление изоляции между герконовыми контактами следует измерять мегаомметром 500 В, а при испытании изоляции повышенным напряжением – закоротить их.

Необходимо проверить надёжность отстройки отключающего элемента газового реле от слабого газообразования. С этой целью осуществляется плавное заполнение корпуса реле через его верхний кран воздухом от бачка со сжатым воздухом или от автомобильного насоса. Вытеснение масла воздухом можно наблюдать через смотровое стекло. После снижения уровня масла до срабатывания сигнального элемента нагнетаемый воздух должен свободно проходить в расширитель, что сопровождается характерным шумом; отключающий элемент при этом действовать не должен.

Затем перекрывают кран в маслопроводе между газовым реле и расширителем и продолжают нагнетание воздуха до срабатывания отключающего элемента. Можно облегчить эту операцию, слив 2 – 3 ведра масла через нижний кран трансформатора.

Для срабатывания отключающего элемента нужно нагнать воздух резко и неравномерно, чтобы создать толчок масла. Если таким образом добиться срабатывания не удаётся, можно достичь этого открытием крана в маслопроводе после нагнетания в реле воздуха.

В трансформаторах с форсированным воздушным охлаждением или с принудительной циркуляцией масла необходимо убедиться, что реле не срабатывает при пуске и останове вентиляторов и циркуляционных насосов, а также при всех возможных переключениях вентилей в системе маслопроводов. Проверка производится пятишестикратным выполнением указанных операций.

Правильность сборки схемы защиты проверяется осмотром цепей на панели защиты, прозвонкой кабелей и проверкой маркировки реле, отключающих устройств, сигнальных ламп, сборок зажимов и жил кабелей. Проверяется напряжение срабатывания и возврата промежуточных реле и ток срабатывания сигнальных реле. После испытания изоляции проверяется надёжность контактных соединений и взаимодействие реле при напряжении оперативного тока 80 и 100% номинального. Наконец, замыканием выводов сигнальных и отключающих контактов газового реле имитируется его срабатывание и проверяется взаимодействие всех элементов защиты в соответствии с принципиальной схемой. Опробуется действие сигнализации и защиты на отключение выключателей.

Если после включения трансформатора под напряжение газовая защита срабатывает на сигнал, то следует: проверить наличие газа, обращая внимание на его цвет и количество; проверить уровень масла в расширителе; произвести внешний осмотр трансформатора с целью выявления признаков повреждения (ненормальное гудение, повышенный шум, треск, течь масла и др.). Когда такие признаки отсутствуют и газы, скопившиеся в реле, бесцветны и негорючи, трансформатор может быть вновь поставлен под напряжение. Требуется только периодически выпускать из газового реле воздух, пока процесс его выделения не прекратится.

Если же при проверке в реле обнаруживаются горючие газы, трансформатор надо отключить и незамедлительно (цвет газа быстро меняется) установить его количество, цвет и горючесть. Количество газа определяется по делениям на смотровом стек-

ле, цвет – на глаз через смотровое стекло и после взятия пробы. По характеру скопившихся в реле газов можно судить о виде и степени повреждения трансформатора:

- а) невоспламеняющийся газ, без цвета и запаха масла указывает на наличие воздуха;
- б) бело–серый газ, невоспламеняющийся, с острым запахом свидетельствует о повреждении изолирующих материалов;
- в) жёлтый газ, трудно воспламеняющийся – признак повреждения деревянных элементов;
- г) тёмно-синий или чёрный легко воспламеняющийся газ свидетельствует о наличии дуги в масле или о чрезмерном перегреве масла.

Проверку горючести газов разрешается производить только у краника в крышке реле, слегка приоткрыв его. При зажигании газа спичку надо держать несколько в стороне от крана, немного (на 4...5 см) выше его отверстия.

Те же операции по проверке газов в реле выполняют и в случае, когда трансформатор отключается от действия газовой защиты.

#### **8.2.5.2. Дифференциальная защита.**

Проверку защиты осуществляют током нагрузки от постороннего источника симметричного трёхфазного тока, либо от уравнильных токов двух параллельно работающих трансформаторов, либо от проверяемого трансформатора. При проверке измеряются токи во всех фазах и в нуле, напряжение небаланса на реле, обтекание током цепей защиты и снимаются векторные диаграммы. Имитация работы защиты производится путём пофазного отключения тока в цепях ДЗ с одной её стороны.

1) Для проверки током нагрузки от постороннего источника обмотка НН трансформатора закорачивается, а на обмотку ВН подают напряжение от источника питания, обычно от трансформатора собственных нужд подстанции. Через трансформатор будет проходить испытательный ток

$$I_{\text{исп}} = I_{\text{н}} U_{\text{исп}} / U_{\text{н}} u_{\text{к}},$$

где  $U_{\text{исп}}$  – напряжение источника питания;  $I_{\text{н}}$  – номинальный ток трансформатора;  $U_{\text{н}}$  – номинальное напряжение обмотки ВН;  $u_{\text{к}}$  – напряжение КЗ трансформатора.

Пусть, например, к трансформатору типа ТМ, мощность которого  $S = 1000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ , номинальное напряжение  $U_{\text{н}} = 10 \text{ кВ}$ , напряжение короткого замыкания  $u_{\text{к}} = 0,055$  и номинальный ток  $I_{\text{н}} = S / \sqrt{3} U_{\text{н}} = 10^3 / 1,73 \cdot 10 = 57,8 \text{ А}$ , прикладывается испытательное напряжение  $U_{\text{исп}} = 0,4 \text{ кВ}$ . Тогда испытательный ток будет

$$I_{\text{исп}} = 57,8 \cdot 0,4 / 10 \cdot 0,055 = 42,0 \text{ А},$$

а необходимая мощность источника питания

$$S_{\text{и.п}} = \sqrt{3} I_{\text{исп}} U_{\text{и.п}} = 1,73 \cdot 42 \cdot 0,4 = 29,1 \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

2) Уравнильный ток двух силовых трансформаторов, включённых параллельно (в режиме холостого хода или с небольшой нагрузкой), получается путём установки переключателей ответвлений обмоток трансформаторов в неодинаковые положения. Значение уравнильных токов должно быть достаточным для снятия векторных диаграмм.

3) При испытании любым из указанных способов снимают векторные диаграммы токов. Питание цепей напряжения фазометра осуществляют от постороннего источника симметричного трёхфазного напряжения, синхронного с напряжением проверяемого трансформатора, например от трансформатора напряжения на стороне ВН или НН. Значение тока нагрузки трансформатора должно быть не менее 20...30% номинального. Квадрант, в котором располагается вектор тока, определяется согласно следующим правилам:

- за положительное направление мощности и тока принято направление их от шин подстанции (знак «+»), и наоборот (знак «-»);

- значение активной мощности (тока) считается положительным, когда вектор тока совпадает с положительным направлением вектора одноименного фазного напряжения (ось +P);

- значение реактивной мощности (тока) считается положительным, когда вектор тока отстаёт на  $90^\circ$  от вектора одноименного фазного напряжения (ось +Q).

Вектор тока, например, фазы А, может располагаться относительно вектора «своего» напряжения  $U_A$  во всех четырёх квадрантах в зависимости от направления активной и реактивной мощностей в соответствии с рис.8.17. То же относится, конечно, и к фазам В и С.

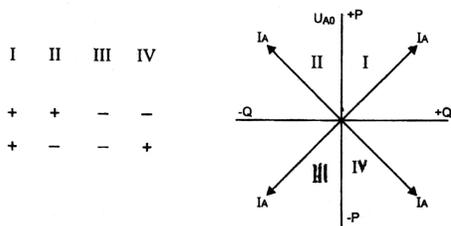


Рис.8.17. Направление активной и реактивной мощности и векторов тока (для фазы А).

Квадрант, в котором расположен вектор тока $I_A$	I	II	III	IV
Активная мощность	+	+	-	-
Реактивная мощность	+	-	-	+

Чтобы построить вектор первичного тока, необходимо знать, в каком квадранте и под каким углом к напряжению он расположен. Для этого следует определить направления и значения активной и реактивной мощностей (или соотношение между ними), например, по показаниям щитовых ваттметров. Если такие приборы отсутствуют, не проверены или не обладают достаточной чувствительностью, то необходимо создать в первичной цепи переток мощности в определённом направлении. Так, например, в режиме одностороннего питания активная мощность всегда направлена от источника питания к потребителю. То же относится и к реактивной мощности, но при условии, что на приёмном конце нет источников реактивной мощности (статических конденсаторов, синхронных машин и др.); в противном случае направление реактивной мощности может быть любым. Следует учитывать, что источниками реак-

тивной мощности, направленной к шинам подстанции, могут быть также протяжённые воздушные и кабельные линии высокого напряжения.

Направление реактивной мощности в линии можно определить и по известным значениям напряжения на соседних подстанциях: реактивная мощность всегда направлена к шинам подстанции с более низким напряжением. Использование такого способа возможно лишь при наличии достаточной разницы между напряжениями на подстанциях, значительно превышающей погрешности измерений.

Снятие векторной диаграммы токов выполняют в следующем порядке.

1. Сразу после включения трансформатора под напряжение сети или постороннего источника питания проверяют обтекание током фазных, нулевых проводов токовых цепей в плечах ДЗ, в дифференциальных цепях, в цепях других трансформаторах тока.

2. Измеряют напряжение и ток небаланса обмотки исполнительного органа каждого дифференциального реле; значение напряжения должно быть не более 0,2 В, а тока 2...10 мА при номинальной нагрузке.

Проверяют чередование фаз и симметрию напряжений.

Измеряют значение и фазу токов в фазных и нулевых проводах токовых цепей в плечах ДЗ, в дифференциальных цепях.

При поочерёдном отключении токов плеч ДЗ измеряют токи в дифференциальных реле.

Строят векторную диаграмму и убеждаются, что на ней: векторы тока симметричны; векторы тока и векторы напряжения чередуются в одинаковом порядке; векторы тока в плечах одного реле направлены в противоположные стороны.

Наиболее удобно снимать векторные диаграммы приборами типа ВАФ или аналогичными, которые позволяют получить диаграммы как токов, так и напряжений, и при использовании токоизмерительных клещей не требуют разрыва цепей тока. При отсутствии такого прибора или фазометра можно воспользоваться однофазным ваттметром.

Сущность последнего метода состоит в следующем. Выражение для активной мощности любой фазы можно записать в виде:

$$P = U I \cos \varphi,$$

где  $U$  и  $I$  – напряжение и ток фазы соответственно,  $\varphi$  – угол фазного сдвига между ними. Поскольку произведение  $I \cos \varphi$  есть проекция вектора тока на направление вектора напряжения, то её можно оценить значением активной мощности, но при условии, что значения напряжения всех трёх фаз будут одинаковы.

За систему координат принимают три фазных или междуфазных напряжения симметричной трёхфазной системы А, В, С, а вектор тока определяют по любым двум его проекциям на оси координат:  $I_{\text{оа}}$  и  $I_{\text{об}}$ , или  $I_{\text{оа}}$  и  $I_{\text{ос}}$ , или  $I_{\text{об}}$  и  $I_{\text{ос}}$ . Восставив перпендикуляры из концов этих отрезков, получим на их пересечении точку, определяющую конец искомого вектора, а стало быть, и сам вектор тока. Если при этом окажется, что перпендикуляры пересекаются не в одной точке, то за конец вектора тока принимают точку в центре образовавшегося треугольника. Сумма всех трёх проекций тока каждой фазы должна быть равна нулю.

Сами эти проекции находят следующим образом. К однофазному ваттметру поочерёдно подводят фазные напряжения, причём к «концу» потенциальной обмотки подсоединяют нулевую точку цепи напряжения. Токтовую обмотку ваттметра включают в цепь трансформатора тока данной фазы так, что «начало» обмотки (зажим \* или +) соединяется с его фазным выводом, а «конец» – с нулевой точкой ТА, собранных в звезду. Отсчитывают показания ваттметра для каждой фазы, считая их положительными при отклонении стрелки прибора вправо, а влево – отрицательными, и проверяют, равна ли нулю алгебраическая сумма всех трёх показаний ваттметра. Случай, когда эта сумма отличается от нуля, как раз и соответствует образованию упомянутого выше треугольника на векторной диаграмме. Далее, выбрав удобный масштаб, откладывают показания ваттметра (с учётом знака) на векторной диаграмме и строят векторы токов всех фаз. Абсолютные значения токов находят непосредственным измерением.

Если при снятии векторной диаграммы были выполнены все требования и полярности приборов и измерительных трансформаторов соблюдены, то векторы тока, построенные согласно снятой диаграмме, будут располагаться в тех же квадрантах, что и первичный ток. При правильном включении токовых цепей дифференциальной защиты геометрическая сумма МДС для каждой фазы должна равняться нулю.

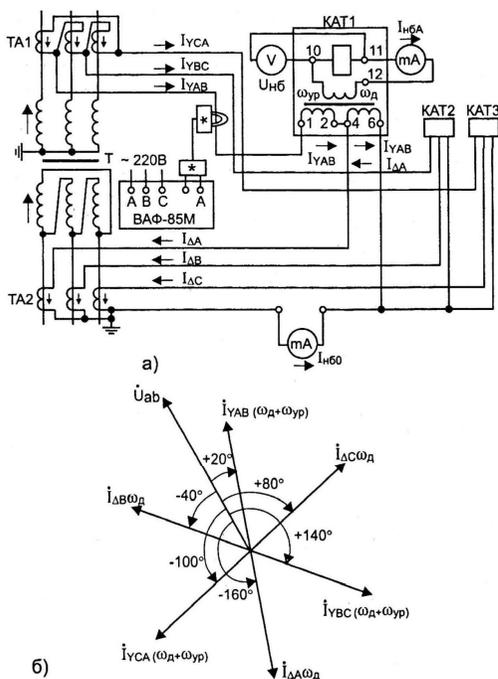


Рис.8.18. Проверка дифференциальной защиты трансформатора под нагрузкой: а – схема включения приборов; б – векторная диаграмма магнитодвижущих сил

В качестве примера на рис. 8.18 приведены схема проверки дифференциальной защиты с реле типа РНТ565 рабочим током трансформатора и векторная диаграмма. Обмотка ВН трансформатора собрана по схеме «звезда», обмотка НН – «треугольник». Для измерения значений и фаз токов в плечах защиты используется прибор ВАФ-85М (рис.8.18,а). В качестве ориентирующего (опорного) принято напряжение  $U_{аб}$ . Ввиду того, что вторичные токи в плечах защиты непосредственно не компенсируются, строятся векторы МДС. Значения углов между вектором опорного напряжения и векторами токов, полученные в результате шести измерений, указаны на рис. 8.18,б. На диаграмме видно, что векторы трёх токов в плечах защиты как со стороны ВН, так и со стороны НН, сдвинуты между собой на  $120^\circ$ , а токи в плечах одного реле направлены противоположно. Пусть, например, значения этих токов составляют 4 и 4,5 А соответственно, а на дифференциальной и уравнивательной обмотках реле РНТ выставлено число витков  $w_d = 15$  и  $w_{ур} = 2$ ; тогда для фазы А, в частности, результирующая МДС будет:

$$I_{\Delta A} w_d - I_{Y_{AB}} (w_d + w_{ур}) = 4,5 \times 15 - 4 (15 + 2) \approx 0, \text{ что и требуется.}$$

## **8.2.6. Защита электродвигателей.**

### **8.2.6.1. Проверка основных данных.**

Релейная защита электродвигателей переменного тока (ЭД) выполняется и проверяется в основном по тем же правилам, что и для других видов электрооборудования; ниже рассматриваются только существенные отличия. Перед пуском ЭД должны быть подтверждены его основные данные: кратность пускового тока, отношение короткого замыкания (ОКЗ) синхронного ЭД, время разворота при пуске и др.

Кратность пускового тока может быть определена непосредственно путём осциллографирования, если это не вызывает затруднений. Этот способ даёт полную картину переходного процесса тока, включая бросок тока намагничивания. Установившееся значение пускового тока можно определить и на пониженном напряжении. С этой целью на статор ЭД подают напряжение  $\sim 3 \times 380$  В и, медленно проворачивая ротор от руки, отмечают наибольшее значение тока по амперметру (при повороте ротора ток может несколько изменяться). Кратность пускового тока определяется из выражения

$$k = I_{оп} U_n / I_n U_{оп},$$

где  $I_n$ ,  $U_n$  – номинальные, а  $I_{оп}$ ,  $U_{оп}$  – значения тока и напряжения, полученные из опыта, соответственно. В действительности значение  $k_n$  оказывается несколько выше рассчитанного из-за большего насыщения стали машины при рабочем напряжении и находится обычно в пределах 5 ... 8.

Величина ОКЗ является по существу характеристикой синхронного генератора, но может быть определена и в случае, когда синхронная машина предназначена для работы в режиме двигателя, если это необходимо ( машина большой мощности, паспортные данные вызывают сомнения или отсутствуют и др.). С этой целью работающий двигатель переводят в генераторный режим, сняв питающее напряжение со статора, и измеряют требуемые параметры на выбеге машины.

Под ОКЗ понимается обычно отношение установившегося тока  $I_K$  симметричного трёхфазного КЗ на выводах машины при токе возбуждения  $i_{в0}$ , соответствующем номинальному напряжению статора на холостом ходу, к номинальному току статора  $I_H$ :

$$\text{ОКЗ} = I_K / I_H.$$

Учитывая, что ток КЗ и ток возбуждения связаны линейной зависимостью, это отношение можно записать и так:

$$\text{ОКЗ} = i_{в0} / i_{вк},$$

где  $i_{вк}$  – ток возбуждения, при котором ток КЗ равен номинальному:  $I_K = I_H$ .

Ток  $i_{в0}$  можно найти по характеристике холостого хода (ХХ), если она представлена в документах. Надо только иметь в виду, что из-за наличия остаточного намагничивания снятая характеристика не проходит через начало координат, и её необходимо сдвинуть по горизонтальной оси на величину  $\Delta i_a$ , как это показано на рис.8.19,а. Если же характеристика ХХ отсутствует, то найти ток  $i_{в0}$  экспериментально проще всего следующим путём. При напряжении, равном номинальному, изменяют возбуждение ЭД так, чтобы потребляемый им ток статора был наименьшим. Установленное таким образом значение тока возбуждения практически не будет отличаться от полученного по характеристике холостого хода.

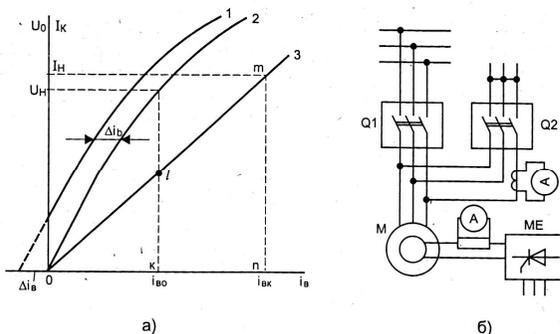


Рис.8.19. К снятию характеристик холостого хода и короткого замыкания синхронного двигателя:

а – характеристики холостого хода: 1 – снятая характеристика ХХ; 2 – смещённая характеристика ХХ; 3 – характеристика короткого замыкания;

б – принципиальная схема включения приборов и аппаратов: М – синхронный двигатель; МЕ – возбудитель; Q1, Q2 – выключатели; А – амперметры постоянного и переменного тока. Цепи измерения напряжения не показаны.

Во время выбега можно осуществить и опыт короткого замыкания. Цепь КЗ подготавливается заранее. Проводники закоротки у выключателя Q2 (рис.8.19,б) должны

иметь минимальную длину и сечение, достаточное для ожидаемого тока. Немедленно после отключения выключателем Q1 вращающейся машины от сети с неё снимается возбуждение, выключателем Q2 производится короткое замыкание и тотчас возбуждение поднимается вновь, пока не установится ток КЗ, близкий к номинальному значению. Характеристика КЗ прямолинейна и потому достаточно сделать три-четыре отчёта. Изменение частоты вращения не влияет на результаты измерения, при условии, что во время опыта она остаётся выше 15 ... 20% номинальной и снижается не быстрее, чем на 10% номинального значения за одну секунду.

Из рис.8.19, а видно, что отношение короткого замыкания

$$OKЗ = kl / mn = i_{во} / i_{вк}.$$

Время разбега измеряется при пробном пуске совместно с приводным механизмом и представляет интерес для отстройки защиты от пусковых токов.

#### **8.2.6.2. Проверка токовой отсечки.**

Проверку удобно вести с применением нагрузочного трансформатора, обеспечивающего подачу первичного тока порядка 500...1000 А в трансформаторы тока релейной защиты; с другого конца ТА их первичные выводы закорачиваются. Необходимо провести имитацию всех трёх вариантов двухфазного КЗ с измерением вторичного тока и проверкой поведения реле. Отсечку ЭД мощностью до 400...500 кВт и напряжением 6 – 10 кВ можно проверить, подняв первичный ток до срабатывания реле. Если значение первичного тока срабатывания реле совпадает с заданным, вторичные токи можно не измерять. В том случае, когда мощность нагрузочного трансформатора недостаточна для срабатывания реле, можно ограничиться измерением вторичных токов в реле и убедиться в наличии вращающего момента в их подвижных системах. Вторичные токи должны соответствовать первичным с учётом коэффициента трансформации и схемы соединения ТА.

#### **8.2.6.3. Продольная дифференциальная защита.**

Проверка производится током нагрузки от постороннего источника. Для обеспечения необходимого значения тока обмотки статора двигателя пофазно закорачиваются на выводах или на шинных сборках.

Поочерёдно имитируются внешние двухфазные короткие замыкания и измеряются вторичные токи в плечах ДЗ от каждой группы ТА и в реле защиты. Ток небаланса в реле не должен превышать 2...3% тока в плечах защиты. В схеме ДЗ блока трансформатор – двигатель ток небаланса может быть значительно больше за счёт разнотипности трансформаторов тока в плечах, но не должен превышать 10% при токе нагрузки не менее 50% номинального.

Имитируются двухфазные КЗ в зоне защиты. Значение первичного тока желательно доводить при этом до срабатывания реле, но при недостаточной мощности источника можно ограничиться проверкой вторичных токов и вращающего момента реле. Одновременно проверяется наличие тока в цепях защиты от перегрузки.

Удобно также проверять дифзащиту двигателя 6 – 10 кВ подачей симметричного трёхфазного напряжения 0,4 кВ на выводы первичной обмотки трансформаторов тока со стороны выключателя ВН.

Дифференциальную защиту проверяют и под нагрузкой при пробном пуске ЭД. Отстройка реле ДЗ от пускового тока проверяется двух – трёхкратным включением двигателя. Затем при нагрузке в цепях защиты не менее 25...30% номинальной снимаются векторные диаграммы ДЗ и измеряется ток небаланса в реле.

С целью снижения тока небаланса при пусках двигателей и внешних КЗ рекомендуется уравнивать сопротивления проводов дифференциальной защиты. При имитации КЗ в зоне защиты реле должны срабатывать на отключение.

#### **8.2.6.4. Пробный пуск электродвигателя.**

Перед пробным пуском двигателя защиты от междуфазных КЗ и однофазных замыканий на землю должны быть проверены, включены в работу и опробованы на отключение выключателя ЭД и АГП синхронного двигателя (если имеется). Измерив время разворота агрегата от момента включения выключателя до спада пускового тока ниже номинального значения тока статора, необходимо оценить надёжность отстройки токовой защиты от времени пуска. В случаях, когда отстройка не обеспечивается, выдержку времени защиты от перегрузки следует увеличить.

Если перед пуском двигателя не была осуществлена проверка его дифзащиты в режиме внешнего КЗ, должна быть выполнена проверка под рабочим током ЭД. Для этого, не нарушая цепей защиты, снимают векторные диаграммы и измеряют значения вторичных токов, проходящих в обоих плечах защиты. Геометрическая сумма векторов этих токов должна быть равна нулю в каждой фазе.

Для получения достаточно чётких результатов измерения следует производить при возможно большей токовой нагрузке ЭД. На синхронных двигателях это осуществляется достаточно просто путём увеличения тока возбуждения, но так, чтобы значение тока нагрузки не достигло уставки срабатывания реле, действующих на отключение.

У синхронных двигателей с АГП при пробном пуске проверяют время гашения поля, точнее, промежуток времени между моментом срабатывания промежуточного реле, действующего на отключение выключателя и АГП, и моментом, когда напряжение на статоре двигателя уменьшится до 30% номинального. Значение тока возбуждения ЭД перед отключением должно соответствовать холостому ходу, а время гашения поля должно быть не более 8...10 с.

#### **8.2.7. АПВ и АВР.**

##### **8.2.7.1. Взаимодействие элементов схем с АПВ.**

Все схемы с АПВ имеют, помимо основных элементов (выключатели, реле защит и др. аппараты), также и режимные ключи, накладки и прочие коммутационные элементы. Следует проверить работу схем в целом и от каждого аппарата в отдельности, учитывая положения выключателя (включён или отключён, от защиты или вручную) и коммутационных элементов. Проверяются блокировки устройства и надёжная работа схем при пониженном напряжении оперативного тока (80% номинального).

Производится опробование устройства АПВ совместно с выключателями, причём имитируется успешное или неуспешное включение. Проверяется однократность или двукратность АПВ, работа всех блокировок, ускорение защиты до и после АПВ и т.д. Особое внимание надо обратить на проверку блокировки от многократных включений привода выключателя при двукратном АПВ, отсутствие ложных и обходных путей при работе АПВ. Следует тщательно проверить работу блок-контактов КГП – го-

товности привода к включению (пружина заведена), так как при ручном заводе они часто остаются в случайном положении.

Необходимо убедиться также, что при включении выключателя ключом управления или при снятии накладки АПВ не работает. Одновременно опробуется работа сигнализации: выпадение блинкеров, действие sireны и сигнальных ламп.

Измеряется время полного цикла АПВ от подачи импульса на отключение выключателя до повторного замыкания главных контактов выключателя. При необходимости производится осциллографирование процесса: записываются напряжения со стороны шин, линии, а также ток линии. По осциллограммам убеждаются, что включение выключателя устройством АПВ проходит нормально, без толчков тока и нарушения синхронизма.

#### **8.2.7.2. Взаимодействие элементов схем с АВР.**

Проверку взаимодействия реле производят замыканием и размыканием контактов реле вручную, наблюдая при этом за работой схемы и сопоставляя её с предусмотренной проектом.

Опробование АВР производят при полностью собранной схеме вторичной коммутации путём имитации исчезновения напряжения. С этой целью отключают соответствующий трансформатор напряжения, желательнее с первичной стороны (разъединителем), или со вторичной стороны посредством какого – либо временно устанавливаемого аппарата. Необходимо имитировать успешное и неуспешное АВР и, если имеется, ускорение до и после АВР. Одновременно следует проверить однократность АВР и действие схемы на выключатели, отделители и пр. Необходимо проверить также работу всех блокировок путём включения и отключения аппаратов, контакты которых введены в соответствующие цепи АВР. Проверяется и работа сигнализации – выпадение блинкеров, действие звонка, сигнальных ламп.

Измеряется время действия АВР от момента подачи команды на замыкание контактов реле минимального напряжения до замыкания контактов резервного выключателя. Проверяется однократность отключения последнего (в случае неустановившегося КЗ) подачей импульса на отключение рабочего выключателя при закороченных контактах реле защиты. При необходимости осциллографируют напряжения и токи на рабочем и резервном вводах после искусственного отключения рабочего выключателя.

### **8.3. Контроль качества электрической энергии**

#### **8.3.1 Контролируемые параметры**

##### **8.3.1.1. Общие сведения.**

Все электроустановки потребителей рассчитаны на определенные (номинальные) параметры качества электроэнергии (КЭ), отклонение которых от установленных значений может вызвать ухудшение работы электроприемников и даже их повреждение или причинить вред здоровью людей. Поэтому **ГОСТ 13109-97** (действителен до 01.07.2014 г.) регламентирует допустимые отклонения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) и способы их оценки. Практически невозможно или крайне нерентабельно поддерживать эти показатели на уровне номинальных значений в любой момент времени, в связи с чем стандарты (нормы качества электроэнергии в систе-

мах электроснабжения общего назначения) регламентируют их в определенных границах.

Установлены три зоны возможных отклонений ПКЭ. Первая – *нормально допустимые* отклонения, при которых возможна длительная нормальная работа электроприемников. Вторая зона – *предельно допустимые* отклонения, которые вызывают существенное ухудшение технико – экономических показателей и допускаются кратковременно. Третья зона – *превышение* предельно допустимых значений, когда функционирование оборудования становится невозможным.

Согласно ГОСТ 13189-97 для оценки качества электрической энергии принимают следующие показатели:

- установившееся отклонение напряжения;
- размах изменения напряжения;
- доза фликера;
- коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- коэффициент несимметрии напряжений обратной последовательности;
- коэффициент несимметрии напряжений нулевой последовательности;
- отклонение частоты;
- длительность провала напряжения;
- импульсное напряжение;
- коэффициент временного перенапряжения.

Для первых восьми ПКЭ устанавливаются их нормально допустимые и предельно допустимые значения. Предельно допустимая длительность провала напряжения устанавливается равной 30 с. Для импульсного напряжения и временного перенапряжения допустимые параметры не регламентируются.

Нормально допустимые значения ПКЭ устанавливаются с вероятностью 0,95 на суточном интервале времени. Это означает, что в течение  $0,95 \cdot 24 = 22,8$  час ПКЭ не должны превышать нормально допустимых значений, а в остальные 1,2 ч – предельно допустимых значений.

### **8.3.1.2. Установившееся отклонение напряжения ( $n$ .1).**

Причиной отклонения напряжения на выводах электроприемников и в узлах электрической сети являются изменяющиеся во времени электрические нагрузки. Установившееся отклонение действующего значения напряжения от номинального выражается как

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} 100\%,$$

где  $U_y$  – среднеквадратичное значение действующего напряжения за 1 мин.

Если, например, получены результаты трех наблюдений:  $U = 217; 226$  и  $221,5$  В, то сумма квадратов этих значений будет  $217^2 + 226^2 + 221^2 = 47089 + 51076 + 48841 = 147006$ , а среднеквадратичное напряжение  $U_y = \sqrt{147006 : 3} = 221,4$  В и установившееся отклонение при  $U_{ном} = 220$  В будет  $(221,4 - 220)100 : 220 = 0,64\%$ .

Согласно ГОСТ число наблюдений за 1 мин должно быть не менее 18, т.е. в течение 1 мин должны быть зафиксированы по крайней мере 18 значений напряжения, затем вычислено среднее квадратическое из них. Если напряжение несинусоидально, то в расчет принимаются действующие значения первых гармоник (основной частоты) напряжения  $U_{(1)}$ . Если трехфазная система несимметрична, то в расчет принимается напряжение прямой последовательности  $U_1$ . В общем случае в сетях трехфазного тока в расчет принимается действующее значение напряжения основной частоты прямой последовательности, обозначаемое как  $U_{1(1)}$ .

Точная математическая формула для вычисления этой величины чрезвычайно сложна и громоздка. При не очень большой асимметрии напряжений обратной последовательности допускается определять напряжение  $U_{1(1)}$  по приближенной формуле

$$U_{1(1)} = \frac{1}{3} (U_{AB(1)} + U_{BC(1)} + U_{CA(1)}).$$

При сравнительно небольших искажениях синусоидальности напряжения допускается вместо действующих значений напряжения основной частоты измерять действующие значения напряжения с учетом гармонических составляющих.

Качество электроэнергии по показателю  $\delta U_y$  удовлетворяет стандарту, если все измеренные за каждую минуту в течение 24 ч значения  $U_y$  не превышают предельно допустимых, а не менее 95% не превосходят нормально допустимых значений. Суммарная продолжительность выхода за нормально допустимые значения должна быть не более 1 ч 12 мин.

Нормально допустимое и предельно допустимое отклонение не должны превышать соответственно  $\pm 5$  и  $\pm 10\%$ . На зажимах осветительных приборов напряжение должно быть не менее 90% номинального. Отклонение значения напряжения от номинального приводит к ухудшению технико-экономических показателей работы электроприемников. Так, при изменении напряжения на  $\pm 10\%$  максимальный и вращающий момент асинхронного двигателя изменяются примерно на  $\pm 20\%$ , а при длительной работе при пониженном на 10% напряжении срок службы его снижается вдвое. Особенно сильно влияет отклонение напряжения на работу осветительных установок. Так, срок службы ламп накаливания сокращается пропорционально повышению напряжения в 14-й степени, то есть в 2 раза при 105% и почти в четыре при 110% номинального напряжения. Срок службы люминесцентных ламп при повышении напряжения на 10% сокращается на 20...30%. Уменьшение светового потока и освещенности при пониженном напряжении вредно сказывается на качестве продукции.

Отклонения напряжения можно компенсировать применением различных средств регулирования, однако наиболее рациональным является переход к более высокому уровню напряжения сети.

### **8.3.1.3. Размах изменения напряжения (п.2). Фликер (п.3).**

Эти величины характеризуют колебания напряжения, воспринимаемые человеком.

*Колебания напряжения* – это быстро изменяющиеся отклонения действующих значений напряжения длительностью от полупериода до нескольких секунд. Причиной их являются пиковые быстропеременные нагрузки сети.

*Размах изменения напряжения* – разность между значениями напряжения до и после изменения напряжения.

Этот параметр ( $\delta U_t$ ) ГОСТ нормирует более жестко для помещений с лампами накаливания и с повышенной освещенностью.

*Фликер* (от англ. flicker – мигание, мерцание) – это субъективное восприятие человеком пульсации светового потока.

Фликер утомляет, снижает производительность труда, отрицательно влияет на здоровье человека.

*Доза фликера* – мера восприятия человеком пульсации светового потока.

Размах изменения напряжения, %, вычисляются по формуле

$$\delta U_t = \frac{U_i - U_{i+1}}{U_{ном}} 100\%,$$

где  $U_i$ ,  $U_{i+1}$  – значения следующих один за другим экстремумов (максимальных или минимальных значений) огибающей среднеквадратичных значений напряжения  $U_{скв}$ , представленной в виде ступенчатой кривой (рис.8.20).

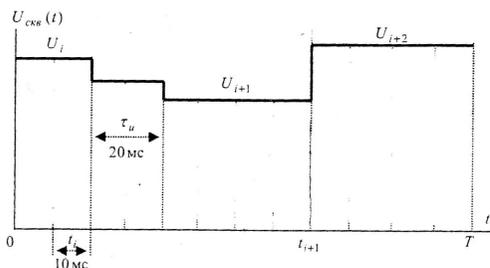


Рис. 8.20. Огибающая среднеквадратичных значений напряжения

Если интервал между экстремумами меньше 30 мс, то он во внимание не принимается, и на следующем этапе измеряется разность  $U_{i+1} - U_{i+2}$ . Как видно из рис.8.20, разность экстремумов может быть как положительной, так и отрицательной, но в расчет принимается только абсолютное ее значение. При небольшом искажении синусоидальности напряжения допускается не вычислять среднеквадратичные значения, а использовать для расчетов  $\delta U_t$  огибающую амплитудных значений напряжения; при этом разность амплитуд следует делить на  $\sqrt{2} U_{ном}$ .

Колебания напряжения характеризуются также частотой повторения изменений напряжения, 1/с или 1/мин,

$$F = m / T,$$

где  $m$  – число изменений напряжения за время  $T$ ;

$T = 10$  мин – интервал времени изменения.

Доза фликера ( $P_f$ , отн. ед.) более точно характеризует влияние колебаний напряжения на зрительную деятельность человека, чем размах напряжения. С помощью фликерметра определяют кратковременную  $P_{st}$ , на интервале времени  $T = 10$  мин, и длительную  $P_{lt}$ , на интервале  $T = 2$  ч, дозы фликера. Наиболее раздражающее действие фликера проявляется в диапазоне частот 6...10 Гц, центральное значение 8,8 Гц. Показатель  $P_f$  рассчитывается с помощью специальной программы, заложенной в прибор (фликерметр), по измеренным значениям размаха напряжения и степени отрицательного влияния гармонических составляющих на зрительную деятельность человека. КЭ по дозе фликера считают соответствующим стандарту, если измеренные в течение 24 час дозы фликера не превышают предельно допустимых значений. Предельно допустимые значения  $P_f$  для кратковременного и длительного действия фликера равны соответственно 1,38 и 1,0%, а для помещений с лампами накаливания, где требуется большое зрительное напряжение, соответственно 1, 0 и 0,74%.

#### **8.3.1.4. Показатели искажения кривой напряжения (пп.3,4).**

Причиной искажения синусоидальности напряжения является наличие в сети нелинейных нагрузок, т.е. таких элементов электрической цепи, сопротивление которых зависит от тока или напряжения. К элементам с нелинейными вольт-амперными характеристиками относятся вентиляльные полупроводниковые преобразователи, электросварочные установки, электродуговые печи, газоразрядные источники света и др. Характерной особенностью цепей с нелинейными элементами является потребление несинусоидального тока при синусоидальном приложенном напряжении. Токи нелинейных нагрузок и соответственно напряжения в узлах сети содержат высшие гармоники, представляющие собой помехи для потребителей.

Известно, что периодическая функция любой формы, в том числе несинусоидальная кривая тока или напряжения, в общем случае может быть представлена в виде суммы постоянной составляющей и множества (в пределе – бесконечного числа) синусоидальных функций различной частоты  $n\omega$  (ряд Фурье), называемых *гармониками*, где  $n = 1, 2, 3, \dots$  – номер гармоники (гармонической составляющей). Согласно ГОСТ 13109-97 учитываются гармоники до  $n = 40$  включительно. Гармоника с  $n = 1$  называется первой, или основной, остальные (при  $n > 1$ ) – высшими гармоническими. На рис.8.20 в качестве примера показано суммирование первой и третьей гармонических составляющих, т.е. на частоте 50 и 150 Гц соответственно, при частоте искаженного гармонического сигнала 50 Гц.

В расчетах допускается, что параметры первой гармоники равны номинальным (т.е. например  $U_{(1)} = U_{ном} = 220$  В), а также не учитывать гармоники, значение которых менее 0,1%. Аналитически связь между высшими гармониками и основной определяется сложными выражениями, поэтому в инженерной практике пользуются графическими зависимостями для конкретных электроустановок. В частном случае, когда полуволны кривой тока имеют прямоугольную форму (меандр), можно воспользоваться простейшей формулой  $I_{(n)} = I_{(1)} / n$ .

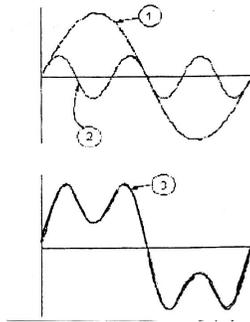


Рис. 8.21. Суммирование 1-й и 3-й гармоник: 1 – первая (основная) гармоническая составляющая (50 Гц); 2 – третья гармоническая составляющая (150 Гц); 3 – искаженная кривая как сумма 1 – й и 3 – й гармоник

Суммарное действующее значение высших гармоник определяется как средне-квадратичное:

$$U_{\text{вг}} = \sqrt{U_{(2)}^2 + U_{(3)}^2 + \dots + U_{(40)}^2} .$$

Несинусоидальность напряжения характеризуется следующими показателями:

$K_U = \sqrt{\frac{S_{u(n)}}{N}} \cdot 100\%$  – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения и

$K_{U(n)} = \sqrt{\frac{S_u}{N}} \cdot 100\%$  – коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения.

Допустимые значения коэффициента  $K_U$  приведены в табл. 8.1, нормально допустимые коэффициенты  $\sqrt{U_{(2)}^2 + U_{(3)}^2 + \dots + U_{(40)}^2}$  – в табл.8.2. Предельно допустимые значения коэффициента  $K_{U(n)}$  превышают нормальные в 1,5 раза.

Таблица 8.1

Допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, %

Нормально допустимое значение при $U_{\text{ном}}$ кВ				Предельно допустимое значение при $U_{\text{ном}}$ кВ			
0,38	6-20	35	110	0,38	6-20	35	110
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

В действующих сетях указанные коэффициенты измеряются специальными приборами следующим образом:

- на трехсекундных интервалах времени  $N$  раз измеряются действующие значения гармоник напряжения и вычисляются коэффициенты гармоник от  $n - й$  до 40-й;
- для каждого измерения вычисляется коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$ ;
- $N$  раз вычисляются средние квадратичные за 3 с значения коэффициентов для каждой из  $n$  высших гармоник:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{2(n)}}{U_{1(1)}},$$

где  $S_{U(n)} = K_{u(2)}^2 + K_{u(3)}^2 + \dots + K_{u(40)}^2$ ;  $N \geq 9$ ;

- вычисляется среднеквадратичное значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения:

$$K_U = \sqrt{\frac{S_u}{N}},$$

где  $S_U$  – сумма квадратов  $(K_U)^2$  коэффициентов искажения  $K_U$  за  $N$  наблюдений в течение 3 с.

Нормально допустимые значения коэффициентов гармонических составляющих для сетей различного напряжения приведены в табл.8.2; предельные значения в 1,5 раза выше нормальных.

Таблица 8.2

Нормально допустимые значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения, %

Нечетные гармоники не кратные 3, при $U_{НОМ}$ [кВ]					Нечетные гармоники кратные 3, при $U_{НОМ}$ [кВ]					Четные гармоники при $U_{НОМ}$ [кВ]				
n	0,38	6-20	35	110	n	0,38	6-20	35	110	n	0,38	6-20	35	110
5	5,0	4,0	3,0	1,5	3	5,0	3,0	3,0	1,5	2	2,0	1,5	1,0	0,5
7	5,0	3,0	2,5	1,0	9	1,5	1,0	1,0	0,4	4	1,0	0,7	0,5	0,3
11	3,5	2,0	2,0	1,0	15	0,3	0,3	0,3	0,2	6	0,5	0,3	0,3	0,2
13	3,0	2,0	1,5	0,7	21	0,3	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,3	0,3	0,2
17	2,0	1,5	1,0	0,5	>	0,2	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,3	0,3	0,2
19	1,5	1,0	1,0	0,4						12	0,2	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,0	1,0	0,4						>	0,2	0,2	0,2	0,2
25	1,5	1,0	1,0	0,4										

Примечание. Значения для  $n = 3$  и  $n = 9$  относятся к однофазным электрическим сетям, в трехфазных трехпроводных сетях они принимаются в два раза меньше.

На подстанциях предприятий, имеющих источники высших гармонических напряжений, рекомендуется производить периодический и эпизодический контроль уровней этих составляющих. Периодический контроль проводится не менее двух раз в год для характерных эксплуатационных нагрузок, эпизодический – для режимов максимальных нагрузок.

Основными источниками высших гармоник – нелинейными нагрузками являются: вентильные преобразователи, дуговые сталеплавильные печи, электросварочные установки, газоразрядные лампы. Гармонические искажения действуют длительно, в отличие от таких коротких событий, как провал или импульс напряжения. Гармоники создают перегрев в линиях передач, трансформаторах, дросселях и электродвигателях. 3-я и кратные ей нечетные гармоники, протекающие в нейтрали, могут привести к опасному перегреву проводов и потерям электроэнергии. Попадая в резонанс с емкостью системы, гармоники тока могут создавать в ней опасные перенапряжения. В общем случае для снижения уровня гармоник применяют фильтры. Гармоники тока потребления, возбуждаемые выпрямителями, можно уменьшить применением многофазных (многопульсных) мостов, например, шести- или двенадцатипульсных, использованием широтно-импульсной модуляции или/и включением последовательно в цепь питания дросселя.

### 8.3.1.5. Несимметрия кривой напряжения.

Причиной несимметрии напряжений являются несимметричные режимы электропитания и широкое применение однофазной нагрузки. Различают кратковременные (аварийные) и длительные (эксплуатационные) несимметричные режимы. Кратковременные режимы обычно возникают вследствие аварийных процессов (однофазные КЗ, обрыв провода ЛЭП и т.п.), длительные – при подключении несимметричной нагрузки. Несимметрия, обусловленная элементами электрической сети, называется *продольной*, а вызванная нагрузкой – *поперечной*.

Как известно, любую несимметричную систему векторов **A**, **B**, **C** (токов, напряжений) можно представить в виде геометрической (векторной) суммы трех симметричных систем прямой **A**<sub>1</sub>, **B**<sub>1</sub>, **C**<sub>1</sub>, обратной **A**<sub>2</sub>, **B**<sub>2</sub>, **C**<sub>2</sub> и нулевой **A**<sub>0</sub>, **B**<sub>0</sub>, **C**<sub>0</sub> последовательности. На рис. 6.4, п.6.2.12 показаны такие системы и построение вектора фазы **A** как суммы векторов **A**<sub>1</sub>, **A**<sub>2</sub> и **A**<sub>0</sub>.

Несимметрия трехфазной системы напряжений характеризуется следующими коэффициентами:

- коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} 100\% ;$$

- коэффициентом несимметрии по нулевой последовательности:

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)}}{U_{1(1)}} 100\% ,$$

где  $U_{2(1)}$  – действующее значение междуфазного напряжения обратной последовательности (индекс 2) основной (1-й) гармоники;  $U_{0(1)}$  – действующее значение фаз-

ного напряжения нулевой последовательности (индекс 0) основной гармоники;  $U_{1(1)}$  – действующее значение междуфазного напряжения прямой последовательности (первый индекс 1) основной гармоники.

Допускается принимать  $U_{1(1)} = U_{ном}$  при коэффициенте искажения синусоидальности кривой напряжения не более 5%, где  $U_{ном}$  – номинальное значение междуфазного напряжения.

Для определения усредненного значения  $K_{2U}$  вычисляется его среднеквадратичное значение из  $N$  наблюдений на 3- секундном интервале времени:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{S_{2u}}{N}},$$

где  $S_{2U}$  – сумма  $N$  значений  $K_{0U}^2$ .

Определение коэффициентов  $K_{0U}$  производится аналогично:

$$K_{0U} = \sqrt{\frac{S_{0U}}{N}},$$

где  $S_{0U}$  – сумма  $N$  значений  $K_{0U}^2$ ; при этом  $N \geq 9$ .

Нормально допустимое и предельно допустимое значения коэффициента несимметрии равны соответственно 2,0 и 4% :

– по обратной последовательности в точках общего присоединения к электрическим сетям;

– по нулевой последовательности в точках общего присоединения к четырехпроводным электрическим сетям с номинальным напряжением 0,38 кВ.

Для оценки действующих значений междуфазного напряжения обратной последовательности  $U_{2(1)}$  и фазного напряжения нулевой последовательности  $U_{0(1)}$  в каждом наблюдении за период времени 24 ч, измеряют одновременно действующие значения междуфазных и фазных напряжений по основной частоте, а значения указанных напряжений получают расчетным путем. Однако точная расчетная формула чрезвычайно громоздка и для инженерных целей практически непригодна. С незначительной (<0,1%) погрешностью можно принять

$$U_{1(1)} = \frac{1}{3} (U_{AB(1)} + U_{BC(1)} + U_{CA(1)});$$

$$U_{2(1)} = 0,62 (U_{нб(1)} - U_{нм(1)});$$

$$U_{0(1)} = 0,62 (U_{нб.ф(1)} - U_{нм.ф(1)}),$$

где  $U_{нб(1)}$  и  $U_{нм(1)}$  – наибольшие и наименьшие действующие значения междуфазных напряжений основной частоты в каждом данном наблюдении;  $U_{нб.ф(1)}$ ,  $U_{нм.ф(1)}$  – то же , фазных напряжений.

Качество электрической энергии по коэффициенту  $K_{2U}$  считают соответствующим требованиям стандарта, если наибольшее из всех измеренных в течение 24 ч его значений не превышает предельно допустимого, а значение этого коэффициента, соответствующее вероятности 95% за установленный период, не превышает нормально

допустимого. То же относится к коэффициенту  $K_{OU}$ . При этом суммарная продолжительность выхода этих коэффициентов за нормально допустимые значения должна быть не более 5% установленного времени, т.е. 1 ч 12 мин, а выход за предельные значения считается нарушением стандарта.

#### **8.3.1.6. Отклонение частоты**

Частота напряжения сети уменьшается, когда активная мощность нагрузки превышает мощность генерирующих источников питания, и возрастает при избытке генерируемой мощности. Стандартом установлены значения нормально допустимого и предельно допустимого отклонения частоты от номинальной (50 Гц)  $\pm 0,2$  и  $\pm 0,4$  Гц соответственно.

Отклонение частоты вычисляется по выражению

$$\Delta f = f - f_{\text{ном}},$$

где  $f_{\text{ном}}$  – номинальное значение частоты, Гц;

$f$  – усредненное значение частоты, Гц.

Усредненное значение  $f$  получают как среднее из  $N \geq 15$  наблюдений на интервале времени 20 с.

Качество электрической энергии считается соответствующим стандарту, если все измеренные в течение 24 ч значения  $\Delta f$  не превышают предельно допустимых, а 95% не выходят за пределы нормально допустимых значений, причем суммарная продолжительность времени выхода за эти пределы составляет не более 5% от установленного периода времени, т.е. 1 ч 12 мин.

#### **8.3.1.7. Провалы напряжения**

Провал напряжения – это кратковременное значительное снижение напряжения сети с последующим его восстановлением. Такой эффект может возникать при КЗ и пиковых перегрузках сети, при пуске крупных электродвигателей. Провалы напряжения оказывают негативное влияние на работу различных электроприемников: они могут вызывать колебания частоты вращения или остановку электродвигателей, сбой или отказ в работе цифровой аппаратуры и информационных систем, отключение электромагнитных аппаратов. В сетях с глухозаземленной нейтралью вредное воздействие провалов напряжения в одной из фаз усугубляется скачком напряжения в других фазах.

Провал напряжения характеризуется глубиной (от 10 до 100%) и длительностью, допустимое значение которой для сетей напряжением до 20 кВ включительно равно 30 с. При измерении строят огибающую среднеквадратичных значений напряжения и фиксируют начальный момент времени  $t_n$  резкого спада (длительностью менее 10 мс) этой кривой ниже уровня  $0,9 U_{\text{ном}}$  и конечный момент  $t_k$  восстановления напряжения до  $0,9 U_{\text{ном}}$ . Длительность провала напряжения  $\Delta t_n$  определяют как разность

$$\Delta t_n = t_k - t_n.$$

Качество электрической энергии считают соответствующим требованиям стандарта, если наибольшее из всех измеренных в течение года значений  $\Delta t_n$  не превышает предельно допустимого значения.

Глубину провала напряжения  $\beta U_{\text{п}}$  вычисляют как разность

$$\beta U_{\text{п}} = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%,$$

где  $U_{\text{min}}$  – минимальное из всех измеренных среднеквадратичных значений напряжения во время провала напряжения.

Согласно статистике длительность провалов напряжения в крупных городских кабельных электрических сетях лежит в диапазоне 3..30 с, от 70 до 80% количества провалов напряжения вызвано повреждениями в сетях 6 – 10 кВ.

Для защиты от вредного влияния провалов напряжения применяют компенсаторы напряжения, источники бесперебойного питания. Компенсаторы не содержат накопителей энергии и используются для добавления напряжения при кратковременных провалах напряжения. Источники бесперебойного питания (ИБП) включают аккумуляторную батарею, преобразователь постоянного напряжения в переменное и выпрямитель для заряда аккумуляторной батареи. ИБП может работать при глубоких провалах напряжения в течение времени, ограниченного емкостью батареи, обычно до нескольких минут; мощность ИБП – до нескольких сотен кВт·А. Активные регуляторы напряжения осуществляют непрерывное регулирование напряжения. Они содержат вольтдобавочный трансформатор с силовой электроникой, управляемой высокоскоростным процессором, и не требуют накопителя энергии. Применяются также конденсаторные накопители и стабилизаторы напряжения.

### **8.3.1.8. Импульс напряжения.**

В электроустановках различают импульсы внешнего (разряд молнии) и внутреннего (коммутация цепей тока, разряд статического электричества) происхождения. Наиболее часто возникают коммутационные перенапряжения вследствие разрыва тока в цепи с индуктивностью. Наибольшую амплитуду имеют грозовые перенапряжения, достигающие на ВЛ нескольких миллионов вольт. По мере распространения по сети они затухают и во внутренней проводке зданий и сооружений обычно не превышают 6 кВ. Амплитуда импульсов коммутационных перенапряжений в сетях 0,4 кВ достигает 4,5 кВ.

Поступая на зажимы электроприемников, импульсы перенапряжения могут вызвать их повреждение или сбой в работе. Чем круче передний фронт импульса, тем выше его способность проникновения во внутренние цепи электроприемников. Особую опасность импульсы высокого напряжения представляют для электронной аппаратуры и цифровых систем управления. Снижение этой опасности достигается применением специальных устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП), фильтров помех, экранированием проводов и надлежащим выполнением заземления. В состав УЗИП входят разрядники и варисторы (нелинейные сопротивления), шунтирующие защищаемый элемент сети при возникновении импульса перенапряжения.

За амплитуду импульса напряжения принимают наибольшее значение напряжения при резком его изменении (длительность фронта импульса не более 5 мс). Длительность импульса напряжения определяют как его ширину на уровне 0,5 амплитуды ( $\Delta t_{\text{имп } 0,5}$ ).

### 8.3.1.9. Временное перенапряжение.

Временным перенапряжением считается превышение амплитудных значений напряжения  $\sqrt{2} U_{\text{ном}}$  более чем на 10% за время более 40 мс, позволяющее отстроиться от коммутационных импульсов. Этот параметр характеризуется коэффициентом временного перенапряжения

$$K_{\text{пер}U} = \frac{U_{a \text{ max}}}{\sqrt{2} U_{\text{ном}}},$$

где  $U_{a \text{ max}}$  – максимальное амплитудное значение напряжения из ряда зафиксированных значений  $U_a > 1,1 \sqrt{2} U_{\text{ном}}$ . Средние значения коэффициента временного перенапряжения  $K_{\text{пер}U}$  в зависимости от длительности  $\Delta t_{\text{пер}U}$  перенапряжения приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Значения коэффициента и длительности временного перенапряжения

Длительность перенапряжения $\Delta t_{\text{пер}U}$ , с	До 1	До 20	До 60
Коэффициент $K_{\text{пер}U}$ . Относительных единиц	1,47	1,31	1,15

В сетях 0,4 кВ в среднем за год может возникнуть до 30 временных перенапряжений, чаще всего как следствие обрыва нулевого провода, когда фазное напряжение может достигать линейного.

Для расчета коэффициента перенапряжения фиксируют амплитудные значения напряжения  $U_a$  в каждом полупериоде при резком превышении уровня  $1,1 \sqrt{2} U_{\text{ном}}$  и через 40 мс после превышения уровня  $1,1 U_{\text{ном}}$  определяют максимальное из измененных амплитудных значений  $U_{a \text{ max}}$ . Длительность перенапряжения определяют как разность

$$\Delta t_{\text{пер}U} = t_{\text{к пер}} - t_{\text{н пер}},$$

где  $t_{\text{н пер}}$  и  $t_{\text{к пер}}$  – соответственно моменты времени превышения действующим значением напряжения  $U$  уровня  $1,1 U_{\text{ном}}$  и спада его до этого уровня.

### 8.3.2. Пункты контроля качества электроэнергии.

Контроль КЭ проводится в соответствии с ГОСТ Р 53333-2008.

#### 8.3.2.1. Выбор пунктов контроля (ПК) электроэнергии.

ПК, передаваемые потребителям.

*ПК установившегося отклонения напряжения.* Нормы на  $\delta U_y$  установлены на выводах электроприемников. В других точках сети нормально допускаемые и предельно допускаемые значения  $\delta U_y$  должны быть установлены в договорах с учетом норм на выводах электроприемника.

При выборе ПК для измерений  $\delta U_y$  используют расчеты, сведения о нагрузке распределительных трансформаторов, результаты измерений на шинах 0,4 кВ ТП и др.

*Пункты контроля коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициента несимметрии напряжений обратной последовательности.* В качестве ПК для измерений  $K_U$  и  $K_{2U}$  выбирают точку общего присоединения (ТОП) (ближайшую к потребителю точку питающей сети) с потребителями, являющимися источниками ухудшения КЭ (далее – искажающие потребители). Дополнительно рассматривают целесообразность контроля в ближайших ТОП, а также в точках со статическими компенсаторами.

*Пункты контроля коэффициента несимметрии напряжений нулевой последовательности.* В качестве ПК для измерений  $K_{0U}$  выбирают шины 0,4 кВ на ТП 6 – 35 /0,4 кВ, а также шины трехфазного ВРУ жилого здания. Выбор осуществляют с учетом результатов измерений в периоды наибольших и наименьших годовых нагрузок, в первую очередь в точках с наибольшей несимметрией фазных токов и напряжений.

*Пункты контроля отклонения частоты и длительности провала напряжения.* В качестве ПК для измерения  $\Delta f$  и  $\Delta f_{\text{п}}$  выбирают любой удобный для контроля пункт сети.

*Пункты контроля колебаний напряжения.* Для контроля выбирают ТОП искажающих и неискажающих потребителей электроэнергии (шины 6 – 35 или 0,4 кВ)

#### **8.3.2.2. Пункты контроля при рассмотрении жалоб КЭ.**

В качестве ПК выбирают точку коммерческого контроля КЭ с потребителем, заявившим претензию. Дополнительно могут быть выбраны ближайшая ТОП, ближайшая точка к источнику ухудшения КЭ или точка сети более высокого класса напряжения.

#### **8.3.2.3. ПК КЭ для проведения внеочередного контроля.**

Выбирают ТОП с данным потребителем, дополнительно – точку, приближенную к этому ТП.

#### **8.3.2.4. ПК КЭ в сетях потребителя.**

*ПК качества закупаемой энергии.* Выбирают пункт на границе раздела балансовой принадлежности или ближайший к ней.

*ПК установившегося отклонения напряжения.* Выбирают выводы характерных электроприемников потребителя, ближайшего к границе раздела и наиболее удаленного от нее.

*ПК коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициента несимметрии напряжений обратной последовательности.* Для измерений  $K_U$  и  $K_{2U}$  выбирают ТОП, к которым присоединены нелинейные и несимметричные электроприемники.

*ПК коэффициента несимметрии напряжений нулевой последовательности.* Для измерений  $K_{0U}$  выбирают шины 0,4 кВ ТП, к которым присоединены трехфазные нагрузки.

### **8.3.3. Проведение испытаний.**

К испытаниям допускаются лица с высшим или средним образованием, имеющие квалификационную группу по ЭБ не ниже III (в обоснованных случаях IV) и надлежащую подготовку к проведению контроля КЭ.

3.1. Перед проведением испытаний в сетях выше 1000 В следует определить данные по трансформатору напряжения и его вторичным цепям.

Перед началом испытаний следует:

- определить условия применения СИ в данном ПК;
- подготовить СИ к работе;
- принять меры для исключения влияния помех;
- проверить чередование фаз проверяемой сети;
- убедиться, что собранная схема пригодна для контроля параметров КЭ.

Условия испытаний контролируют не менее одного раза в сутки. Общее время перерывов в измерениях не должно превышать 5 мин за 1 сут. Соответствие КЭ установленным требованиям проверяют по результатам контроля за каждые 24 ч в отдельности.

При обработке результатов за каждые 24 ч должны быть выявлены наибольшие значения коэффициентов  $K_U$ ,  $K_{U(n)}$ ,  $K_{2U}$ ,  $K_{0U}$  и наибольших и наименьших, а также верхних и нижних значений  $\delta U_y$  и  $\Delta f$  (верхнее и нижнее значения – границы диапазона, в котором находятся 95% измеренных за 24 ч значений параметра). Результаты испытаний оформляются протоколом (см. ГОСТ Р 53333-2008, Приложение В).

### **8.3.4. Приборы для измерения показателей качества электрической энергии.**

#### ***8.3.4.1. Анализатор качества электроэнергии АКЭ-823(4).***

Прибор позволяет осуществить следующие операции.

- Визуализацию в реальном времени числовых значений параметров электрической сети.
- Гармонический анализ напряжений и токов, регистрацию аномалий напряжения (отклонение, размах и провал напряжения, временное и импульсное перенапряжение).
- Измерение дозы фликера.
- Измерение коэффициента несимметрии по обратной и нулевой последовательности.
- Детектирование и анализ импульсов напряжения.
- Запись результатов в энергонезависимую память.

Однако проанализировать записанные данные можно только путем их передачи в компьютер. Отсутствие возможности быстрой автоматической обработки ряда данных существенно затрудняет практическое использование прибора.

#### ***8.3.4.2. Измеритель показателей качества электрической энергии ЭРИС-КЭ.03.***

Прибор предназначен для измерения и регистрации показателей качества и вспомогательных характеристик электрической энергии (табл.8.4), установленных ГОСТ Р 13109-97, в том числе:

- отклонение частоты;
- отклонение напряжения;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения;
- коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности;

- коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности;
- длительность провала напряжения;
- импульсное напряжение;
- коэффициент временного перенапряжения;
- доза фликера.

Первые шесть ПКЭ проверяются на суммарную продолжительность выхода их значений за допустимые пределы в течение 24 ч, остальные – на соответствие требованиям ГОСТ для каждого из них.

Дополнительно предусмотрены следующие возможности:

- режим цифрового осциллографа, предназначенный для фиксации мгновенных значений токов и напряжений, когда действующее значение напряжения выходит за допустимые пределы;
- режим регистрации действующих значений напряжений и токов основной частоты при выходе их за пороговые значения, каждый период на интервале до 60 с;
- режим регистрации минутных значений токов, напряжений и мощностей основной частоты в течение последних 34 суток;
- режим измерения электрической энергии.

Таблица 8.4

Основные метрологические характеристики (в сокращении)

№	Наименование измеряемой величины	Размерность	Диапазон измерения	Интервал усреднения	
1	Установившееся отклонение напряжения $\delta U_V$	%	-20...+20	60 с	
2	Размах изменения напряжения $\delta U_t$	%	0,25...10	-	
3	Доза фликера $P_t$	Отн. ед.	0,25...10	-	
4	Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения $K_U$	%	0,1...15	3 с	
5	Коэффициент n – й гармонической составляющей напряжения для n от 2 до 40 $K_{U(n)}$	%	0,10 (n<16) 0,5 (n<30) 0,2 (n≥30)	3 с	
6	Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2U}$	%	0,1...15	3 с	
7	Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{0U}$	%		3 с	
8	Отклонение частоты $\Delta f$	Гц	-3...+3	20 с	
9	Амплитуда импульса напряжения $U_{имп}$	грозовой	кВ	1...6	3 с
		коммутацион.	кВ	1...4,5	3 с
10	Длительность	грозовой	мс	5...50	3 с

	импульса $\Delta t_{\text{имп}}$	коммутацион.	мкс	50...2000	3 с
11	Коэффициент временного перенапряжения $K_{\text{пер}}U$		Отн. ед.	1...1,2	3 с
12	Длительность временного перенапряжения $\Delta t_{\text{пер}}$		с	0,01...60	3 с
13	Глубина провала напряжения $\delta U_{\text{п}}$		%	10...90	3 с
14	Длительность провала напряжения $\Delta t_{\text{п}}$		с	0,01...60	3 с

Управление измерителем осуществляется с помощью встроенной 16- клавишной клавиатуры.

Архивные данные цифрового осциллографа (токи, напряжения, мощности) и все измеряемые параметры, указанные в таблице, записываются пользователем на USB-диск (флеш-память).

Измеритель состоит из аналоговой и цифровой части. Измеряемые напряжения и токи поступают на аналоговые входы, обрабатываются и подаются на входы аналого-цифрового преобразователя, где они оцифровываются из расчета 256 выборок 12-разрядного кода на период основной частоты. Коды оцифрованных сигналов поступают на цифровую часть измерителя и обрабатываются в соответствии с программами, хранимыми в ПЗУ.

Измерения гармонических составляющих и коэффициентов искажения синусоидальности производятся непрерывно на интервале 8 периодов основной частоты. Конечные значения измеренных характеристик заносятся в память и отображаются на дисплее и мониторе РС.

## Литература

1. Правила устройства электроустановок. 6-е изд. Разделы I,II,III,IV,V,VII. СПб.: ДЕАН, 2004.
2. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. Разделы I,II,IV,VI,VII. СПб.: ДЕАН,2004.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – СПб.: ЦОТПБСП, 2003.
4. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – СПб.: Издательство «ДЕАН», 2000.
5. Сборник правил и инструкций, применяемых при эксплуатации электроустановок потребителей / Госэнергонадзор. М.: АОЗТ «Энергосервис», 1995.
6. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. – СПб.: Издательство ДЕАН, 2001.
7. Объём и нормы испытаний электрооборудования / Под общей редакцией Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. – 6-е изд. – М.: НЦ ЭНАС, 1998.
8. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования / АО «Фирма ОРГРЭС» под редакцией Ф.Л. Когана. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2001.
9. Техническое обслуживание релейной защиты и автоматики электростанций и электрических сетей / Под ред. Б.А. Алексеева. – Ч. 1,2,3,4. – М.: Изд – во НЦ ЭНАС, 2000,2001.
10. Применение и техническое обслуживание микропроцессорных устройств на электростанциях и в электросетях. – Ч. 1,2,3,4 / Под ред. Б.А. Алексеева. – М.: Изд – во НЦ ЭНАС, 2001, 2002.
11. Техническое обслуживание измерительных трансформаторов тока и напряжения / Под ред. Б.А. Алексеева. – М.: Изд – во НЦ ЭНАС, 2002.
12. Сборник правил и инструкций, применяемых при эксплуатации электроустановок потребителей / Госэнергонадзор. – М.: АОЗТ «Энергосервис», 1995.
13. Справочник по наладке электрооборудования промышленных предприятий / Под ред. М.Г. Зименкова, Г.В. Розенберга, Е.М. Феськова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
14. Справочник по наладке электроустановок и электроавтоматики / Е.И. Заборицкий, Б.А. Холодовский, А.И. Митченко. – 3-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1985.
15. Справочник по наладке электрооборудования электростанций и подстанций / Под ред. Э.С. Мусаэляна. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
16. Справочник по наладке вторичных цепей электростанций и подстанций/ Под ред. Э.С. Мусаэляна. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатом издат, 1989.

17. Беркович М.А. и Семёнов В.А. Основы техники и эксплуатации релейной защиты. Изд. 5-е, дополненное и переработанное. М., «Энергия», 1971.
18. Вишневецкий Л.М., Левин Л.Г. Я – электроналадчик. – М.: Энергоатомиздат, 1987 (Б – ка электромонтёра).
19. Дубинский Г.Н., Левин Л.Г. Наладка устройств электроснабжения напряжением до 1000 В. –М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011.- 400 с.:ил.
20. Электрическая часть станций подстанций: Учеб. для вузов / Под ред. А.А. Васильева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
21. Чернобровов Н.В. Релейная защита. Учебное пособие для техникумов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1971.
22. Гельфанд Я.С. Релейная защита распределительных сетей. – 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Энергоатомиздат, 1987.
23. Кривенков В.В., Новелла В.Н. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981.
24. Постников Н.П., Рубашов Г.М. Электроснабжение промышленных предприятий: Учеб. для техникумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1989.
25. Соловьев А.Л., Шабад М.А. Релейная защита городских электрических сетей 6 и 10 кВ.- СПб.: Политехника, 2007.-175 с.: ил.
26. Куско, Александр. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии/Куско, А.,Томпсон. -М.: Додэка-XXI, 2011.-336 с.: ил.
27. Михеев Г.М. Цифровая диагностика высоковольтного электрооборудования. – М.: Додэка-XXI, 2008.-304 с.: ил.
28. Основы метрологии и электрических измерений: Учебник для вузов / Под ред. Е.М. Душина. 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат Ленингр. отд-ние, 1987.
29. Панфилов В.А. Электрические измерения: Учебник для сред. проф. образ.- М.: Издательский центр «Академия», 2004.-288 с.
30. Дракселл Р. Основы электроизмерительной техники / Пер.с нем. Под ред. В.Ю. Кончаловского. – М.: Энергоиздат, 1982.

## Список основных сокращений

АВР – автоматическое включение резерва  
АКБ – аккумуляторная батарея  
АПВ – автоматическое повторное включение  
АЦП – аналого-цифровой преобразователь  
БНТ – быстронасыщающийся трансформатор  
БПН – блок напряжения питания  
БПТ – блок тока питания  
БТН – бросок тока намагничивания  
ВАХ – вольт- амперная характеристика  
ВЛ – воздушная линия электропередачи  
ВН – высшее (высокое) напряжение  
ДЗ – дифференциальная защита  
ДГР – дугогасящий реактор (катушка)  
ЗУ – запоминающее устройство  
ИБП – источник бесперебойного питания  
ИМС – интегральная микросхема  
КБ – конденсаторная батарея  
КЗ – короткое замыкание  
КЛ – кабельная линия электропередачи  
КРУ – комплектное распределительное устройство  
КТП – комплектная трансформаторная подстанция  
ЛАТР – лабораторный автотрансформатор тока  
ЛЭП – линия электропередачи  
МДС – магнитодвижущая сила  
МОП – полевой транзистор (металл-окисел-полупроводник)  
МП – место повреждения  
МТЗ – максимальная токовая защита  
МЭК – Международная Электротехническая комиссия  
НН – низшее (низкое) напряжение  
ОЗЗ – однофазное замыкание на землю  
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство  
ОКЗ – отношение короткого замыкания  
ОМП – определение места повреждения  
ОПН – ограничитель перенапряжения  
ОПЧ – открытая проводящая часть  
ПАР – параметры аварийного режима  
ПЗУ – постоянное запоминающее устройство  
ПК – пункт контроля качества электроэнергии  
ПКЭ – показатели качества электрической энергии  
ПНТ – промежуточный насыщающийся трансформатор

ПТЭЭП – правила технической эксплуатации электроустановок потребителей  
ПУЭ – правила устройства электроустановок  
РЗ – релейная защита  
РЗиА – релейная защита и автоматика  
РС – персональный компьютер (ПК)  
РПН – переключатель ответвлений трансформатора под нагрузкой  
РУ – распределительное устройство  
СИ – средства измерений  
СН – среднее напряжение  
СПЧ – сторонняя проводящая часть  
ТА – трансформатор тока (ТТ)  
ТКЗ – трехфазное короткое замыкание  
ТНП – трансформатор тока нулевой последовательности  
ТОП – точка общего присоединения  
ТВ – трансформатор напряжения (ТН)  
ХХ – холостой ход  
ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь  
ЭД – электродвигатель  
ЭЛТ – электронно-лучевая трубка

---

Дубинский Генрих Нейманович, Левин Лев Григорьевич

## Наладка устройств электроснабжения выше 1000 В

Издание 2-е, переработанное и дополненное

Ответственный за выпуск: **В. Митин**

Обложка: **СОЛОН-Пресс**

**ООО «СОЛОН-Пресс»**

123001, г. Москва, а/я 82

Телефоны: (495) 617-39-64, (495) 617-39-65

E-mail: [avtor@solon-press.ru](mailto:avtor@solon-press.ru)

По вопросам приобретения обращаться:

**ООО «ПЛАНЕТА АЛЬЯНС»**

Тел: (499) 782-38-89, [www.aliants-kniga.ru](http://www.aliants-kniga.ru)

**ООО «СОЛОН-Пресс»**

115142, г. Москва, Кавказский бульвар, д. 50

Формат 60×88/16. Объем 33,625 п. л. Тираж 100 экз.

Заказ №