

SCAN

DJVD

biblem

elektromonter

А.М. Александров

**ВЫБОР УСТАВОК
СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТ
АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
НАПРЯЖЕНИЕМ
ВЫШЕ 1 кВ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ
ЭНЕРГЕТИК**

План публикаций “Библиотечки электротехника”

Тема выпуска 3 “Библиотечки электротехника” (ноябрь 1998 г.) — устройства для определения расстояний до места повреждения на линиях электропередачи.

В первой половине 1999 г. редакционный совет приложения к журналу “Энергетик” планирует опубликовать следующие выпуски.

1. **Шмурьев В.Я.** Цифровые реле защиты.
2. **Пуляев В.И.** Регистраторы аварийных событий.
3. **Ишкин В.Х.** Волоконно-оптические системы связи.

Уважаемые читатели!

**Приглашаем вас, москвичей и гостей столицы,
побывать в редакции
и приобрести вышедшие номера “Энергетика”
и выпуски “Библиотечки электротехника”
по минимальной (отпускной) цене изданий.
Мы оформим вам и выгодную подписку
на журнал и приложение.**

НАШ АДРЕС:

109280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23.

Телефон (095) 275-19-06.

Библиотечка электротехника

— приложение к журналу *“Энергетик”*

В ы п у с к 2

А.М. Александров

**ВЫБОР УСТАВОК
СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТ
АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
НАПРЯЖЕНИЕМ
ВЫШЕ 1 кВ**

Москва

НТФ “Энергопрогресс”, “Энергетик”

1998

Главный редактор журнала “Энергетик” А.Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

“Библиотечки электротехника”

В.А. Семенов (*председатель*), И.И. Батюк (*зам. председателя*),
Б.А. Алексеев, К.М. Антипов, Г.А. Безчастнов, А.Н. Жулев, В.А. Забегалов,
В.Х. Ишкин, Ф.Л. Коган, В.И. Кочкарев, Н.В. Лисицын, Л.Г. Мамиконянц,
Л.Ф. Плетнев, В.И. Пуляев, Ю.В. Усачев, М.А. Шабал

Александров А.М.

А46 Выбор уставок срабатывания защит асинхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ. — М.: НТФ “Энергопрогресс”, 1998. — 56 с.: ил. (Библиотечка электротехника, приложение к журналу “Энергетик”; Вып. 2).

Рассмотрены методы выбора уставок срабатывания защит асинхронных электродвигателей и приведены примеры выбора уставок защит, составленных из отдельных реле и реле, входящих в состав комплексного устройства защит серии ЯРЭ 2201 и цифрового устройства защиты электродвигателя типа SPAM 150C (SPAC 802). В приложении приведены основные характеристики блока РЗ электродвигателей типа SPAM 150C.

Предисловие

Для защиты асинхронных электродвигателей (АД) традиционно применяются относительно простые защиты (РЗ), такие, как максимальные токовые и дифференциальные защиты, однако выбор уставок срабатывания этих защит применительно к АД имеет свои особенности. Назначение этой работы состоит в том, чтобы наряду с известными правилами выбора уставок максимальных и дифференциальных токовых защит обратить внимание на особенности их выбора для электродвигателей. Кроме того, здесь приведены рекомендации по выбору уставок специфических защит электродвигателей: от тепловой и токовой перегрузки, от нарушения режима пуска, от несимметрии поданного из сети напряжения. Эти защиты часто называют профилактическими, поскольку их задача не допускать такие опасные режимы работы электродвигателя, которые приводят к его повреждению. Реализация этих защит стала возможной благодаря использованию полупроводниковых аналоговых устройств и, особенно, микропроцессорных (цифровых) многофункциональных устройств (например, ЯРЭ 2201, SPAM, SPAC 802).

Ограниченный объем брошюры не позволяет последовательно и в полном объеме рассмотреть все вопросы выбора уставок релейной защиты: от расчета токов КЗ до проверки погрешностей трансформаторов тока. По этим вопросам рекомендуем воспользоваться книгами, указанными в списке литературы.

Аппаратное выполнение РЗ АД весьма разнообразно: от сборных защит на электромеханических реле (серий РТ-40, РТ-80, РТН-565, ДЗТ-11, РВ-100, РП-220, РП-251) и на микроэлектронных реле (серий РСТ-13, РСТ-15, РТЗ-51, РВ-01, РП-16, РП-18) до специальных комплексных устройств типа ЯРЭ 2201 и

микропроцессорных цифровых защит.

Цифровые устройства наряду с общеизвестными их достоинствами более полно приспособлены к условиям работы АД. В настоящее время наиболее известны микропроцессорные защиты фирмы АBB (Финляндия) серии SPAM 150С и русифицированный вариант этой защиты, выпущенный СП "АББ Реле—Чебоксары", серии SPAC 802. Защита серии SPAM 150С разработана для зарубежных АД, параметры которых, в частности фирмы Brown Boveri, близки к параметрам отечественных АД. Поэтому защиты SPAM 150С и их аналог SPAC 802 применимы для РЗ отечественных АД. Так как опыт эксплуатации микропроцессорных защит еще недостаточен, приводимую методику выбора уставок следует считать рекомендательной и она должна быть уточнена по мере накопления опыта. В связи с тем, что на многих предприятиях отсутствует информация на защиту SPAM 150С, в приложении приведены основные технические данные защиты, а при выборе уставок даны краткие пояснения принципов выполнения защит.

Для расчета уставок защит АД существуют компьютерные программы, в том числе имеется соответствующая программа на кафедре РЗА ПЭИик. Однако и тем специалистам, которые используют компьютерные программы, и в особенности тем, кто производит расчеты вручную, эта брошюра безусловно окажется полезной и поможет продлить срок службы многих электродвигателей за счет небольших затрат на усовершенствование их релейной защиты.

Замечания и пожелания по данной брошюре просьба направлять по адресу: 109280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23. Редакция журнала "Энергетик".

1. Виды повреждений и ненормальных режимов работы асинхронных электродвигателей и требования ПУЭ к выполнению релейной защиты

Опыт эксплуатации АД показывает их высокую повреждаемость, которая ежегодно достигает 25—30 % общего числа повреждений электрооборудования. Основными неисправностями АД являются электрические повреждения. Наиболее часто, 80—95 % случаев повреждается обмотка статора, причем около 70 % приходится на пазовую и лобовую части обмотки, а остальные 25—30 % составляют перекрытия в коробках выводов.

1.1. ЗАЩИТА ОТ МНОГОФАЗНЫХ И ВИТКОВЫХ КЗ В ОБМОТКЕ СТАТОРА

Многофазные и витковые повреждения происходят довольно редко и, как правило, являются результатом развития замыкания на корпус, из-за местных перегревов изоляции, дефектов активной стали статора. Двойные замыкания возникают при уже имеющемся замыкании на землю в сети, при этом второй пробой чаще происходит в коробке выводов или на первых витках обмотки. Многофазные короткие замыкания (КЗ) могут быть на выводах обмотки статора или внутри АД. Опасность внутренних повреждений заключается прежде

всего в том, что токи, протекающие в месте повреждения, могут многократно превышать токи в обмотке статора при повреждении на линейных выводах. Мощная дуга, возникающая в месте КЗ, приводит к пожару в АД, уничтожающему значительную часть обмотки. Многофазные КЗ, происходящие вблизи линейных выводов статорной обмотки, вызывают резкое снижение напряжения на зажимах всех АД, питающихся от тех же шин, и могут вызвать значительные динамические воздействия на обмотки статоров неповрежденных электрических машин.

Расчет токов многофазных КЗ на линейных выводах АД не представляет трудности. Определение токов внутренних КЗ значительно сложнее, так как внутри машины образуются несколько контуров, электрически и магнитно связанных друг с другом. Поэтому в условиях эксплуатации чувствительность РЗ от многофазных КЗ определяется при повреждениях на линейных выводах АД [2] и коэффициент чувствительности должен быть, как для основной РЗ, больше двух при минимально возможном токе двухфазного КЗ.

В соответствии с ПУЭ [2] для защиты АД от многофазных КЗ в тех случаях, когда не применяются предохранители, должна предусматриваться токовая отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах, с реле прямого или косвенного действия, выполненная: для АД мощностью менее 2000 кВт в виде токовой однорелейной отсечки, включенной на разность токов двух фаз, для АД мощностью от 2000 до 5000 кВт в виде двухрелейной отсечки при условии, что на этих АД установлена защита от однофазных или двойных замыканий на землю с действием на отключение.

При отсутствии защиты от замыканий на землю или защиты от двойных замыканий на землю токовая отсечка должна выполняться трехрелейной с тремя трансформаторами тока (ТТ).

Предусмотренное в ПУЭ выполнение отсечки в виде однорелейной схемы вряд ли целесообразно, так как экономия одного реле приводит к увеличению тока срабатывания, а следовательно, к заглублению РЗ в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с двухрелейной схемой, поэтому токовую отсечку и для АД мощностью менее 2000 кВт следует выполнять в виде двухрелейной схемы.

Для АД мощностью 5000 кВт и более, а также для АД мощностью менее 5000 кВт, если установка токовых отсечек не обеспечивает выполнения требуемой чувствительности и выведены нулевые выводы, должна предусматриваться продольная дифференциальная защита в двухфазном исполнении при наличии РЗ от за-

мыкания на землю или в трехфазном исполнении с тремя ТТ при невозможности установки РЗ от замыкания на землю.

Для блоков трансформатор—электродвигатель должна предусматриваться общая РЗ от многофазных КЗ: для АД до 2000 кВт — токовая отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах и с учетом уменьшения пусковых токов за счет сопротивления трансформатора. При схеме соединений обмоток силового трансформатора звезда—треугольник отсечка выполняется из трех токовых реле: двух, включенных на фазные токи, и одного, включенного на сумму этих токов. В этом случае чувствительность РЗ следует проверять при трехфазном КЗ. При невозможности установки трех реле допускается схема с двумя реле, включенными на соединенные треугольником вторичные обмотки трех ТТ, в этом случае чувствительность отсечки определяется при двухфазном КЗ на линейных выводах АД.

Для АД мощностью от 2000 до 5000 кВт, а также 2000 кВт и менее, если токовая отсечка не удовлетворяет требованиям чувствительности, устанавливается дифференциальная отсечка в двухрелейном исполнении, отстроенная от бросков тока намагничивания силового трансформатора.

Для АД мощностью более 5000 кВт, а также АД меньшей мощностью, если установка отсечек не удовлетворяет требованиям чувствительности, применяется продольная дифференциаль-

ная токовая защита в двухрелейном исполнении.

Коэффициенты чувствительности дифференциальных защит и дифференциальных отсеков определяются при КЗ на линейных выводах АД и должны быть не менее двух в минимальных условиях работы сети и с учетом увеличенного сопротивления силового трансформатора при работе регулятора напряжения РПН.

Выбор тока срабатывания дифференциальной РЗ блока трансформатор—двигатель в настоящей работе не приводится, так как расчет не отличается от выбора уставок дифференциальной РЗ трансформатора, при этом в качестве расчетного тока для определения тока небаланса следует принимать пусковой ток АД с учетом сопротивления силового трансформатора для реально возможного положения РПН, при котором сопротивление трансформатора будет наименьшим. Сопротивление АД в режиме пуска в относительных единицах (за базисные величины взяты номинальные параметры АД) следует определять по формуле:

$$X_{АД}^* = \frac{1}{k_{\text{пуск}}}, \quad (1.1)$$

где $k_{\text{пуск}}$ — кратность пускового тока АД при подаче на выводы АД напряжения равного номинальному (приводится в каталогах или в информации завода-изготовителя).

1.2. ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ОБМОТКЕ СТАТОРА

Повреждаемость АД в 84 % происходит из-за пробоя изоляции при перенапряжениях, связанных с операциями включе-

ния—отключения АД или при замыканиях на землю в сети. Большинство повреждений изоляции обмотки статора приводит к замыканию фазы на корпус и, как правило, через электрическую дугу.

Значение опасного для АД тока замыкания на корпус определяют по объему повреждения активной стали статора и возможности устранения его простыми средствами. В мировой практике не существует единого мнения о конкретном значении опасного тока замыкания. В России до сих пор принято считать опасным ток больший 5 А. Этот критерий был установлен еще в довоенные годы, хотя проведенные в последние десятилетия исследования показали, что токи замыкания в 1—1,5 А могут привести к значительным местным нагревам с последующим переходом однофазного замыкания в витковое. В то же самое время было показано, что замыкания на корпус через дугу с токами, не превышающими 10 А, могут самоустраниться в течение первых 0,2 с.

Принимая во внимание большое количество АД малой мощности, ПУЭ [2] предлагают для АД мощностью до 2000 кВт и при отсутствии компенсации устанавливать защиту от однофазных замыканий на землю только при токах замыкания 10 А и более, а при наличии компенсации — если остаточный ток в нормальных условиях превышает это значение.

Для АД мощностью более 2000 кВт РЗ от замыкания на землю должна предусматриваться при токах 5 А и более.

Первичный ток срабатывания РЗ от замыкания на землю должен быть: для АД мощностью до 2000 кВт — не более 10 А, для АД мощностью более 2000 кВт — не более 5 А. Рекомендуются меньшие значения токов срабатывания, если это не усложняет выполнение РЗ.

Защиту следует выполнять без выдержки времени с использованием ТТ нулевой последовательности (ТТНП) и с действием на отключение АД. В зону действия РЗ должен входить и питающий АД кабель.

Чувствительность РЗ разрешается не проверять. Если по условию отстройки от переходного режима потребуется значительное заглубление защиты, то следует ввести выдержку времени, но для обеспечения быстрого отключения двойного замыкания на землю необходимо устанавливать в цепи ТТНП дополнительное токовое реле с первичным током срабатывания 50—100 А.

С целью уменьшения повреждаемости АД собственных нужд (СН) тепловых (ТЭС) и атомных (АЭС) электростанций при однофазных замыканиях на землю Атомэнергопроектом было принято решение заземлить нейтраль сети 6 кВ СН через активное сопротивление 100 Ом. Активное сопротивление включается в нейтраль 6 кВ специально установленного трансформатора со схемой соединения обмоток звезда—треугольник. Заземление нейтрали сети 6 кВ привело к снижению перенапряжений, а, следовательно, к снижению вероятности пробоя изоляции на корпус. Увеличение тока замыкания на землю примерно до 40 А значи-

тельно повысило чувствительность РЗ от замыкания на землю, что особенно важно, так как существующие защиты АД в сети с изолированной нейтралью имеют весьма большую мертвую зону.

Решение о допустимости работы сетей СН блочных электростанций (ЭС) с заземлением нейтрали через резистор было внесено в новое издание ПТЭ [3].

1.3. ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕГРУЗКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Увеличение тока в обмотках АД вызывает перегрев изоляции обмоток, сердечников статора и ротора. Увеличение температуры изоляции, точнее уменьшение разницы между ее фактической рабочей температурой и предельно допустимой, вызывает снижение срока службы изоляции, а быстрый дополнительный нагрев обмоток может привести к опасным деформациям.

Перегрузки делятся на *кратковременные*, когда температура обмотки не успевает достичь установившегося значения, и *длительные*, когда температура обмотки достигает установившегося значения, соответствующего значению перегрузочного тока. На основании ГОСТ повышение температуры обмотки определяется относительно предельной температуры охлаждающей среды, которая принимается равной 40 °С.

Превышение температуры $\Delta\theta$ можно выразить следующим уравнением:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}}\right), \quad (1.2)$$

где $\Delta\theta_{\infty}$ — превышение температуры, соответствующее установившемуся тепловому режиму;

t — время перегрузки; T_H — постоянная времени нагрева.

Выражение (1.2) соответствует нагреву АД из холодного состояния, т. е. когда температура обмотки совпадает с температурой окружающей среды. Если температура обмотки в начальный момент нагрева превышает температуру окружающей среды на $\Delta\theta_0$, то уравнение превышения температуры приобретает вид:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}}\right) + \Delta\theta_0 e^{-\frac{t}{T_H}}. \quad (1.3)$$

Процесс охлаждения АД описывается уравнением:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_0}}, \quad (1.4)$$

где $\Delta\theta_{\text{нач}}$ — превышение температуры в начале процесса охлаждения; T_0 — постоянная времени охлаждения.

Значение $T_0 = T_H$ для работающего АД и $T_0 = (1,5 + 4,0) T_H$ для отключенного АД, так как в этом случае отключается система охлаждения.

Выделяемое тепло пропорционально квадрату тока, поэтому можно записать:

$$\Delta\theta_\infty = \Delta\theta_{\text{доп}} \left(\frac{I}{I_{\text{доп}}}\right)^2, \quad (1.5)$$

где $\Delta\theta_{\text{доп}}$ — допустимое превышение температуры обмотки статора при допустимом значении тока.

В качестве допустимого тока $I_{\text{доп}}$ следует принимать максимальный длительный ток статора, соответствующий номинальной мощности.

С учетом (1.5) выражение (1.2) можно привести к виду:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\text{доп}} \left(\frac{I}{I_{\text{доп}}}\right)^2 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}}\right). \quad (1.6)$$

Решение (1.6) относительно t дает выражение для допустимого времени работы АД с перегрузкой $k_I = I/I_{\text{ном}}$

$$t_{\text{доп}} = T_H \ln \frac{k_I^2}{k_I^2 - 1}, \quad (1.7)$$

где $t_{\text{доп}}$ — допустимое время работы с перегрузкой k_I .

То же при начальной нагрузке при $k_0 = I_H/I_{\text{ном}}$:

$$t_{\text{доп}} = T_H \ln \frac{k_I^2 - k_0^2}{k_I^2 - 1}. \quad (1.8)$$

При кратковременных перегрузках, когда можно не учитывать отвод тепла в окружающую среду, допустимое время перегрузки АД при работе до перегрузки с номинальной нагрузкой можно выразить:

$$t_{\text{доп}} = \frac{A}{k_I^2 - 1}, \quad (1.9)$$

где A — величина, характеризующая постоянную нагрева АД.

Выражение (1.9) определяет адиабатический характер нагрева и поэтому недостаточно точно соответствует действительному допустимому времени нагрева АД, хотя обеспечивает более простое выполнение РЗ.

Из современных защит от перегрузки наиболее полно отражают тепловую характеристику электродвигателя микропроцессорные РЗ. Так РЗ SPAM 150С, реализующая характеристику согласно (1.3), обеспечивает защиту как от кратковременных, так и от длительных перегрузок, учитывает предшествующий нагрев и охлаждение, выполняет запрет повторно-

го пуска, пока температура АД не снизится до такой величины, при которой за время последующего пуска температура не достигнет предельной.

Тепловая защита, входящая в комплексное устройство РЗ типа ЯРЭ 2201, обеспечивает реализацию тепловой характеристики, описываемую выражением (1.9). Если перегрузка устраняется до достижения предельного значения, то в РЗ моделируется процесс охлаждения АД с постоянной времени равной 240 с. При повторной перегрузке время срабатывания РЗ сокращается с учетом предыдущей перегрузки, а после действия РЗ на отключение повторный пуск может быть заблокирован на время охлаждения. Так как тепловая характеристика РЗ предполагает, что АД до перегрузки находился в горячем состоянии (работал с номинальной нагрузкой), то возможно отключение АД при затяжном пуске из холодного состояния, хотя нагрев АД не достиг критического. Для предотвращения излишнего отключения в РЗ предусмотрена возможность блокировки тепловой защиты при пуске из холодного состояния.

Комплексные устройства РЗ типа ЯРЭ 2201 и микропроцессорные РЗ начали использоваться сравнительно недавно и поэтому в эксплуатации их очень мало. В основном, в качестве РЗ от перегрузки применяются предписанные ПУЭ защиты с одним токовым реле, отстроенным от номинального тока АД, и выдержкой времени большей пуска или самозапуска. Такое выполнение РЗ практически не учитывает перегрузочные возможности АД, включение же реле только в одну

фазу не позволяет выявить опасную перегрузку АД в неполнофазном режиме, а специальной РЗ от неполнофазного режима ПУЭ не предусматривает. Только в микропроцессорных РЗ тепловая защита реагирует на наибольший ток трех фаз, и дополнительно предусматривается РЗ от несимметричной работы.

В соответствии с ПУЭ защита от перегрузки устанавливается не на всех АД, а только на тех, которые подвержены перегрузке по технологическим причинам и на АД с тяжелыми условиями пуска и самозапуска (длительность прямого пуска непосредственно от сети 20 с и более), перегрузка которых возможна при чрезмерном увеличении длительности пускового периода вследствие понижения напряжения в сети.

На АД, подверженных перегрузке по технологическим причинам, РЗ должна выполняться с действием на сигнал и автоматическую разгрузку, при невозможности разгрузки или отсутствии дежурного персонала допускается действие РЗ на отключение.

Если отключение АД не приводит к нарушению технологического процесса или имеют место тяжелые условия пуска и самозапуска, то РЗ от перегрузки также действует на отключение.

Решением Атомэнергопроекта [1] РЗ от перегрузки с действием на отключение устанавливается в ячейках всех АД для предотвращения возгорания питающих АД кабелей в случае длительного протекания пусковых токов при заклинивании. Принимая во внимание весьма тяжелые последствия пожаров на ЭС, следует считать решение Атомэнергопроекта более правильным.

1.4. ЗАЩИТА МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Защита минимального напряжения является общей для всех электродвигателей секции и устанавливается в релейном отсеке КРУ трансформатора напряжения. Защита имеет три ступени по напряжению и выдержкам времени.

Первая ступень отключает ответственные АД для обеспечения самозапуска АД ответственных механизмов. Уставки срабатывания этой ступени выбираются равными 70 % номинального напряжения и выдержкой времени 0,5—1,0 с.

Вторая ступень предназначена для отключения ответственных АД при длительном отсутствии напряжения для обеспечения условий безопасности и в случаях, когда самозапуск механизмов после останова недопустим по условиям технологического процесса. Кроме того, вторая ступень может быть использована для обеспечения надежного пуска АВР АД взаиморезервируемых

механизмов и для последовательного пуска ответственных механизмов, если одновременный пуск не может быть осуществлен. Уставки срабатывания второй ступени выбираются равными 50 % номинального напряжения и выдержкой времени 0,3—0,9 с.

Список АД, отключаемых от первой и второй ступеней РЗ минимального напряжения, должен быть утвержден главным инженером предприятия.

Третья ступень служит пусковым органом АВР с напряжением срабатывания равным 25 % номинального напряжения и выдержкой времени, равной времени срабатывания РЗ питающего секции ввода.

Для контроля исправности вторичных цепей ТН устанавливается фильтр-реле обратной последовательности, которое одновременно используется для запрета действия [1, 11] чувствительной резервной РЗ от трехфазных КЗ на стороне 0,4 кВ рабочего и резервного трансформатора СН 6/0,4 кВ.

2. Выбор уставок срабатывания защит АД от многофазных КЗ

2.1. РАСЧЕТ УСТАВОК СРАБАТЫВАНИЯ ТОКОВОЙ ОТСЕЧКИ АД

2.1.1. Токовая отсечка, выполненная с помощью реле серий РТ-40, РСТ-11, РСТ-13 и РТ-80

Отсечка выполняется в соответствии с главой 1.

Первичный ток срабатывания токовой отсечки выбирается по условию отстройки от макси-

мального действующего значения тока, протекающего по обмотке статора АД при его пуске (самозапуске). Если перерыв питания АД более 0,5 с, то расчетным током является пусковой ток АД, а при перерыве питания менее 0,5 с за расчетный ток принимается больший из пускового тока и тока несинхронного включения — подключения АД с непогасшим полем к источнику электроснабжения.

Увеличение тока при подаче напряжения на неостановленный АД объясняется тем, что после отключения от сети накопленная в АД кинетическая и электрическая энергия расходуется постепенно, благодаря чему напряжение АД сначала резко падает до значения ЭДС и далее уменьшается пропорционально частоте вращения вала и пропорционально снижению магнитного потока по закону экспоненты. Ток несинхронного включения следует определять при угле сдвига фаз между ЭДС АД и напряжением сети, близким к 180° , при этом для обеспечения некоторого запаса можно принять, что к моменту подачи напряжения от сети ЭДС АД не уменьшается и составляет 0,85—0,95 отн. ед. При необходимости значение ЭДС может быть уточнено по следующей формуле:

$$E_{\text{АД}} = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_{\text{НОМ}})^2 + \dots \rightarrow \dots + (U_0 \sin \varphi_{\text{НОМ}} - I_0 X_{\text{АД}})^2}, \quad (2.1)$$

где $E_{\text{АД}}$ — ЭДС АД, кВ; U_0 — напряжение на выводах АД до момента снятия напряжения, кВ; $\cos \varphi_{\text{НОМ}}$ — номинальный коэффициент мощности; I_0 — ток АД до момента снятия напряжения, кА; $X_{\text{АД}}$ — сопротивление АД, Ом.

Сопротивление АД:

$$X_{\text{АД}} = \frac{1}{k_{\text{пуск}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ АД}}^2}{S_{\text{НОМ АД}}}, \quad (2.2)$$

где $U_{\text{НОМ АД}}$ — номинальное напряжение АД, кВ; $S_{\text{НОМ АД}}$ — номинальная полная мощность, МВ·А.

Номинальная полная мощность АД:

$$S_{\text{НОМ АД}} = \frac{P_{\text{НОМ АД}}}{\eta \cos \varphi_{\text{НОМ}}}, \quad (2.3)$$

где $P_{\text{НОМ АД}}$ — номинальная активная мощность, МВт; η — коэффициент полезного действия (КПД).

Ток несинхронного включения определяется по выражению:

$$I_{\text{НС.вкл}} = \frac{U_c + E_{\text{АД}}}{X_{\text{АД}} + X_c}, \quad (2.4)$$

где U_c и X_c — напряжение и эквивалентное сопротивление сети, к которой подключен АД.

При групповом самозапуске ток несинхронного включения будет меньше тока несинхронного включения одиночного АД, поэтому возможность несинхронного включения в первую очередь следует учитывать для двухскоростных АД при переходе с одной скорости на другую.

Таким образом, первичный ток срабатывания токовой отсечки определяется по условию:

$$I_{\text{с.з}} = k_{\text{отс}} I_{\text{расч}}, \quad (2.5)$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и наличие апериодической составляющей в пусковом токе АД; $k_{\text{отс}} = 1,4—1,5$ для реле типа РТ-40, РСТ-11, РСТ-13; $k_{\text{отс}} = 1,8—2,0$ для реле типа РТ-80* и для реле прямого действия вследствие меньшей точности действия этих реле; $I_{\text{расч}}$ — боль-

* Следует иметь в виду, что использование электромагнитного элемента реле РТ-80 в качестве токовой отсечки ограничено из-за возможности ложной работы в условиях вибрации, ударов и в среде, насыщенной пылью.

шее из значений $I_{нс.вкл}$ и $I_{пуск}$; $I_{нс.вкл}$ — определяется согласно (2.4); $I_{пуск}$ — действующее значение пускового тока АД при подключении на номинальное напряжение сети и определенное без учета сопротивления источника электроснабжения для АД, работающих непосредственно на шины с учетом минимально возможного сопротивления силового трансформатора для АД, работающих в блоке с трансформатором.

Пусковой ток АД можно определить как

$$I_{пуск} = k_{пуск} I_{ном АД}, \quad (2.6)$$

где $k_{пуск}$ — кратность пускового тока; $I_{ном АД}$ — номинальный ток АД.

На основании (2.6) выражение (2.5) можно представить в следующем виде:

$$I_{с.з} = k_{отс} k_{пуск} I_{ном АД}. \quad (2.7)$$

Ток срабатывания реле $I_{с.р}$ определяется по выражению:

$$I_{с.р} = \frac{k_{сх} I_{с.з}}{K_I}, \quad (2.8)$$

где K_I — коэффициент трансформации ТТ; $k_{сх}$ — коэффициент, учитывающий схему соединения ТТ ($k_{сх} = 1,0$ при включении реле на фазные токи; $k_{сх} = \sqrt{3}$ при включении реле на разность токов двух фаз или при включении реле на соединенные треугольником вторичные обмотки трех ТТ).

Ток срабатывания отсечки, определенный по (2.7), будет отстроен и от тока отдачи АД при внешнем КЗ.

Чувствительность токовой отсечки проверяется при двухфазном КЗ на выводах АД в минимальном режиме питающей сети

и оценивается коэффициентом чувствительности, определяемым по выражению:

$$k_{ч} = \frac{I_p^{(2)}}{I_{с.р}} = \frac{I_{к min}^{(2)}}{I_{с.р} K_I}, \quad (2.9)$$

где $I_p^{(2)}$ — ток в реле при металлическом двухфазном КЗ на выводах электродвигателя; $I_{к min}^{(2)}$ — минимальное значение первичного тока металлического двухфазного КЗ при повреждениях на выводах АД.

Коэффициент чувствительности по (2.9) определяется для всех схем выполнения токовых отсечек (вне зависимости от $k_{сх}$).

Коэффициент чувствительности отсечки должен быть не менее двух.

Из (2.8) и (2.9) следует, что токовая отсечка, выполненная включением реле на разность токов двух фаз имеет пониженный в $\sqrt{3}$ раз коэффициент чувствительности по сравнению со схемой включения реле на фазные токи. Применение одного реле для РЗ от междуфазных КЗ наиболее массовых АД было продиктовано соображениями экономии. Однако низкая чувствительность такой РЗ приводила к большому числу тяжелых аварий, сопровождающихся серьезным нарушением технологии, и увеличению объема и стоимости ремонтно-восстановительных работ. Поэтому применение однорелейной схемы РЗ следует считать неоправданным и от нее необходимо отказаться.

При расчете чувствительности не следует в ток КЗ добавлять ток отдачи от других АД.

В тех случаях, когда чувствительность токовой отсечки с реле РТ-40 оказывается недостаточ-

ной, целесообразно применять отсечку, выполненную с реле РНТ-565, имеющим лучшую отстройку от аperiodических составляющих во вторичном токе ТТ. Чувствительность РЗ при этом повышается за счет снижения $k_{отс}$ до 1,3.

Использование для уменьшения $k_{отс}$ замедления срабатывания отсечки, например, путем установки выходного реле типа РП-251, недопустимо, так как это приводит к увеличению объема повреждения, а для ТЭС и к увеличению выдержки времени РЗ вводов, питающих секций собственных нужд, что противоречит требованиям противоаварийного циркуляра от 11 октября 1984 г. № 11/84 [15].

2.1.2. Токовая отсечка, входящая в состав комплексного устройства защиты серии ЯРЭ 2201

Максимальная токовая защита в устройствах серии ЯРЭ 2201 выполнена на интегральной элементной базе, что обеспечивает время срабатывания защиты 0,03—0,04 с. Высокое быстродействие РЗ приводит к тому, что токовая отсечка будет реагировать в начальный переходный период при пуске и самозапуске на аperiodическую составляющую переходного тока. Влияние аperiodической составляющей при выборе срабатывания токовой отсечки можно учесть путем увеличения коэффициента отстройки в (2.5), т. е. для токовой отсечки в составе комплекта ЯРЭ 2201 следует принимать значение $k_{отс} = 1,8 \div 2,3$.

Для установки полученного тока срабатывания $I_{с.р}$ в устрой-

стве ЯРЭ 2201 предлагается следующая методика [8].

Уставка срабатывания токовой отсечки определяется выбором коэффициентов K и $\Sigma \theta$ в соответствии со следующим выражением:

$$I_{с.р} = K(1 + \Sigma \theta), \quad (2.10)$$

$\Sigma \theta$ и K показаны на лицевой стороне токовых блоков типа ТО 100.

По выбранному значению тока срабатывания $I_{с.р}$ и максимальному значению $\Sigma \theta_{max}$ по шкале определяется расчетное значение

$$K_{расч} = \frac{I_{с.р}}{1 + \Sigma \theta_{max}}. \quad (2.11)$$

Принимается ближайшее большее оцифрованное значение $K_{уст}$ по шкале, $K_{уст} \geq K_{расч}$.

По определенному $K_{уст}$ вычисляется расчетное значение $\Sigma \theta_{расч}$:

$$\Sigma \theta_{расч} = \frac{I_{с.р}}{K_{уст}} - 1. \quad (2.12)$$

Принимается оцифрованное значение $\Sigma \theta_{уст}$ по шкале в соответствии со следующим выражением:

$$\Sigma \theta_{уст} \geq \Sigma \theta_{расч}.$$

После чего уточняется ток срабатывания отсечки по (2.10).

2.1.3. Токовая отсечка блока защиты АД типа SPAM 150С (SPAC 802/01)

Цифровая РЗ от многофазных КЗ выполнена в виде токовой защиты в трехрелейном исполнении. Предусмотрена возможность автоматического удваивания уставки при включении АД. Режим запуска определяется по

факту возрастания фазных токов от тока покоя $I < 0,12 I_0$ до $I = 1,5 I_0$ за время меньшее, чем 60 мс. Благодаря загрузлению РЗ при пуске АД ток срабатывания междуфазной отсечки может быть выбран ниже броска тока при включении.

Фирмой АББ рекомендуется ток срабатывания РЗ выбирать равным $0,75 I_{\text{пуск}}$, т. е. во время пуска ток срабатывания будет равен $1,5 I_{\text{пуск}}$.

Время срабатывания защиты следует выбирать минимальным ($t_{\text{с.з}} = 0,04$ с).

Для установки автоматического удваивания уставки переключатель SGF/2 = 1, режим запуска по изменению тока устанавливается переключателем SG4/1 = 0, ввод РЗ в работу переключателем SGF/1 = 1.

Чувствительность РЗ следует проверять при удвоенной уставке, так как возможно повреждение АД в момент пуска и коэффициент чувствительности в этом режиме должен быть равен двум.

В РЗ предусмотрена возможность запоминания тока и времени пуска, поэтому при первом пуске АД необходимо уточнить значение пускового тока и откорректировать ток срабатывания отсечки.

2.2. РАСЧЕТ УСТАВОК СРАБАТЫВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ АД

Продольная дифференциальная защита АД выполняется [2] с использованием реле с торможением типа ДЗТ-11 для ТЭС и с использованием реле с времяимпульсным принципом действия типа РСТ-15 для АЭС.

Однако, в эксплуатации находится большое число дифференциальных защит АД, выполненных с использованием реле типа РНТ. Поэтому расчет уставок дифференциальной защиты АД приводится как для реле РНТ, так и для ДЗТ-11 и РСТ-15.

2.2.1. Дифференциальная защита АД с использованием реле типа РНТ-565

Ток срабатывания дифференциальной защиты выбирается по условию отстройки от максимального тока небаланса в режиме пуска АД при номинальном напряжении сети. Расчет тока небаланса производится по традиционной формуле:

$$I_{\text{нб}} = k_a k_{\text{одн}} \epsilon k_{\text{пуск}} I_{\text{ном АД}}, \quad (2.13)$$

которая дает значения тока небаланса, не превышающие $(0,7 \div 0,8) I_{\text{ном АД}}$.

В формуле (2.13): $k_a = 1,0$ — коэффициент, учитывающий влияние аperiodической составляющей в переходном режиме; $k_{\text{одн}} = 1,0$ — коэффициент однотипности ТТ; $\epsilon = 0,1$ — расчетная полная погрешность ТТ; $k_{\text{пуск}}$ — кратность пускового тока.

Однако, опыт эксплуатации дифференциальных защит мощных АД показал, что на самом деле значение $I_{\text{нб}}$ иногда оказывалось значительно выше, что приводило к ложным срабатываниям дифференциальных РЗ при пуске и самозапуске АД. Причинами появления повышенных токов небаланса является существенное неравенство нагрузок на ТТ из-за значительной разницы в длинах соединительных проводов от ТТ до места их соединения и насыщение ТТ загруженного

плеча РР из-за наличия апериодической составляющей в токе пуска и самозапуска [6, 7]. Существенной особенностью тока небаланса дифференциальных защит является отсутствие апериодической составляющей, либо ее малое относительное содержание, что не вызывает загробления уставки реле РНТ.

Были произведены теоретический анализ, физическое и математическое моделирование процессов в схемах дифференциальных защит АД. В результате исследований получены обобщенные кривые тока небаланса дифференциальных защит АД в виде зависимости относительного действующего значения тока небаланса, при котором реле РНТ не загробляется, от произведения удельного первичного тока $I_{уд}$ и удельного сопротивления вторичной цепи ТТ менее загруженного плеча защиты z_2 , если полная погрешность ТТ другого плеча при синусоидальном пусковом токе $\varepsilon = 10\%$. Обобщенные кривые зависимости $I_{нб*}$ от $I_{уд} z_2$ для разных схем соединения ТТ приведены на рис. 1.

На рис. 1 приведены следующие обозначения:

$$I_{нб*} = \frac{I_{нб}}{I_{пуск}},$$

где $I_{нб}$ — ток небаланса; $I_{пуск}$ — пусковой ток АД;

$$I_{уд} z_2,$$

где $I_{уд} = \frac{I_1 w_1}{\ell}$ — действующее значение удельного первичного тока; I_1 — первичный пусковой ток АД; w_1 — число витков первичной обмотки ТТ; ℓ — средняя длина магнитопровода ТТ;

$z_2 = Z_2 \frac{\ell}{s w_2^2}$ — удельное сопротивление вторичной цепи ТТ; s — сечение магнитопровода ТТ; w_2 — число витков вторичной обмотки ТТ; $Z_2 =$

$= \sqrt{(k_{сх} R_k + R_{пер} + R_{вт})^2 + X_{вт}^2}$ — полное сопротивление вторичной цепи ТТ; $R_{вт}$ и $X_{вт}$ — активное и индуктивное сопротивление вторичной обмотки ТТ (в случае отсутствия данных об индуктивном сопротивлении вторичной обмотки ТТ можно принять его равным нулю, что даст запас в расчете тока небаланса); R_k — активное сопротивление кабеля; $k_{сх}$ — коэффициент, учитывающий схему соединения ТТ ($k_{сх} = 1,0$ для схемы звезда, $k_{сх} = \sqrt{3}$ для схемы неполная звезда, $k_{сх} = 3$ для схемы треугольник); $R_{пер}$ — переходное сопротивление контактов принимается равным 0,1 Ом.

Таким образом значение произведения:

$$\begin{aligned} I_{уд} z_2 &= \frac{I_1 w_1}{\ell} Z_2 \frac{\ell}{s w_2^2} = \\ &= \frac{I_{пуск}}{K_I} Z_2 \frac{1}{s w_2} = \\ &= \frac{k_{пуск} I_{ном АД}}{K_I} \cdot \frac{Z_2}{s w_2}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

где $k_{пуск}$ — кратность пускового тока; $I_{ном АД}$ — первичный номинальный ток АД; K_I — коэффициент трансформации ТТ.

Для выбора тока срабатывания дифференциальной защиты необходимо для вычисленного значения $I_{уд} z_2$ по рис. 1 опреде-

лить $I_{нб^*}$ и умножить его на пусковой ток АД:

$$I_{с.з} = I_{нб^*} k_{пуск} I_{ном АД}. \quad (2.15)$$

В расчетах уставок реле РНТ не учитывается коэффициент надежности, так как обобщенные кривые получены для наихудших условий.

Порядок расчета уставок защит с реле РНТ. Исходными данными для расчета являются схемы соединения ТТ со стороны нулевых и фазных выводов; кратность пускового тока $k_{пуск}$ и номинальный ток АД $I_{ном АД}$; сопротивление кабеля малонагруженного плеча R_k ; параметры ТТ малонагруженного плеча: $R_{вт}$ и $X_{вт}$ — активное и индуктивное сопротивление вторичной обмотки ТТ; w_2 — число витков вторичной обмотки; s — сечение магнитопровода; K_I — коэффициент трансформации ТТ.

Определяется нагрузка вторичной цепи ТТ:

$$Z_2 = \sqrt{(k_{сх} R_k + 0,1 + R_{вт})^2 + X_{вт}^2}.$$

Определяется произведение:

$$I_{уд} z_2 = \frac{k_{пуск} I_{ном АД}}{K_I} \cdot \frac{Z_2}{s w_2}.$$

По соответствующей кривой на рис. 1 определяется ток небаланса $I_{нб^*}$.

Вычисляется первичный ток срабатывания РЗ:

$$I_{с.з} = I_{нб^*} k_{пуск} I_{ном АД}.$$

Определяется вторичный ток срабатывания РЗ:

$$I_{с.р} = \frac{I_{с.з} k_{сх}}{K_I},$$

где $k_{сх}$ — коэффициент, учитывающий схему соединения ТТ со стороны питания АД.

Определяется число рабочих витков РНТ:

$$w_{раб} = \frac{100}{I_{с.р}}$$

и принимается ближайшее меньшее целое — $w_{уст}$.

Уточняется первичный ток срабатывания РЗ:

$$I_{с.з} = \frac{100 K_I}{w_{уст} k_{сх}}.$$

Проверяется чувствительность РЗ:

$$k_{ч} = \frac{I_{к min}^{(2)}}{I_{с.з}} \geq 2.$$

Чувствительность РЗ проверяется как отношение двухфазного тока КЗ на выводах АД в режиме, когда этот ток будет иметь наименьшее значение, к току срабатывания РЗ. Коэффициент чувствительности должен быть равен или больше двух.

Пример 1. Расчет дифференциальной защиты АД мощностью 5000 кВт с использованием реле РНТ-565.

Исходные данные: $I_{ном АД} = 545$ А; $k_{пуск} = 5,6$; ТТ типа ТВЛМ-10 со стороны питания соединены в неполную звезду; сердечник класса Р; $K_I = 120$; $s = 19,3 \cdot 10^{-4}$ м²; $w_2 = 119$; $R_{вт} = 0,24$ Ом; длина кабеля со стороны питания $\ell_k = 4$ м; $\rho = 0,0176$ Ом·мм²/м; сечение кабеля $s_k = 2,5$ мм²; со стороны нулевых выводов ТТ соединены в треугольник (фазные обмотки защищаемого АД соединены в треугольник и ТТ установлены в цепи линейных выводов и в цепи фазных обмоток).

Сопротивление кабеля:

$$R_k = \rho \frac{\ell_k}{s_k} = 0,0176 \cdot \frac{4}{2,5} = 0,028 \text{ Ом.}$$

Нагрузка на ТТ (индуктивным сопротивлением вторичной обмотки ТТ пренебрегаем):

$$R_2 = 0,24 + \sqrt{3} \cdot 0,028 + 0,1 = 0,388 \text{ Ом.}$$

По формуле (2.14):

$$I_{\text{уд}} z_2 = \frac{5,6 \cdot 545}{120} \frac{0,388}{19,3 \cdot 10^{-4} \cdot 119} = 43 \text{ В/м}^2 \cdot \text{вит.}$$

Относительный ток небаланса по рис. 1 для схемы неполная звезда—треугольник $I_{\text{нб}^*} = 0,38$.

Ток срабатывания РЗ:

$$I_{\text{с.з}} = I_{\text{нб}^*} k_{\text{пуск}} I_{\text{ном АД}} = 0,38 \cdot 5,6 \cdot 545 = 1160 \text{ А;}$$

$$I_{\text{с.р}} = \frac{1160}{120} = 9,66 \text{ А;}$$

$$w_{\text{раб}} = \frac{F_{\text{с.р}}}{I_{\text{с.р}}} = \frac{100}{9,66} = 10,3 \text{ вит.}$$

Принимаем к установке 10 вит, которым соответствует ток срабатывания РЗ.

$$I_{\text{с.з}} = \frac{F_{\text{с.р}}}{w_{\text{раб}}} K_I = \frac{100}{10} \cdot 120 = 1200 \text{ А.}$$

Таким образом, ток срабатывания дифференциальной РЗ составляет $1200/545 = 2,2 I_{\text{ном АД}}$, хотя по традиционной формуле:

$$I_{\text{с.з}} = 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,1 \cdot 5,6 \cdot 545 = 400 \text{ А или } 0,73 I_{\text{ном АД}}.$$

Дифференциальная защита реле РНТ-565 получилась достаточно грубой. Далее в примере 2 будет показано, что более целесообразно для дифференциальной защиты АД использовать реле ДЗТ-11.

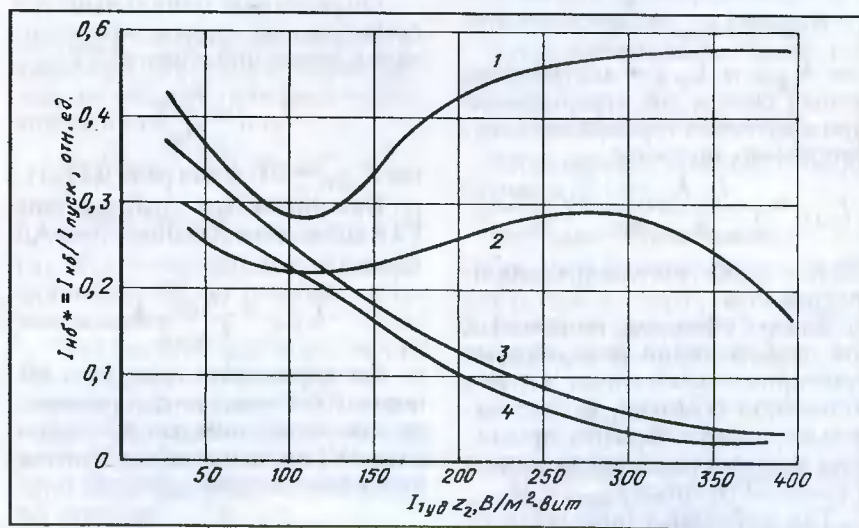


Рис. 1. Максимально возможные значения тока небаланса в схеме дифференциальной защиты АД с ТТ, соединенными по схеме:

1 — неполная звезда—треугольник; 2 — звезда—звезда; 3 — неполная звезда—неполная звезда; 4 — звезда—треугольник

2.2.2. Дифференциальная защита АД с использованием реле типа ДЗТ-11

Принимаем, что тормозная обмотка включена со стороны нулевых выводов АД. Такое включение обеспечивает при пуске или при КЗ вне зоны защиты торможение током пуска или подпитки АД. При КЗ в зоне защиты указанное торможение мало влияет на чувствительность этой защиты.

Поскольку при пуске АД должно быть обеспечено несрабатывание реле, то необходимо выполнение условия:

$$I_{\text{нб}} w_{\text{раб}} \leq I_{\text{торм}} w_{\text{торм}} \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.16)$$

где $w_{\text{раб}}$ и $w_{\text{торм}}$ — числа витков рабочей и тормозной обмоток ДЗТ-11; $\operatorname{tg} \alpha$ — коэффициент, определяющий наклон тормозной характеристики.

$$\text{Выразив } w_{\text{раб}} = \frac{F_{\text{с.р.о}}}{I_{\text{с.р.о}}},$$

где $F_{\text{с.р.о}}$ и $I_{\text{с.р.о}}$ — магнитодвижущая сила и ток срабатывания при отсутствии торможения соответственно, получим:

$$I_{\text{с.р.о}} = \frac{I_{\text{нб}} F_{\text{с.р.о}}}{I_{\text{торм}} w_{\text{торм}} \operatorname{tg} \alpha} = C \frac{1}{w_{\text{торм}}},$$

где C — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, начальный ток срабатывания реле обратно пропорционален числу витков тормозной обмотки, и следовательно, целесообразно принимать максимальное число витков тормозной обмотки $w_{\text{торм}} = 24$.

Ток небаланса определяется по обобщенным кривым максимально возможного значения тока небаланса на рис. 1. Для этого рассчитывается произведение удельного первичного тока на

удельное сопротивление вторичной цепи ТТ $I_{\text{уд}} z_2$ по формуле (2.14) аналогично тому, как это выполнялось для реле РНТ-565.

По расчетному току небаланса определяем число витков рабочей обмотки по формуле (2.16), принимая, что $w_{\text{торм}} = 24$, $\operatorname{tg} \alpha = 0,75$, ток небаланса умножаем на коэффициент отстройки $k_{\text{отс}} = 1,5$, а тормозной ток делим на $k = 0,8$ — для учета снижения тормозного тока из-за насыщения ТТ в нулевых выводах АД;

$$w_{\text{раб}} \leq \frac{0,8 I_{\text{торм}} \cdot 24 \cdot 0,75}{1,5 I_{\text{нб}}} \quad \text{или} \quad (2.17)$$

$$w_{\text{раб}} \leq 9,6 \frac{I_{\text{торм}}}{I_{\text{нб}}}. \quad (2.18)$$

Тормозной ток определяем в режиме пуска:

$$I_{\text{торм}} = k_{\text{пуск}} I_{\text{ном АД}}. \quad (2.19)$$

Определяем начальный ток срабатывания защиты, приведенный к вторичной обмотке ТТ:

$$I_{\text{с.р.о}} = \frac{F_{\text{с.р.о}}}{w_{\text{раб}}},$$

где $F_{\text{с.р.о}} = 100$ А для реле ДЗТ-11.

Начальный ток срабатывания РЗ в долях номинального тока АД $I_{\text{ном АД}}$:

$$I_{\text{с.р.о}} = \frac{I_{\text{с.р.о}}}{I_{\text{ном АД}}} K_I.$$

Коэффициент чувствительности РЗ определяется при двухфазном металлическом КЗ на выводах АД в режиме, когда этот ток имеет наименьшее значение:

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{раб.с.р}}} \geq 2, \quad (2.20)$$

где $F_{\text{раб}}$ — рабочая магнитодвижущая сила в реле при двухфазном КЗ; $F_{\text{раб.с.р}}$ — рабочая магни-

тодвижущая сила срабатывания реле с учетом тормозного тока в реле.

Рабочая магнитодвижущая сила $F_{\text{раб}}$ определяется по выражению:

$$F_{\text{раб}} = I_{\text{раб}} w_{\text{раб}} = \frac{I_{\text{к. min}}^{(2)} k_{\text{сх}}}{K_I} w_{\text{раб}}, \quad (2.21)$$

где $I_{\text{к. min}}^{(2)}$ — первичный ток двухфазного КЗ на выводах двигателя со стороны питания; $k_{\text{сх}}$ — коэффициент, учитывающий схему соединения ТТ со стороны питания, принимается равным 1,0; K_I — коэффициент трансформации ТТ со стороны питания.

Рабочая магнитодвижущая сила срабатывания реле определяется:

$$F_{\text{раб.с.р}} = \frac{F_{\text{с.р.о}}}{1 - \frac{F_{\text{торм}}}{F_{\text{раб}}}, 0,96}, \quad (2.22)$$

где $F_{\text{торм}}$ — тормозная магнитодвижущая сила реле в рассматриваемом режиме проверки чувствительности.

$$F_{\text{торм}} = I_{\text{торм}}^{(2)} w_{\text{торм}} = \frac{\sqrt{3}}{2} k_{\text{пуск}} I_{\text{ном АД}} \frac{w_{\text{торм}} k_{\text{сх}}}{K_{I\text{H}}}, \quad (2.23)$$

где $K_{I\text{H}}$ — коэффициент трансформации ТТ со стороны нулевых выводов.

При расчете чувствительности РЗ и $F_{\text{раб}}$ не учитывался ток со стороны АД, что идет в запас чувствительности. Для учета тока отдачи АД рабочую намагничивающую силу $F_{\text{раб}}$ следует вычислять по формуле:

$$F_{\text{раб}} = \frac{I_{\text{к. min}}^{(2)}}{K_I} w_{\text{раб}} + \frac{0,87 k_{\text{пуск}} I_{\text{ном АД}}}{K_{I\text{H}}} w_{\text{раб}}. \quad (2.24)$$

Порядок расчета уставок защит с реле ДЗТ-11. Исходные данные для расчета те же, что и для расчета с реле РНТ, а именно: схемы соединения ТТ со стороны нулевых и фазных выводов; $k_{\text{пуск}}$; $I_{\text{ном АД}}$ и параметры ТТ малонагруженного плеча: $R_{\text{к}}$, $R_{\text{вт}}$, $X_{\text{вт}}$, w_2 , s , K_I . Дополнительно необходимо знать коэффициент трансформации ТТ со стороны нулевых выводов.

Определяется нагрузка вторичной цепи ТТ малонагруженного плеча:

$$Z_2 = \sqrt{(k_{\text{сх}} R_{\text{к}} + 0,1 + R_{\text{вт}})^2 + X_{\text{вт}}^2}$$

Определяется произведение:

$$I_{\text{уд}} z_2 = \frac{k_{\text{пуск}} I_{\text{ном АД}}}{K_I} \cdot \frac{Z_2}{s w_2}$$

По соответствующей кривой на рис. 1 (в зависимости от схем соединения ТТ) определяется ток небаланса $I_{\text{нб}}$.

Определяем первичный ток небаланса:

$$I_{\text{нб}} = I_{\text{нб}} \cdot k_{\text{пуск}} I_{\text{ном АД}}$$

Определяем тормозной ток по формуле (2.19):

$$I_{\text{торм}} = k_{\text{пуск}} I_{\text{ном АД}}$$

Для принятого числа витков тормозной обмотки $w_{\text{торм}} = 24$ вит по формуле (2.18) определяем рабочее число витков:

$$w_{\text{раб}} \leq 9,6 \frac{I_{\text{торм}}}{I_{\text{нб}}}$$

Принимаем к установке ближайшее меньшее $w_{\text{уст}}$.

Определяем начальный ток срабатывания защиты в долях номинального тока АД:

$$I_{\text{с.р.о}} = \frac{100}{w_{\text{уст}}} \cdot \frac{K_I}{I_{\text{ном АД}}}$$

Для определения чувствительности РЗ необходимо определить $F_{\text{раб}}$, $F_{\text{торм}}$ и $F_{\text{раб.с.р}}$.

Рабочую магнитодвижущую силу определяем по формуле (2.21) для ранее вычисленного тока двухфазного КЗ на выводах АД в режиме наименьшего тока КЗ:

$$F_{\text{раб}} = \frac{I_{\text{к.мин}}^{(2)}}{K_I} w_{\text{уст}}.$$

Определяем тормозную магнитодвижущую силу в реле $F_{\text{торм}}$ по формуле (2.23)

$$F_{\text{торм}} = \frac{0,87 k_{\text{тукс}} I_{\text{ном АД}} w_{\text{торм}} k_{\text{сх}}}{K_{I\text{н}}}.$$

По формуле (2.22) вычисляем магнитодвижущую силу срабатывания реле $F_{\text{раб.с.р}}$.

Определяем коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}^{(2)}$ дифференциальной защиты по формуле (2.20). Коэффициент чувствительности должен быть равен или больше двух.

Пример 2. Расчет дифференциальной защиты АД мощностью 5000 кВт с использованием реле ДЗТ-11.

Исходные данные приведены в примере 1. Коэффициент трансформации ТТ со стороны нулевых выводов $K_{I\text{н}} = 120$. Трансформаторы тока включены в фазные обмотки АД и соединены в треугольник, в результате вторичные токи со стороны линейных и нулевых выводов будут равны.

Ток небаланса определяем так же как и для реле РНТ-565:

$$I_{\text{нб}} = 0,38 \cdot 5,6 \cdot 545 = 1160 \text{ А.}$$

Определяем тормозной ток по формуле (2.19):

$$I_{\text{торм}} = 5,6 \cdot 545 = 3052 \text{ А.}$$

Принимаем $w_{\text{торм}} = 24$ вит и определяем рабочее число витков ДЗТ-11 по формуле (2.18)

$$w_{\text{раб}} \leq 9,6 \frac{3052}{1160} = 25,2 \text{ вит.}$$

Принимаем к установке $w_{\text{уст}} = 25$ вит.

Определяем начальный ток срабатывания РЗ в долях номинального тока АД:

$$I_{\text{с.р.о}} = \frac{100}{25} \cdot \frac{120}{545} = 0,88 I_{\text{ном АД}}.$$

Принимаем, что минимальный ток двухфазного КЗ был определен $I_{\text{к.мин}}^{(2)} = 15000 \text{ А}$.

Рабочая и тормозная магнитодвижущие силы определяются по формулам (2.21) и (2.23):

$$F_{\text{раб}} = \frac{15000}{120} 25 = 3125 \text{ А.}$$

$$F_{\text{торм}} = \frac{0,87 \cdot 3052}{120} 24 = 531 \text{ А.}$$

Определяем рабочую магнитодвижущую силу срабатывания по формуле (2.22):

$$F_{\text{раб.с.р}} = \frac{100}{1 - \frac{531}{3125}} = 120 \text{ А.}$$

Определяем коэффициент чувствительности дифференциальной защиты АД с использованием реле типа ДЗТ-11 по формуле (2.20):

$$k_{\text{ч}} = \frac{3125}{120} = 26.$$

Для сравнения определим коэффициент чувствительности дифференциальной защиты того же АД, но с использованием реле типа РНТ-565 (см. пример 1):

$$k_{\text{ч}} = \frac{15000}{1200} = 12,5.$$

Коэффициент чувствительности защиты с использованием

реле ДЗТ-11 в 2 раза больше k_4 с реле РНТ-565, что показывает преимущество дифференциальной защиты АД с реле ДЗТ-11.

2.2.3. Дифференциальная защита АД с использованием реле типа РСТ-15

Ток срабатывания дифференциальной защиты АД с реле типа РСТ-15 выбирается равным току небаланса, который определяется по произведению $I_{уд} z_2$ и рис. 1 так же как для реле типа РНТ-565. Это вызвано тем, что нет опыта эксплуатации дифференциальных защит с реле РСТ-15 при токе срабатывания меньше пускового и в условиях отсутствия в токе небаланса апериодической составляющей. Однако реле РСТ-15 сейсмостойчиво, и это реле рекомендуется применять в районах, где возможны землетрясения и на АЭС. Установка тока срабатывания реле РСТ-15 выполняется изменением числа витков входного трансформатора и регулировкой порога срабатывания реле. Порог срабатывания реле $I_{с.р.}$ изменяется дискретно и градуируется в долях номинального тока реле при подаче входного тока к 20 вит и входного трансформатора. Имеется возможность заглубления порога

срабатывания в 2 раза (k). Схема входного трансформатора с указанием числа витков отпаек приведена на рис. 2. Таким образом, для установки на реле типа РСТ-15 расчетного тока срабатывания надо определить ток срабатывания реле в относительных единицах $I_{с.р.}$, коэффициент k и число витков трансформатора.

Для установки необходимого тока срабатывания на реле РСТ-15 можно воспользоваться данными табл. 1, где даны токи срабатывания реле при подаче тока к трансформатору, на котором установлено 20 вит, и соответствующие этим токам магнитодвижущая сила срабатывания ($F_{с.р.}$), уставки реле — ($I_{с.р.}$) и коэффициент (k).

В этом случае выбор уставок срабатывания реле выполняется следующим образом: для вычисленного тока срабатывания $I_{с.р.расч}$ по табл. 1 находится ближайший больший ток срабатывания в амперах (первая строка таблицы) и соответствующий ему $I_{с.р.}$, k и $F_{с.р.}$; разделив соответствующую магнитодвижущую силу срабатывания на расчетный ток срабатывания ($\frac{F_{с.р.}}{I_{с.р.расч}}$) определяем расчетное число витков

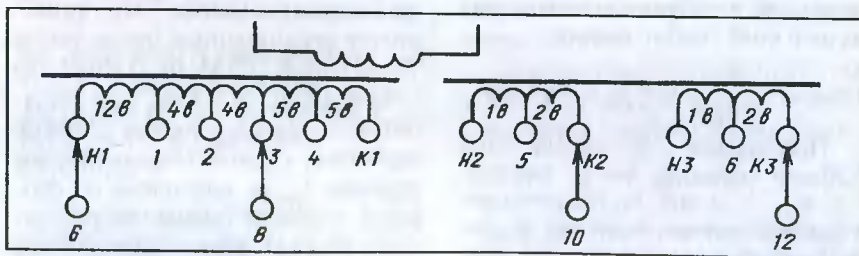


Рис. 2. Принципиальная схема входного трансформатора с указанием числа витков обмоток реле РСТ-15

Таблица 1. Уставки срабатывания реле РСТ-15

Ток срабатывания ($w = 20$ вит) $I_{с.р.}, A$	2,0	2,5	3,25	4,0	4,5	5,0	6,0	6,5	9,0	12
Магнитодвижущая сила срабатывания $F_{с.р.}, A$	40	50	65	80	90	100	120	130	180	240
Относительные уставки срабатывания ($w = 20$ вит):										
k	1	1	1	2	1	2	1	2	2	2
$I_{с.р.}^*$	0,4	0,5	0,65	0,4	0,9	0,5	1,2	0,65	0,9	1,2

трансформатора и устанавливаем ближайшее меньшее число витков, которое можно подобрать на реле (см. рис. 2).

Пример 3. Расчет дифференциальной защиты АД мощностью 5000 кВт с использованием реле РСТ-15.

Исходные данные приведены в примере 1, там же определен расчетный ток небаланса $I_{нб} = 0,38 \cdot 5,6 \cdot 545 = 1160 A$.

$$I_{с.з} = I_{нб} = 1160 A.$$

Определяем расчетный вторичный ток срабатывания РЗ:

$$I_{с.р.расч} = \frac{I_{с.з}}{K_I} = \frac{1160}{120} = 9,65 A.$$

По табл. 1 определяем, что ближайший больший ток срабатывания реле (при $w = 20$ вит) равен 12 А, ему соответствует уставка на реле $k = 2,0$, $I_{с.р.}^* = 1,2$.

Определяем расчетное число витков трансформатора по определенной в таблице магнитодвижущей силе срабатывания:

$$w_{расч} = \frac{F_{с.р.}}{I_{с.р.расч}} = \frac{240}{9,65} = 24,9 \text{ вит.}$$

Принимаем к установке ближайшее меньшее число витков, т. е. $w_{уст} = 24$ вит, но правильное, в данном случае, принять $w_{уст} = 25$ вит, так как увеличение чувствительности РЗ будет весьма небольшим.

Окончательно устанавливаем на реле РСТ-15 следующие уставки: $w_{уст} = 25$ вит, $I_{с.р.}^* = 1,2$, $k = 2,0$.

Этим уставкам на реле РСТ-15 соответствует ток срабатывания:

$$I_{с.з} = \frac{F_{с.р.}}{I_{с.р.расч}} K_I = \frac{240}{25} 120 = 1152 A.$$

Коэффициент чувствительности РЗ:

$$k_{ч} = \frac{15000}{1152} = 13,$$

такой же как и для реле РНТ-565.

2.2.4. Упрощенный метод определения тока небаланса [6]

Упрощенный метод определения тока небаланса основан на следующих положениях: реле дифференциальной защиты АД находятся в ячейках КРУ и длина контрольного кабеля практически неизменна (около 4 м); применяется ограниченное число типов ТТ (ТЛМ-6, ТЛМ-10, ТВЛМ-10) с $K_I = 1000/5$ и $600/5$, а их параметры s , $R_{вт}$, $\ell_{ср}$ имеют близкие значения; следовательно, произведение $I_{уд} z_2$ для плеча со стороны питания (менее нагруженного плеча) будет находиться в пределах $25 \pm 50 \text{ В/м}^2 \cdot \text{вит}$. В этом случае можно принять:

$I_{нб}^* = 0,3$ — для схемы звезда— звезда;

$I_{нб}^* = 0,34$ — для схемы звезда— неполная звезда;

$I_{нб}^* = 0,32$ — для схемы звезда—треугольник;

$I_{нб}^* = 0,45$ — для схемы неполная звезда—треугольник.

Дальнейший расчет производится согласно пп. 2.2.1, 2.2.2 и 2.2.3.

3. Выбор уставок срабатывания защиты от замыкания на землю в обмотке статора АД

Асинхронные электродвигатели напряжением 6—10 кВ, как правило, работают в сетях с малыми токами замыкания на землю, поэтому РЗ от замыкания на землю в обмотке статора выполняются в виде максимальных токовых РЗ, подключенных к кабельным ТГНП. Вне зависимости от аппаратного исполнения РЗ первичный ток срабатывания рассчитывается одинаково.

В тех случаях, когда сеть 6—10 кВ работает в режиме заземленной через резистор нейтрали [3], первичный ток срабатывания земляных защит выбирается в зависимости от принятых значений сопротивления резистора и создаваемого тока замыкания на землю плюс собственный емкостной ток (геометрическое сложение) [12].

3.1. РАСЧЕТ ПЕРВИЧНОГО ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ОБМОТКЕ СТАТОРА

Первичный расчетный ток срабатывания защиты от замыкания на землю в обмотке статора АД определяется по условию отстройки от броска собственного

емкостного тока присоединения при внешнем замыкании на землю:

$$I_{с.з} = k_{отс} k_6 I_C, \quad (3.1)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, равный 1,2; k_6 — коэффициент, учитывающий бросок собственного емкостного тока присоединения в начальный момент внешнего замыкания на землю.

Для сети с изолированной нейтралью:

$k_6 = 2 \div 3$ для реле РТЗ-51 и ЯРЭ 2201; $k_6 = 3 \div 4$ — для реле РТЗ-50 и РТ-40/0,2; $k_6 = 1,5 \div 2$ — для реле SPAM 150 С (SPAC 802).

Для сети с нейтралью, заземленной через резистор для всех реле $k_6 = 1,2 \div 1,3$;

I_C — утроенное значение собственного емкостного тока присоединения.

Значение собственного емкостного тока присоединения определяется следующим образом:

$$I_C = I_{САД} + I_{Сл}, \quad (3.2)$$

где $I_{САД}$ — собственный емкостной ток АД; $I_{Сл}$ — собственный емкостной ток кабельной линии, входящей в зону РЗ.

Таблица 2. Утроенное значение фазных емкостных токов на 1 км кабельных линий 6 кВ при различных сечениях кабеля

Сечение кабеля, мм ²	70	95	120	150	185	240
Емкостной ток $I_{Cуд}$, А/км:						
при $U_{ном} = 6$ кВ.....	0,8	0,9	1,0	1,18	1,25	1,45
при $U_{ном} = 10$ кВ.....	0,92	1,04	1,16	1,3	1,47	1,7

Утроенное значение собственного емкостного тока АД определяется по выражению:

$$I_{САД} = \frac{2\pi f 3 C_{АД} U_{ном}}{\sqrt{3}}, \quad (3.3)$$

где f — частота сети, Гц; $C_{АД}$ — емкость фазы статора АД, Ф; $U_{ном}$ — номинальное междуфазное напряжение в сети, В.

Значения емкости фазы статора АД относительно земли принимаются по данным завода-изготовителя. Ориентировочно емкость АД можно рассчитать по формуле:

$$C_{АД} = \frac{0,0187 S_{ном АД} 10^{-6}}{1,2\sqrt{U_{ном}} (1 + 0,08 U_{ном})}, \quad (3.4)$$

где $S_{ном АД}$ — номинальная мощность АД, МВА; $U_{ном}$ — номинальное напряжение АД, кВ.

После подстановки в формулу (3.4) значения номинального напряжения $U_{ном} = 6$ кВ получим:

$$C_{АД} = 0,00525 S_{ном АД} 10^{-6}. \quad (3.5)$$

Полная мощность АД подсчитывается по формуле (3.3)

$$S_{ном АД} = \frac{P_{ном АД}}{\eta \cos \varphi}.$$

Подставив в (3.3) значение емкости фазы АД, по формуле (3.5) получим:

$$I_{САД} = 0,0172 S_{ном АД}. \quad (3.6)$$

Утроенное значение собственного емкостного тока кабельной линии, входящей в зону РЗ, определяется по выражению:

$$I_{Сл} = I_{Cуд} l m, \quad (3.7)$$

где $I_{Cуд}$ — утроенное значение собственного емкостного тока 1 км кабельной линии 6 кВ (табл. 2); l — длина линии, км; m — число кабелей в линии.

В сетях с изолированной нейтралью чувствительность земляной защиты не рассчитывается, однако необходимо обеспечить условие для ее срабатывания:

$$I_{C\Sigma} - I_{C3} > I_{C.3},$$

где $I_{C\Sigma}$ — утроенное значение суммарного емкостного тока замыкания на землю всей сети, к которой подключен АД, в нормальном режиме работы сети; I_{C} — см. (3.2); $I_{C.3}$ — см. (3.1).

В сетях с нейтралью, заземленной через резистор, чувствительность земляной защиты определяется значением защищаемой части обмотки статора АД, считая от фазных выводов:

$$\rho = 1 - k_{\chi} \frac{I_{C.3}}{I_3}, \quad (3.8)$$

где k_{χ} — коэффициент чувствительности, который можно принять равным 1,2; $I_{C.3}$ — ток срабатывания земляной защиты АД по (3.1); I_3 — полный ток замыкания

на землю с учетом активной составляющей, определяемой сопротивлением резистора в нейтрали.

Активная составляющая тока замыкания на землю, определяемая сопротивлением резистора в нейтрали, вычисляется по следующей формуле:

$$I_{3.a} = \frac{U_{\Phi}}{R}, \quad (3.9)$$

где R — сопротивление резистора в нейтрали.

Полный ток замыкания на землю равен:

$$I_3 = \sqrt{\left(\frac{U_{\Phi}}{R}\right)^2 + (I_{C\Sigma} - I_C)^2}. \quad (3.10)$$

В случае заземления нейтрали через резистор с сопротивлением 100 Ом, емкостной составляющей тока замыкания на землю можно пренебречь (она пойдет в запас), а ток замыкания на землю будет определяться по (3.9).

Значение ρ должно быть больше 0,5.

3.2. ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ОБМОТКЕ СТАТОРА, ВЫПОЛНЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ РЕЛЕ РТ-40, РТ-50 И РТЗ-51

Если защиты АД собраны из отдельных реле, то защита от замыкания на землю в обмотке статора выполняется с помощью реле РТЗ-51, подключаемого к ТТ типа ТЗЛМ. Если кабельная линия, связывающая двигатель с питающей секцией, состоит из нескольких кабелей, то ТТ типа ТЗЛМ устанавливаются на каждой кабеле и их вторичные обмотки, соединенные по условию согласования нагрузок парал-

лельно, подключаются к одному реле РТЗ-51.

Вторичный ток ТТНП зависит от вторичной нагрузки и от числа ТТ, подключенных к реле, поэтому коэффициент трансформации таких ТТ не является величиной постоянной.

В табл. 3 приведены минимальные и максимальные значения первичных токов срабатывания реле РТЗ-51 при подключении защиты к ТТНП типа ТЗЛМ, установленным на нескольких кабелях и соединенным параллельно. При выборе тока срабатывания РЗ следует по табл. 3 определить возможность установки на реле РТЗ-51 расчетного тока срабатывания. Если расчетный ток срабатывания оказался меньше минимального тока срабатывания, то за уставку следует принимать минимально возможный ток.

Допускается выполнение защиты с помощью реле РТЗ-50 и РТ-40/0,2, подключаемых к ТТНП. Кроме того, в эксплуатации находится большее число земляных защит, выполненных на реле РТЗ-50 и РТ-40/0,2 и подключенных к ТТНП типа ТЗРЛ и ТЗЛ, и при замене старых реле на РТЗ-51 возможно подключение реле РТЗ-51 к ТТНП типа ТЗРЛ и ТЗЛ. Поэтому в табл. 4 даны зна-

Таблица 3. Значения первичных токов срабатывания реле РТЗ-51 при подключении его к ТТНП типа ТЗЛМ

Количество ТЗЛМ.....	1	2	3	4
Минимальный ток срабатывания, А	0,67	0,89	1,08	1,33
Максимальный ток срабатывания, А	4,12	4,62	5,1	5,65

Примечание. Таблица составлена по данным [1].

Таблица 4. Минимальные первичные токи срабатывания защит от замыкания на землю с ТТНП типов ТЗЛМ, ТЗРЛ, ТЗЛ

Тип реле	Тип ТТ	Количество ТТ			
		1	2	3	4
РТ-40/0,2	ТЗЛМ	8,6	11,5	13,0	—
	ТЗРЛ	20	25	—	—
	ТЗЛ	7,0	9,0	—	—
РТЗ-50	ТЗЛМ	3,4	3,9	4,2	—
	ТЗЛ	3,5	4,0	—	—
РТЗ-51	ТЗЛМ	0,81	1,0	1,2	1,52
	ТЗЛ	0,68	0,97	1,19	1,43

Примечания: 1. Токи указаны в амперах при уставках срабатывания реле РТ-40/0,2 равных 100 мА (параллельное соединение обмоток), РТЗ-50—30 мА, РТЗ-51 — 20 мА.
2. Таблица составлена по данным [7].

чения минимальных токов срабатывания реле РТЗ-51, РТЗ-50, РТ-40/0,2, подключенных к разным типам ТТНП.

При использовании для защиты реле РТ-40/0,2 или РТЗ-50 вторичные обмотки ТТНП следует соединять параллельно.

Пример 4. Расчет защиты от замыкания на землю обмотки статора АД $P = 5000$ кВт.

Исходные данные: $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\cos \varphi = 0,92$, $\eta = 0,96$. Электродвигатель подключен к распределительству двумя кабелями 6 кВ $s = 240$ мм², $\ell = 40$ м. Сеть 6 кВ работает с заземлением нейтрали через резистор 100 Ом.

Принимаем к установке защиту с реле РТЗ-51, подключенную к двум ТТНП типа ТЗЛМ, которые включены параллельно.

Первичный ток срабатывания выбираем по условию отстройки от броска собственного емкостного тока АД и кабельной линии по формуле (3.1):

$$I_{\text{с.з}} = k_{\text{отс}} k_6 I_C = 1,2 \cdot 1,3 I_C.$$

Собственный емкостной ток присоединения I_C равен по формуле (3.2):

$$I_C = I_{\text{САД}} + I_{\text{Сл}}.$$

Собственный емкостной ток АД (утроенное значение) по формуле (3.6):

$$I_{\text{САД}} = 0,0172 S_{\text{ном АД}}.$$

$$S_{\text{ном АД}} = \frac{P_{\text{ном АД}}}{\eta \cos \varphi} = \frac{5}{0,96 \cdot 0,92} = 5,65 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

$$I_{\text{САД}} = 0,0172 \cdot 5,65 = 0,0972 \text{ А}.$$

Собственный емкостной ток кабельной линии равен по формуле (3.7):

$$I_{\text{Сл}} = I_{\text{Суд}} l m =$$

$$= 1,45 \cdot 0,04 \cdot 2 = 1,16 \text{ А}.$$

Суммарный емкостной ток равен:

$$I_C = 0,0972 + 1,16 = 1,257 \text{ А}.$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{\text{с.з}} = 1,2 \cdot 1,3 \cdot 1,257 = 2,0 \text{ А}.$$

Определяем по табл. 3, что первичный ток срабатывания лежит между минимальным и максимальным током срабатывания (0,89—4,62), т. е. расчетный

ток срабатывания может быть установлен на реле РТЗ-51.

Проверяем долю защищаемой части обмотки статора АД по формуле (3.8), для этого определяем ток замыкания на землю по формуле (3.9):

$$I_{3.a} = \frac{U_{\Phi}}{R} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 100} = 36,4 \text{ А.}$$

Доля защищаемой части обмотки статора по формуле (3.9):

$$\rho = 1 - 1,2 \frac{2,0}{36,4} = 0,93,$$

т. е. больше 0,5.

3.3. ЗЕМЛЯНАЯ ЗАЩИТА, ВХОДЯЩАЯ В СОСТАВ КОМПЛЕКСНОГО УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ СЕРИИ ЯРЭ 2201

Земляная защита, входящая в состав комплекса ЯРЭ 2201, выполнена на той элементной базе и с теми же параметрами, что и реле РТЗ-51 и имеет пять дискретных уставок срабатывания: 0,02; 0,0315; 0,05; 0,08 и 0,125 А. При выборе первичного тока срабатывания защиты, как и для реле РТЗ-51, коэффициент, учитывающий бросок собственного емкостного тока, следует принимать для сетей с изолированной нейтралью $k_{\epsilon} = 2 \div 3$, а для сетей с нейтралью, заземленной через резистор, $k_{\epsilon} = 1,2 \div 1,3$.

Ориентировочные первичные токи срабатывания, соответствующие уставкам защиты при использовании защиты с ТТНП типа ТЗЛМ приведены в табл. 5. За первичный ток срабатывания РЗ следует принимать больший ток из диапазона, в котором оказался расчетный ток.

Время срабатывания защиты принимается минимальным.

Таблица 5. Значения первичных токов срабатывания земляной защиты в комплекте ЯРЭ 2201 при подключении к ТТНП типа ТЗЛМ

Уставка ЯРЭ 2201, А	Количество ТЗЛМ			
	1	2	3	4
0,02	0,65	0,9	1,1	1,3
0,0315	1,1	1,35	1,5	1,9
0,05	1,75	2,1	2,3	2,8
0,08	2,8	3,3	3,5	4,1
0,125	4,3	4,6	5,1	5,7

3.4. ЗЕМЛЯНАЯ ЗАЩИТА ЦИФРОВОЙ ЗАЩИТЫ АД ТИПА SPAM 150С, SPAC 802

Земляная защита, входящая в состав модуля SPCJ 4D34 защиты SPAM 150С (SPAC 802), имеет весьма малое потребление (20 мОм для номинального тока 5 А и 100 мОм для номинального тока 1 А) и при небольшом расстоянии от ТТНП до места установки защиты ТТНП будет работать в режиме близком к режиму КЗ. В этом случае вторичный ток будет практически всегда достаточен для срабатывания земляной защиты, ток срабатывания которой составляет от 1 до 100 % номинального тока (от 0,01 до 5 А). Таким образом, выбранный согласно §3.1 первичный ток срабатывания земляной защиты всегда может быть реализован на реле типа SPAM 150С (SPAC 802).

Ввод защиты на отключение производится установкой переключателя SGR1/8 = 1. При этом, если земляная защита подключена к ТТНП, то не вводится запрет действия защиты при больших фазных токах: SGF/3 = 0, SGF/4 = 0. Время срабатывания защиты принимаем минимальным $t_{c.з} = 0,05 \text{ с.}$

4. Выбор уставок срабатывания защиты АД от перегрузки

4.1. ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕГРУЗКИ, ВЫПОЛНЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ РЕЛЕ СЕРИИ РТ-40, РСТ-11, РСТ-13 И РТ-80

Первичный ток срабатывания РЗ от перегрузки выбирается по условию отстройки от номинального тока АД:

$$I_{с.з} = \frac{k_{отс}}{k_{в}} I_{дл\ АД}, \quad (4.1)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, равный 1,05 при действии РЗ на сигнал и 1,1—1,2 при действии РЗ на отключение; $k_{в}$ — коэффициент возврата реле, равный 0,8 для реле РТ-40 и РТ-80 и 0,9 для реле РСТ-11, РСТ-13; $I_{дл\ АД}$ — длительно допустимый ток АД.

В соответствии с ПУЭ [2] номинальная мощность АД должна сохраняться при отклонении напряжения до $\pm 10\%$, т. е. $I_{дл\ АД} = 1,1 I_{ном\ АД}$.

Таким образом, максимально возможное значение тока срабатывания РЗ от перегрузки при использовании реле РТ-40 составит

$$I_{с.з} = \frac{1,1}{k_{в}} 1,1 I_{ном\ АД} = 1,5 I_{ном\ АД}.$$

Выдержка времени РЗ от перегрузки выбирается из условия надежного несрабатывания защиты при пуске и самозапуске:

$$t_{с.з} \geq k_{зап} t_{пуск}, \quad (4.2)$$

где $k_{зап}$ — коэффициент запаса, принимаемый равным 1,3; $t_{пуск}$ — время пуска для АД, не подлежащих самозапуску, или время

самозапуска для АД, которые участвуют в самозапуске после исчезновения, а затем восстановления напряжения.

Для РЗ, выполненной с реле серии РТ-80, время срабатывания должно устанавливаться в независимой части времятоковой характеристики.

Время разворота АД вместе с механизмом наиболее точно определяется путем замера времени пуска агрегата при рабочих условиях. Для предварительной оценки времени разворота можно воспользоваться выражением:

$$t_{пуск} = \frac{0,1096 (J_{АД} + J_{М}) \times \dots \rightarrow}{P_{ном} \times \dots \rightarrow} \times \frac{(n_{ном}/100)^2}{\times (m_{max} k_u^2 - m_{тр})}, \quad (4.3)$$

где $t_{пуск}$ — время разворота, с; $J_{АД}$ и $J_{М}$ — динамические моменты инерции АД и механизма соответственно, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $n_{ном}$ — номинальное число оборотов в минуту, 1/мин; $P_{ном}$ — номинальная мощность АД, кВт; m_{max} — отношение максимального момента к номинальному; $m_{тр}$ — отношение статического момента сопротивления при трогании к номинальному; $k_U = U_{раб} / U_{ном}$.

Сети, питающие АД, должны быть запроектированы такими, чтобы время пуска и самозапуска было меньше допустимого времени, обеспечивающего устойчивость технологического режима и меньше допустимого времени по условию нагрева АД. В этом слу-

чае выбранное время срабатывания РЗ должно быть меньше действительного допустимого времени $t_{\text{доп}}$ теплового нагрева АД. Если известно $t_{\text{доп}}$, то время срабатывания РЗ от перегрузки может быть задано $t_{\text{с.з}} = (0,8 - 0,9) t_{\text{доп}}$.

В каталогах не указывается максимальное допустимое время пуска АД. По требованию заводы-изготовители могут выдать значения допустимого времени пуска по условию предельного нагрева статора и ротора при номинальном напряжении $t_{\text{доп.ном}}$. Допустимое наибольшее время разворота АД по условиям нагрева можно приближенно определить, используя (4.3), вводя в него в качестве $J_{\text{м}}$ максимально допустимое значение момента инерции приводимого механизма $J_{\text{м.доп}}$ для данного АД. При отклонении напряжения от номинального допустимое время пуска увеличивается обратно пропорционально квадрату напряжения и определяется по формуле:

$$t_{\text{доп.ном}} = t_{\text{доп.ном}} / k_U^2, \quad (4.4)$$

где $t_{\text{доп.ном}}$ — допустимое время пуска по условию нагрева при номинальном напряжении; $k_U^2 = U_{\text{пуск}} / U_{\text{ном}}$; $U_{\text{пуск}}$ — напряжение на выводах АД при самозапуске.

В формуле (4.4) принимается, что в течение всего процесса самозапуска напряжение на выводах обмотки статора остается неизменным. Но во время самозапуска группы АД напряжение с течением времени увеличивается. Поэтому при оценке допустимос-

ти самозапуска по условию нагрева обмотки статора АД в формуле (4.4) необходимо принимать усредненное напряжение за весь процесс самозапуска.

Допустимое время перегрева нагруженного АД при небольших перегрузках можно определить по приближенному выражению, ориентируемому на точку, заданную ГОСТ 183-74:

$$t_{\text{доп}} = \frac{150}{k_I^2 - 1}, \quad (4.5)$$

где $k_I = I / I_{\text{ном}}$ — ток перегрузки, отнесенный к номинальному току АД.

4.2. ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕГРУЗКИ, ВХОДЯЩАЯ В СОСТАВ КОМПЛЕКСНОГО УСТРОЙСТВА РЗ ТИПА ЯРЭ 2201

В РЗ устройство защиты типа ЯРЭ 2201 может входить РЗ от перегрузки с зависимой от тока выдержкой времени. Основными блоками РЗ являются блок преобразователей тока, на котором выставляются уставки пускового органа, и измерительный блок, на котором выставляются уставки выдержек времени. На блоке преобразователей тока предусмотрены две шкалы $I_{\text{в}}$ и K с дискретными уставками: $I_{\text{в}}$ от 1,5 до 5,0 А через 0,5 и K с двумя значениями 1 и 3. При установке $K = 3$ уставка пускового органа увеличивается в 3 раза.

Ток срабатывания пускового органа РЗ соответствует выражению:

$$I_{\text{ср ПО}} = 1,15 (I_{\text{в}} K)_{\text{уст}}. \quad (4.6)$$

Таким образом, ток срабатывания РЗ может быть установлен от $1,15 \cdot 1,5 = 1,725$ А до $1,15 \cdot 15 = 17,25$ А (вторичных).

Выдержка времени, которая реализуется РЗ, соответствует выражению:

$$t_{\text{ср}} = \frac{A_i}{I_*^2}, \quad (4.7)$$

где A_i — величина, характеризующая постоянную нагрева двигателя, $A_i = 100 \div 1000$ с с дискретностью уставки через 100 с; $I_* =$

$\frac{I k_{\text{сх}}}{(I_{\text{в}} K) K_f}$ — относительный ток перегрузки.

На измерительном блоке предусмотрена шкала временной характеристики T_i/T_M с дискретной уставкой от 0,1 до 1,0 через 0,1.

Между T_i/T_M и A_i существует следующая зависимость:

$$\frac{T_i}{T_M} = \frac{A_i}{A_{\text{max}}} = \frac{100 \div 1000}{1000}, \quad (4.8)$$

или

$$A_i = \frac{T_i}{T_M} 1000. \quad (4.9)$$

Подставив в формулу (4.7) выражение (4.9), получаем:

$$t = \frac{\frac{T_i}{T_M} 1000}{\left(\frac{I k_{\text{сх}}}{K_f (I_{\text{в}} K)_{\text{уст}}} \right)^2}. \quad (4.10)$$

Чтобы получить выражение для непосредственного определения уставки блока преобразователей тока, при которой приходит в

действие пусковой орган, выполним простейшие преобразования. Для возврата РЗ после кратковременной перегрузки, например, при нормальном пуске АД, необходимо, чтобы ток возврата пускового органа был больше максимального тока АД:

$$I_{\text{в}} \text{ПО} \geq \frac{I_{\text{длАД}} k_{\text{сх}}}{K_f} \quad \text{или}$$

$$I_{\text{ср}} \text{ПО} k_{\text{в}} \geq \frac{I_{\text{длАД}} k_{\text{сх}}}{K_f},$$

где $k_{\text{в}}$ — коэффициент возврата пускового органа,

$$1,15 (I_{\text{в}} K)_{\text{уст}} k_{\text{в}} \geq \frac{1,1 I_{\text{номАД}} k_{\text{сх}}}{K_f}. \quad (4.11)$$

Учитывая разброс в токе срабатывания пускового органа $I_{\text{ср}} \text{ПО} = (1,04 \div 1,26)(I_{\text{в}} K)_{\text{уст}}$ и принимая за расчетное условие наименьший ток срабатывания:

$$1,04 (I_{\text{в}} K)_{\text{уст}} k_{\text{в}} = 1,1 I_{\text{номАД}} \frac{k_{\text{сх}}}{K_f}. \quad (4.12)$$

В этом выражении отсутствует коэффициент надежности, так как обычно номинальный ток АД больше длительного тока нагрузки приводного механизма, что обеспечивает необходимый запас.

Из (4.12) с учетом того, что в устройстве ЯРЭ 2201 $k_{\text{в}} = 0,95$, определяем выражение для определения уставки пускового органа:

$$(I_{\text{в}} K)_{\text{расч}} = \frac{1,11 k_{\text{сх}} I_{\text{номАД}}}{1,04 \cdot 0,95 K_f} = 1,11 \frac{k_{\text{сх}}}{K_f} I_{\text{номАД}}. \quad (4.13)$$

Если полученное значение $(I_B K)_{\text{расч}}$ находится в диапазоне:

$1,5 \text{ A} \leq (I_B K)_{\text{расч}} \leq 5,0 \text{ A}$, то следует принимать $K = 1$, а

$$(I_B)_{\text{расч}} = (I_B K)_{\text{расч}}.$$

Если полученное значение $(I_B K)_{\text{расч}}$ находится в диапазоне:

$5,0 \text{ A} \leq (I_B K)_{\text{расч}} \leq 15 \text{ A}$, то следует принимать $K = 3$, а

$$(I_B)_{\text{расч}} = \frac{(I_B K)_{\text{расч}}}{3}.$$

За уставку $(I_B)_{\text{расч}}$ принимаем ближайшее оцифрованное значение по шкале I_B . При наладке устройства корректируется значение I_B таким образом, чтобы оно соответствовало (4.13).

Для получения уставки выдержки времени необходимо переделить $\frac{T_i}{T_M}$ из (4.10), где вместо I подставляется пусковой ток $I_{\text{пуск}}$, а вместо $t_{\text{ср}}$ — время пуска с учетом запаса ($k_{\text{зап}} t_{\text{пуск}}$):

$$\frac{T_i}{T_M} = \frac{k_{\text{зап}} t_{\text{пуск}} \left(\frac{k_{\text{пуск}} I_{\text{ном}} k_{\text{сх}}}{K_I (I_B K)_{\text{уст}}} \right)^2}{1000}, \quad (4.14)$$

где $k_{\text{зап}} = 1,3 \div 1,5$, если в качестве $t_{\text{пуск}}$ принимается время пуска АД с приводным механизмом; $k_{\text{зап}} = 0,8$, если в качестве $t_{\text{пуск}}$ принимается максимальное допустимое время разворота АД по условию нагрева.

За $\left(\frac{T_i}{T_M} \right)_{\text{уст}}$ принимается бли-

жайшее большее оцифрованное значение при условии, что за $t_{\text{пуск}}$ принимается время пуска АД с приводным механизмом, или за

$\left(\frac{T_i}{T_M} \right)_{\text{уст}}$ принимается ближайшее

меньшее оцифрованное значение при условии, что за $t_{\text{пуск}}$ принимается максимальное допустимое время разворота АД по условию нагрева.

Пример 5. Расчет уставок срабатывания защиты от перегрузки, входящей в состав комплексного устройства РЗ типа ЯРЭ 2201.

Исходные данные: АД мелничного вентилятора типа АЗ-12-52-4, $P = 630 \text{ кВт}$; $U_{\text{ном АД}} = 6 \text{ кВ}$; $I_{\text{ном АД}} = 76 \text{ А}$; кратность пускового тока $k_{\text{пуск}} = 5,7$; длительность пуска с механизмом $t_{\text{пуск}} = 9,5 \text{ с}$; $K_I = 150/5$; $k_{\text{сх}} = 1$.

В соответствии с (4.13) определяем уставку блока преобразователей тока:

$$(I_B K)_{\text{расч}} = \frac{1,11 \cdot 1,0}{150/5} 76 = 2,81 \text{ А}.$$

Поскольку $(I_B K)_{\text{расч}} < 5 \text{ А}$, принимаем $K = 1$.

Ближайшее значение $I_B = 3,0 \text{ А}$.

Ток срабатывания пускового органа при принятой уставке $(I_B K)_{\text{расч}}$ без корректировки, по (4.6):

$$I_{\text{ср ПО}} = 1,15 \cdot 3,0 \frac{150}{5} = 103,5 \text{ А},$$

или $1,36 I_{\text{ном АД}}$.

Уставку выдержки времени выбираем согласно (4.14):

$$\left(\frac{T_i}{T_M}\right)_{\text{расч}} = \frac{1,3 \cdot 9,5 \left(\frac{5,7 \cdot 76 \cdot 1,0}{150/5 \cdot 3,0}\right)^2}{1000} = 0,286.$$

Принимаем ближайшее большее значение

$$\left(\frac{T_i}{T_M}\right)_{\text{уст}} = 0,3.$$

Время срабатывания РЗ при пуске будет равно по (4.10):

$$t_{\text{с.р}} = \frac{0,3 \cdot 1000}{\left(\frac{5,7 \cdot 76 \cdot 1,0}{150/5 \cdot 3,0}\right)^2} = 12,9 \text{ с},$$

т. е. больше, чем $t_{\text{пуск}} = 9,5 \text{ с}$.

Таким образом, выставляют-ся уставки: по току $I_B = 3 \text{ А}$ (вторичных) при $K=1$, по времени

$$\left(\frac{T_i}{T_M}\right)_{\text{уст}} = 0,3.$$

4.3. ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ В ЦИФРОВОМ РЕЛЕ ТИПА SPAM 150С (SPAC 802)

Защита от тепловой перегрузки, входящая в модуль SPCJ 4D34 цифрового реле SPAM 150С, SPAC 802, включает в себя несколько устройств: РЗ от тепловой перегрузки во время работы, а также при пуске АД, РЗ от тепловой перегрузки, вызванной пусковым током (защита пускового режима), сигнализацию перегрузки, запрет повторного пуска после отключения от теп-

ловой защиты и счетчик суммарного времени запусков АД.

Защита от тепловой перегрузки осуществляется по экспоненциальной кривой, установившееся значение которой определяется квадратом тока нагрузки. Эта кривая определяется двумя уставками: током полной нагрузки I_θ и предельным временем нахождения АД в заторможенном состоянии t_{6x} (допустимое время заклинивания ротора).

Ток полной нагрузки I_θ — это отношение наибольшего длительно допустимого тока АД при окружающей температуре воздуха 40°С , приведенного к вторичной стороне ТТ, к номинальному току реле. Фирма АВВ рекомендует уменьшить I_θ в $1,05 \div 1,1$, если окружающая температура постоянно ниже 40°С , но в условиях эксплуатации АД в РФ не следует корректировать длительный допустимый ток в зависимости от температуры. Уставка t_{6x} равна времени срабатывания РЗ при входном токе, в 6 раз превышающем ток полной нагрузки при запуске из холодного состояния (допустимое время заклинивания ротора).

Ток срабатывания РЗ установлен равным току полной нагрузки I_θ , умноженному на коэффициент 1,05.

Время срабатывания РЗ определяется не только током перегрузки, но и предшествующим входным током, моделирующим нагрев АД перед началом перегрузки, и условиями пуска. В приложении приведены кривые срабатывания тепловой защиты АД без предварительной нагрузки

(из холодного состояния) и с нагрузкой.

Предусмотрена возможность изменения крутизны кривой срабатывания тепловой защиты в зависимости от коэффициента p . Для механизмов с особо тяжелыми условиями пуска коэффициент p выбирается минимальным ($p = 20\%$). При запуске АД прямым включением в сеть коэффициент p обычно принимается равным 50% . Для РЗ кабелей и АД с легкими условиями пуска коэффициент p равняется 100% .

Следует обратить внимание, что при $p = 50\%$ тепловая защита позволяет осуществить два последовательных пуска из холодного состояния АД и один пуск из горячего.

Постоянная времени нагрева t_h АД принимается равной $32 t_{6x}$. Меньшая скорость охлаждения АД в режиме покоя учитывается тем, что постоянная времени охлаждения t_c берется больше постоянной времени нагрева в k_c раз. Режим покоя определяется, когда ток двигателя снижается до $0,12 I_0$. Постоянная охлаждения t_c регулируется в пределах $(1 \div 64) t_h$ и ее следует выбирать равной $k_c = (2 \div 4) t_h$.

Защитой предусматривается сигнализация перегрузки θ_a , значение которой может быть равным $50\text{--}100\%$ теплового уровня, при котором РЗ действует на отключение (θ_l).

Предусматривается запрет последующего пуска после отключения защитой тепловой перегрузки θ_l , который устанавливается в процентах от теплового уровня отключения. Величина θ_l определяется соотношением

допустимого времени пуска из холодного и горячего состояний. Например, если допустимое время пуска из холодного состояния составляет 25 с, а из горячего 11 с, то уровень, при котором разрешается последующий пуск будет равен $(25 - 11) / 25 = 0,55$, т. е. θ_l должен быть меньше $55\% \theta_l$.

После прерывания и восстановления питания цифрового реле оперативным током РЗ от тепловой перегрузки устанавливается в состояние, соответствующем нагреву двигателя до 70% теплового уровня отключения. Это делается для того, чтобы при тяжелых условиях нагрузки АД отключение происходило за более короткое время. При нормальной нагрузке эквивалентный уровень нагрева АД быстро снижается до установившегося значения, определяемого током нагрузки.

Роль тепловой защиты выполняет и защита пускового режима. Эта РЗ имеет два исполнения: в виде простой максимальной токовой защиты МТЗ с независимой выдержкой времени (переключатель $SGF/7 = 0$) и в виде РЗ, основанной на вычислении теплового импульса, т. е. произведения квадрата пускового тока и времени пуска (переключатель $SGF/7 = 1$).

Для АД гредпочтительней использование защиты на принципе вычисления теплового импульса, так как при этом возможно увеличение допустимого времени запуска при низком напряжении питающей сети. Уставки защиты задаются током I_S в долях номинального тока реле и времени t_S . При использовании

принципа МТЗ с независимой выдержкой времени уставки I_S и t_S — это ток и время срабатывания защиты. При использовании принципа теплового импульса по току I_S соответствует пусковому току, а уставка по времени t_S соответствует времени запуска АД. Время запуска вычисляется от момента возрастания тока от $0,12 I_\theta$ до $1,5 I_\theta$ за время, меньше чем 60 мс, до момента снижения тока до $1,25 I_\theta$ на время более 100 мс. Подсчитывается произведение $I_S^2 t_S$, которое равно предельному тепловому воздействию при запуске АД. В течение запуска постоянно измеряется входной ток, который далее возводится в квадрат и умножается на текущее время запуска. Если полученное значение в какой-либо момент превышает произведение $I_S^2 t_S$, РЗ срабатывает и выдает сигнал на отключение.

В блоке защиты АД типа SPAM 150C предусмотрен счетчик суммарного времени запуска. При каждом запуске АД время длительности запуска прибавляется к содержимому счетчика Σt_{Si} . Если содержимое регистра превышает уставку Σt_{Si} , то реле запрещает перезапуск АД. Уменьшение значения счетчика определяется скоростью возврата (см. п. 4.3.3).

Следует обратить внимание, что устройством SPAM 150C (SPAC 802) регистрируются значения тока и времени при запуске, поэтому при первом пуске следует уточнить принятые расчетные значения пускового тока и времени пуска и при необходимости откорректировать уставки срабатывания РЗ от перегрузки.

4.3.1. Защита от тепловой перегрузки

Выбор уставок РЗ от тепловой перегрузки заключается в определении следующих величин: коэффициента p , тока полной нагрузки АД I_θ , допустимого времени заклинивания ротора $t_{\theta\kappa}$, постоянной времени охлаждения k_c , уровня предупредительной тепловой сигнализации θ_a , уровня запрета повторного пуска АД θ_i .

Выбор коэффициента крутизны тепловой характеристики p определяется условиями нагрева АД в продолжительном и кратковременном (пуске, самозапуске) режимах работы. Для АД с прямым пуском, для которых допускается два пуска подряд из холодного состояния и не более одного из горячего состояния, коэффициент принимается равным 50 %.

Коэффициент $p = 100$ % практически не используется для тепловой защиты АД, так как при этом не учитываются тепловые возможности АД — время пуска из горячего состояния составляет только примерно 10 % времени пуска из холодного состояния. Как уже указывалось, $p = 100$ % используется для РЗ от перегрузки кабелей и АД с весьма легкими пусками.

Значение p между 50 и 100 % следует выбирать только в том случае, если хорошо известны тепловые способности АД.

При тяжелых и продолжительных условиях пуска коэффициент p может приниматься меньше 50 %, однако использовать $p < 50$ % следует осторожно, так как в этом случае устройство тепловой защиты может разрешить

несколько пусков из горячего состояния. Так, при $p = 20\%$ время срабатывания РЗ из горячего состояния отличается от времени срабатывания из холодного состояния всего на 15 %.

Выбор уставки I_θ производится аналогично выбору уставки пускового органа РЗ от перегрузки защиты ЯРЭ 2201 с учетом следующего:

ток срабатывания РЗ от тепловой перегрузки согласно заводской информации составляет

$$I_{c.p} = 1,05 I_\theta; \quad (4.15)$$

ток возврата РЗ от тепловой перегрузки должен быть больше максимального длительного тока АД;

за максимальный длительный ток АД принимается ток

$$I_{дл АД} = 1,1 I_{ном АД} \quad [3];$$

коэффициент отстройки от длительного тока АД принимается $k_{отс} = 1,0$, так как в большинстве случаев коэффициент загрузки АД меньше 1,0 и $I_{дл АД} < 1,1 I_{ном АД}$;

коэффициент возврата РЗ $k_B = 0,95$;

погрешность измерения тока в РЗ от тепловой перегрузки составляет 2 %, поэтому введен коэффициент $k_{\Delta I} = 0,98$ в ток возврата РЗ;

коэффициент схемы ТТ $k_{сх} = 1$, так как ТТ соединены в полную звезду (при соединении ТТ в неполную звезду при симметричной перегрузке ток в обратном проводе равен току отсутствующей фазы и в этом случае $k_{сх} = 1$) и кроме того РЗ выбирает наибольший из входных токов, т. е.

использует принцип “максиселектора”.

С учетом вышеперечисленных условий без дополнительных пояснений производим следующие простейшие преобразования для получения условия выбора уставки по току РЗ от тепловой перегрузки I_θ :

$$k_{\Delta I} I_B = \frac{k_{отс} I_{дл АД}}{K_I};$$

$$k_B k_{\Delta I} I_{c.p} = \frac{k_{отс} \cdot 1,1 I_{ном АД}}{K_I};$$

$$1,05 k_B k_{\Delta I} I_\theta = \frac{k_{отс} \cdot 1,1 I_{ном АД}}{K_I};$$

$$I_\theta = \frac{k_{отс} \cdot 1,1 I_{ном АД}}{1,05 k_{\Delta I} k_B K_I I_{ном.p}} =$$

$$= \frac{1,0 \cdot 1,1 I_{ном АД}}{1,05 \cdot 0,98 \cdot 0,95 K_I I_{ном.p}};$$

$$I_\theta = 1,12 \frac{I_{ном АД}}{K_I I_{ном.p}}, \quad (4.16)$$

где $I_{ном.p}$ — номинальный ток реле.

Выбор уставки t_{6x} можно произвести двумя способами: аналитически и графически по кривым срабатывания тепловой РЗ.

Для аналитического выбора уставки t_{6x} воспользуемся формулой для определения времени действия РЗ, приведенной в [14]:

$$t = 32 t_{6x} \times \ln \frac{(I/I_\theta)^2 - (p/100) (I_p/I_\theta)^2}{(I/I_\theta)^2 - (I_{c.p}/I_\theta)^2}, \quad (4.17)$$

где I_θ , p , t_{6x} — уставки РЗ от тепловой перегрузки; I_p — длительная предшествующая нагрузка

АД; I — ток перегрузки; $I_{с.р}$ — ток срабатывания РЗ; $32 t_{6x}$ — постоянная нагрева АД.

Выражение (4.17) можно получить из (1.3) решением относительно времени с учетом, что превышение температуры пропорционально квадрату тока.

Если в качестве тока перегрузки принять пусковой ток АД и задаться расчетным допустимым временем действия при пусковом токе, то можно из (4.17) получить допустимое время заклинивания ротора t_{6x} :

$$t_{6x} = \frac{t_{\text{доп.расч}}}{32 \ln \frac{(I_{\text{пуск}}/I_{\theta})^2 - (p/100) (I_p/I_{\theta})^2}{(I_{\text{пуск}}/I_{\theta})^2 - (I_{с.р}/I_{\theta})^2}} \quad (4.18)$$

В качестве расчетного допустимого времени действия РЗ можно принимать:

при известном допустимом времени протекания пускового тока АД $t_{\text{расч}} = 0,9 t_{\text{доп}}$;

при известном времени пуска АД вместе с приводным механизмом $t_{\text{расч}} = (1,3 \div 1,5) t_{\text{пуск}}$.

Выразим отношение пускового тока, тока предшествующей нагрузки и тока срабатывания РЗ к току полной нагрузки, используя (4.16):

$$\begin{aligned} \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\theta}} &= \frac{k_{\text{пуск}} I_{\text{НОМ АД}} K_I}{K_I \cdot 1,12 I_{\text{НОМ АД}}} = \\ &= \frac{k_{\text{пуск}}}{1,12}; \quad (4.19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{I_p}{I_{\theta}} &= \frac{1,1 I_{\text{НОМ АД}} K_I}{K_I \cdot 1,12 I_{\text{НОМ АД}}} = \\ &= \frac{1,1}{1,12} \approx 1,0; \quad (4.20) \end{aligned}$$

$$\frac{I_{с.р}}{I_{\theta}} = \frac{1,05 I_{\theta}}{I_{\theta}} = 1,05. \quad (4.21)$$

Подставив в (4.18) полученные значения из (4.19), (4.20) и (4.21), получим окончательную формулу для определения допустимого времени заклинивания ротора:

$$t_{6x} = \frac{t_{\text{доп.расч}}}{32 \ln \frac{(k_{\text{пуск}}/1,12)^2 - (p/100) \cdot 1^2}{(k_{\text{пуск}}/1,12)^2 - 1,1025}} \quad (4.22)$$

Для определения времени срабатывания тепловой защиты при пуске из холодного состояния по выбранному t_{6x} воспользуемся выражением (4.17), где ток нагрузки предшествующего режима равен нулю $I_p = 0$:

$$t_{\text{хол}} = 32 t_{6x} \times \ln \frac{(k_{\text{пуск}}/1,12)^2}{(k_{\text{пуск}}/1,12)^2 - 1,1025}. \quad (4.23)$$

Для графического определения допустимого времени заклинивания ротора t_{6x} следует воспользоваться кривыми срабатывания тепловой защиты с предварительной нагрузкой (см. приложение) для соответствующего коэффициента p . По найденным значениям отношения пускового тока к току полной нагрузки $I_{\text{пуск}}/I_{\theta}$ (4.19) и расчетному допустимому действию РЗ находим соответствующую кривую t_{6x} или промежуточное значение t_{6x} путем экстраполяции между соседними обозначенными кривыми.

По кривым срабатывания тепловой защиты без предварительной нагрузки для $I_{\text{пуск}}/I_{\theta}$ согласно (4.19) и выбранному значению $t_{\text{бх}}$ определяем время срабатывания защиты при пуске из холодного состояния $t_{\text{откл.хол}}$.

Выбор постоянной времени охлаждения при остановленном АД определяется как отношение постоянной времени охлаждения к постоянной времени нагрева k_c . При отсутствии данных о постоянных нагрева и охлаждения следует k_c принимать равным $2 \div 4$.

Уровень запрета повторного пуска после действия тепловой защиты θ_i определяется по следующей формуле:

$$\theta_i \leq \frac{t_{\text{бх}} - t_{\text{пуск}}}{t_{\text{бх}}} \cdot 100. \quad (4.24)$$

Переключатель $SG4/2 = 0$ выдает сигнал запрета перезапуска АД.

Уровень предупредительной тепловой сигнализации выбирается равным $\theta_a = 80 \div 90$ % теплового уровня, при котором защита действует на отключение, при этом должно выполняться следующее условие $\theta_a > \theta_i$.

Переключатель $SGR1/1 = 1$ — предупредительная тепловая сигнализация формирует сигнал перегрузки.

4.3.2. Защита от пускового режима

При использовании этой РЗ в виде МТЗ с независимой поддержкой времени ток срабатывания I_S выбирается по условию обеспечения коэффициента чув-

ствительности $k_{\text{ч}} = 2$ в режиме пуска АД:

$$I_S = \frac{I_{\text{пуск}}}{k_{\text{ч}} K_I I_{\text{НОМ,Р}}} = \frac{k_{\text{пуск}} I_{\text{НОМ АД}}}{2 K_I I_{\text{НОМ,Р}}}. \quad (4.25)$$

Увеличенный коэффициент чувствительности учитывает уменьшение пускового тока при снижении напряжения при самозапуске. При необходимости можно вместо пускового тока принимать минимально возможный ток по АД в режиме группового самозапуска.

Время срабатывания РЗ t_S в режиме МТЗ должно превышать время пуска АД.

При использовании принципа вычисления теплового импульса уставка по току I_S должна выбираться равной пусковому току АД при включении на полное напряжение питающей сети:

$$I_S = \frac{k_{\text{пуск}} I_{\text{НОМ АД}}}{K_I I_{\text{НОМ,Р}}}. \quad (4.26)$$

В качестве уставки по времени t_S в РЗ пускового режима на принципе вычисления теплового импульса принимаем:

при известном допустимом времени протекания пускового тока АД $t_S = 0,6 t_{\text{доп}}$;

при известном времени пуска АД вместе с приводным механизмом $t_S = (1,5 \div 1,7) t_{\text{пуск}}$.

Различие в коэффициентах при определении t_S по сравнению с п. 4.3.1 объясняется учетом погрешности срабатывания ± 10 % уставки $I^2 t$ (информация фирмы АВВ).

Следует обратить внимание на то, что погрешность ТТ улучшает отстройку за счет уменьшения вторичного тока.

4.3.3. Счетчик суммарного времени запусков

Выбор уставок срабатывания счетчика суммарного времени запусков заключается в определении допустимого суммарного времени запусков Σt_{S_i} и скорости снижения суммарного времени запусков $\Delta t_S / \Delta t$.

Если завод-изготовитель АД регламентирует максимальное число пусков n за определенное время m , то при времени единичного пуска t_S уставка Σt_{S_i} определяется, с

$$\Sigma t_{S_i} = (n - 1) t_S + 1,0. \quad (4.27)$$

Скорость снижения суммарного времени счетчика определяется по следующей формуле:

$$\Delta t_S / \Delta t = t_S / m, \quad (4.28)$$

где m — регламентируемый период времени, в течение которого допускается n пусков.

Пример 6. Расчет уставок срабатывания РЗ от перегрузки АД типа SPAM 150С (SPAC 802).

Исходные данные: АД дымососа типа ДА30-1910-12, $P = 1700$ кВт, $U_{\text{ном АД}} = 6$ кВ; $I_{\text{ном АД}} = 216$ А; $k_{\text{пуск}} = 4,9$; длительность пуска с дымососом ДО-31,5 $t_{\text{пуск}} = 10$ с; $K_I = 300/5$; схема соединения ТТ — полная звезда.

а) *Выбор уставок срабатывания РЗ от тепловой перегрузки.*

Так как АД имеет прямой пуск, АД нормального исполнения, то принимаем коэффициент крутизны характеристик $p = 50\%$.

Ток полной нагрузки I_{θ} выбираем согласно (4.16):

$$\begin{aligned} I_{\theta} &= 1,12 \frac{I_{\text{ном АД}}}{K_I I_{\text{ном,р}}} = \\ &= 1,12 \frac{216 \cdot 5}{300 \cdot 5} = 0,8, \end{aligned}$$

т. е. $I_{\theta} = 0,8 I_{\text{ном,р}}$ и уставка входит в диапазон тока I_{θ} технических данных РЗ.

Для выбора уставки t_{6x} определяем кратность пускового тока согласно (4.19)

$$\begin{aligned} k_{\text{пуск,расч}} &= \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\theta}} = \frac{k_{\text{пуск}}}{1,12} = \\ &= \frac{4,9}{1,12} = 4,4. \end{aligned}$$

В качестве расчетного времени $t_{\text{расч}}$ принимается:

$$t_{\text{расч}} = 1,3 t_{\text{пуск}} = 1,3 \cdot 10 = 13 \text{ с.}$$

Определяем допустимое время заклинивания ротора согласно (4.22)

$$t_{6x} = \frac{13}{32 \ln \frac{4,4^2 - 0,5(1/1,05)^2}{4,4^2 - 1,1025}} = 12,6 \text{ с.}$$

Время срабатывания РЗ при пуске АД из холодного состояния согласно (4.23)

$$\begin{aligned} t_{\text{хол}} &= 32 \cdot 12,6 \ln \frac{4,4^2}{4,4^2 - 1,1025} = \\ &= 23,6 \text{ с.} \end{aligned}$$

Те же величины определяем графически по рис. П4 для $I_{\text{пуск}}/I_{\theta} = 4,4$ и $t_{\text{расч}} = 13$ с: получаем $t_{6x} = 13$ с.

По рис. П2 для $k_{\text{пуск.расч}} = 4,4$ и $t_{6x} = 13$ с определяем время срабатывания РЗ при пуске АД из холодного состояния $t_{\text{откл.хол}} = 23$ с.

Постоянная времени охлаждения АД неизвестна, поэтому принимаем $k_c = 4$.

Уровень запрета повторного пуска определяем согласно (4.18)

$$\theta_i \leq \frac{23 - 10}{23} \cdot 100 = 56 \%$$

Принимаем $\theta_i = 60 \%$.

Уровень предупредительной тепловой сигнализации выбираем равным $\theta_a = 80 \%$ уровня, при котором РЗ действует на отключение.

Таким образом, должны быть заданы следующие уставки защиты от тепловой перегрузки: $p = 50 \%$; $I_{\theta} = 0,8 I_{\text{ном.р}}$; $t_{6x} = 23$ с; $\theta_i = 60 \%$; $\theta_a = 55 \%$; $k_c = 4,0$.

Переключатель SGR1/1 = 1 — предупредительная тепловая сигнализация формирует сигнал перегрузки.

Переключатель SG4/2 = 0 — вводится запрет перезапуска.

б) *Выбор уставок срабатывания РЗ пускового режима.*

Для защиты пускового режима используем принцип вычисления теплового импульса.

Уставку пускового тока I_S определяем согласно (4.26)

$$I_S = \frac{4,9 \cdot 216}{60 \cdot 5} = 3,53 I_{\text{ном.р}}$$

Уставку времени пуска принимаем

$$t_S = 1,5 \cdot 10 = 15 \text{ с.}$$

Переключатель SGF/7 = 1 — используется принцип, основанный на вычислении теплового импульса.

Переключатель SG4/1 = 0 — РЗ запускается при возрастании тока от $0,12 I_{\theta}$ до $1,5 I_{\theta}$.

в) *Выбор уставок срабатывания счетчика суммарного времени запусков.*

В соответствии с ГОСТ АД разрешается пускать 2 раза из холодного состояния, после чего следующий пуск допускается по истечении 30 мин, поэтому уставку Σt_{Si} выбираем согласно (4.27):

$$\Sigma t_{Si} = (2 - 1) 10 + 1 = 11 \text{ с.}$$

Скорость снижения суммарного времени счетчика определяем согласно (4.28):

$$\Delta t_S / \Delta t = \frac{10}{0,5} = 20 \text{ с/ч.}$$

Однако эта функция защиты не сможет предотвратить второй пуск из горячего состояния, если двигатель проработал более 1 ч. В этом случае запрет пуска будет осуществляться защитой тепловой перегрузки.

5. Выбор уставок срабатывания РЗ от несимметричных режимов работы в цифровом реле типа SPAM 150C (SPAC 802)

Несмотря на то, что несимметричные режимы работы АД весьма опасны, Правилами не регламентирована необходимость установки РЗ от такого режима. Только в микропроцессорной РЗ АД типа SPAM 150C (SPAC 802) предусмотрена РЗ от несимметричной работы. Несимметричность режима работы определяется разностью наибольшего и наименьшего фазных токов, отнесенной к наибольшему фазному току. Время срабатывания зависит от степени небаланса и уставки базового времени срабатывания t_{Δ} . Зависимость времени срабатывания от тока небаланса показана на рис. П6. При минимально различимом значении небаланса $\Delta I = 10\%$ время срабатывания равно уставке t_{Δ} . В случае обрыва одной из фаз время срабатывания минимально и равно 1 с.

При токах нагрузки, меньших номинальных, для предотвращения необоснованных отключений РЗ загроубляется.

Переключателем SGF/5 = 1 РЗ вводится на отключение.

Переключателем SGR1/5 = 1 РЗ вводится на сигнал.

Ток срабатывания защиты выбираем по условию отстройки от допустимого продолжительного несимметричного режима:

$$\Delta I = \frac{k_n}{k_B} \Delta I_{\text{доп}}. \quad (5.1)$$

Согласно [7] АД допускают примерно такую же несимметрию, как и синхронные неявнополюсные генераторы, т. е. до-

пускают разность токов в фазах 12 % при условии, что ни в одной из фаз ток не должен превышать номинального.

Принимая $k_n = 1,2$; $k_B = 0,95$, получаем:

$$\Delta I = \frac{1,2}{0,95} 12\% = 15\%. \quad (5.2)$$

С другой стороны при регламентированном ГОСТ на качество электроэнергии допустимом значении напряжения обратной последовательности, равном 2 %, ток обратной последовательности по АД может достигать 11—13 %, а равенство токов в фазах может превышать 20 % номинального значения [7]. По этому условию ток срабатывания РЗ:

$$\Delta I = \frac{1,0}{0,95} 20\% = 25\%. \quad (5.3)$$

Выбираем ток срабатывания РЗ от несимметричных режимов по большему значению:

$$\Delta I = 25\%. \quad (5.4)$$

Время срабатывания РЗ t_{Δ} определяем:

по условию несрабатывания РЗ при максимально возможной несимметрии при близких двухфазных КЗ в сети, которые отключаются с выдержкой времени. В этом случае наибольшая несимметрия токов по АД, когда скольжение превышает критическое, достигает 50 %. Время срабатывания РЗ должно быть больше или равно:

$$t_{c.p} \geq t_{\text{откл}} \text{ КЗ} + \Delta t, \quad (5.5)$$

где $t_{\text{откл}} \text{ КЗ}$ — максимальное время отключения двухфазного КЗ,

при котором одно из линейных напряжений на выводах АД равно нулю; Δt — ступень селективности, $\Delta t = 0,4-0,5$ с.

По рис. П6 для найденного значения $t_{c.p}$ и $\Delta t = 50\%$ определяем прямую t_{Δ} или путем экстраполяции между соседними обозначенными прямыми, ту прямую t_{Δ} , которая определяет наименьшую допустимую уставку срабатывания РЗ $t_{\Delta min}$;

по условию допустимого времени протекания максимально возможных токов обратной последовательности. Так как нагрев определяется в первую очередь токами обратной последовательности, то продолжая аналогию с синхронными неявнополюсными генераторами, принимаем, что допустимое время протекания токов обратной последовательности выражается следующей формулой:

$$t_{доп} = \frac{A_2}{I_2^2}, \quad (5.6)$$

где A_2 — тепловой параметр, характеризующий нагрев АД токами обратной последовательности; I_2 — отношение наибольшего значения тока обратной последовательности, протекающего по обмотке статора АД, к номинальному току.

В связи с отсутствием данных по значению A_2 для АД, принимаем A_2 таким же, как и для генераторов с косвенным охлаждением: $A_2 = 40$.

Максимальное значение тока обратной последовательности, протекающего по обмотке статора АД, следует ожидать в режиме двухфазного КЗ вблизи шин, от которых питается АД, а также в режиме разрыва фазы на стороне высшего напряжения питающего

силового трансформатора со схемой соединения обмоток звезда — треугольник с изолированной нейтралью (при обрыве фазы непосредственно на выводах электродвигателя РЗ работает с наименьшей выдержкой времени 1 с).

Если принять, что сопротивление АД одинаково для токов прямой и обратной последовательности (АД остановился) и сопротивление трансформатора значительно меньше сопротивления АД, тогда соотношения между токами и напряжениями и их значения будут одинаковы как для двухфазного КЗ, так и для обрыва фазы на стороне звезды силового трансформатора.

В этом случае ориентировочно максимальное значение тока обратной последовательности можно определить так:

$$I_2^* max = \frac{U_2}{X_2} = \frac{0,5 U_{ном}^*}{1/k_{пуск}}. \quad (5.7)$$

Этому току обратной последовательности будет соответствовать разница в фазных токах, равная 50%, т. е. $\Delta I = 50\%$.

Таким образом, для получения максимального значения уставки по времени срабатывания РЗ необходимо по (5.6) определить допустимое время протекания токов обратной последовательности и по рис. П6 по найденному $t_{доп}$ и $\Delta I = 50\%$ определить прямую t_{Δ} или путем экстраполяции между соседними обозначенными прямыми ту прямую t_{Δ} , которая определяет наибольшую допустимую уставку срабатывания РЗ $t_{\Delta max}$.

Окончательное значение уставки срабатывания выбирается между t_{Δ} и $t_{\Delta min}$.

При действии РЗ на отключение — переключатель $SGF/5 = 1$. При переводе действия РЗ на сигнал (переключатель $SGF/5 = 0$, а переключатель $SGF1/5 = 1$) выдержку времени РЗ можно принимать такой, чтобы при $\Delta I = 50\%$ время срабатывания РЗ $t_{с.р}$ было бы равным согласно (5.5), т. е. $t_{\Delta min}$.

Пример 7. Расчет уставок срабатывания РЗ от несимметричных режимов АД типа SPAM 150С (SPAC 802). Исходные данные АД такие же, как в примере 6. Ток срабатывания РЗ от несимметричных режимов принимаем согласно (5.4):

$$\Delta I = 25\%.$$

Предположим, что максимальное время действия РЗ отходящих присоединений на шинах, от которых питается защищаемый АД дымососа, равно 2,0 с, тогда по рис. П6 при $\Delta I = 50\%$ и

по (5.5) $t_{с.р} = 2,0 + 0,5 = 2,5$ с определяем $t_{\Delta min} = 60$ с.

Для определения $t_{\Delta max}$ по (5.7) находим $I_{2* ном}$

$$I_{2* ном} = \frac{0,5}{1/4,9} = 2,45.$$

Согласно (5.6) определяем допустимое время протекания тока обратной последовательности:

$$t_{доп} = \frac{40}{2,45^2} = 6,7 \text{ с.}$$

По рис. П6 для $\Delta I = 50\%$ и $t_{доп} = 6,7$ с находим, что этой точке соответствует прямая с уставкой $t_{\Delta} > 120$ с.

Таким образом, необходимая уставка по времени срабатывания РЗ может быть принята между $t_{\Delta} = 120$ с и $t_{\Delta} = 60$ с.

Принимаем $t_{\Delta} = 80$ с.

Таким образом, принимаем к установке следующие уставки: $\Delta I = 50\%$ и $t_{\Delta} = 80$ с. Переключатель $SGR1/5 = 1$ — РЗ от несимметричных режимов работы действует на отключение.

6. Защита от потери нагрузки в цифровом реле типа SPAM 150С (SPAC 802)

В модуле SPCJ4D34 цифровой РЗ типа SPAM 150С (SPAC 802) предусмотрена защита от потери нагрузки, которая используется для РЗ приводов и АД при внезапной потере нагрузки. Эта РЗ обычно используется для защиты приводов конвейеров и погруженных помп, охлаждение которых производится перекачиваемой жидкостью. Эта же РЗ может быть использована для пуска блокировки при потере нагрузки в

цепочке технологической схемы производства.

Защита приходит в действие при снижении тока нагрузки до 30—80% тока полной нагрузки I_0 и имеет время срабатывания 2—600 с.

Уставки срабатывания этой РЗ в основном определяются требованиями технологического процесса.

Для вывода из работы этой РЗ служит переключатель $SGF/8 = 0$.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЛОКА РЗ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ТИПА SPAM 150С

Универсальное, многофункциональное реле для контроля и защиты трехфазных электроприводов, которые управляются контакторами или выключателями.

Сочетание ряда функций в одном реле: защита от тепловой перегрузки, четыре различных устройства контроля пуска, РЗ от КЗ, РЗ от замыканий на землю; РЗ от обрыва фаз и РЗ от потери нагрузки.

Развитая РЗ от тепловой перегрузки, которая учитывает как сильные кратковременные термические перегрузки защищаемого объекта, так и процесс длительной термической перегрузки машины.

Аварийные величины, вызвавшие два последние срабатывания, хранятся в памяти для дальнейшего анализа.

Входы I и 5 А у всех измерительных цепей.

Прямое цифровое показание: уставок, измеренных текущих значений, находящихся в памяти величин аварийных ситуаций, данных о срабатываниях и о состоянии объектов.

Быстрое изменение конфигурации реле в соответствии с требуемыми функциями конкретного объекта.

Высокая точность и стабильность за счет программного обеспечения.

Высокая устойчивость к воздействию электромагнитных помех и прочный алюминиевый кожух реле со степенью защиты IP54.

Высокая надежность в эксплуатации, в том числе благодаря встроенной системе самоконтроля и автодиагностики.

Порт последовательной передачи для сопряжения реле защиты АД с оптической или электрической шиной передачи данных и через нее с вышестоящим уровнем системы.

Применение

Реле защиты электродвигателей (ЭД) типа SPAM 150С (рис. П1) представляет собой комплектное многофункциональное реле в основном для защиты средних и больших трехфазных асинхронных и синхронных электродвигателей. Реле успешно применяется для электроприводов, которые управляются как контакторами, так и выключателями.

Реле защиты электродвигателей входит в семейство SPACOM, поэтому реле имеет порт передачи данных, с помощью которого реле можно сопрягать с так называемой шиной передачи данных SPA. Через шину можно передавать основные параметры привода на вышестоящий уровень системы, на котором информация используется для проектирования и контроля объекта, а также для анализа дефекта после аварии. Та же информация реле может быть выведена на его дисплей с помощью кнопок.

Реле типа SPACOM имеет систему самоконтроля, которая контролирует работоспособность как электроники, так и программ реле. Это решающим образом повышает надежность реле в эксплуатации и заодно — безопасность самой подстанции.

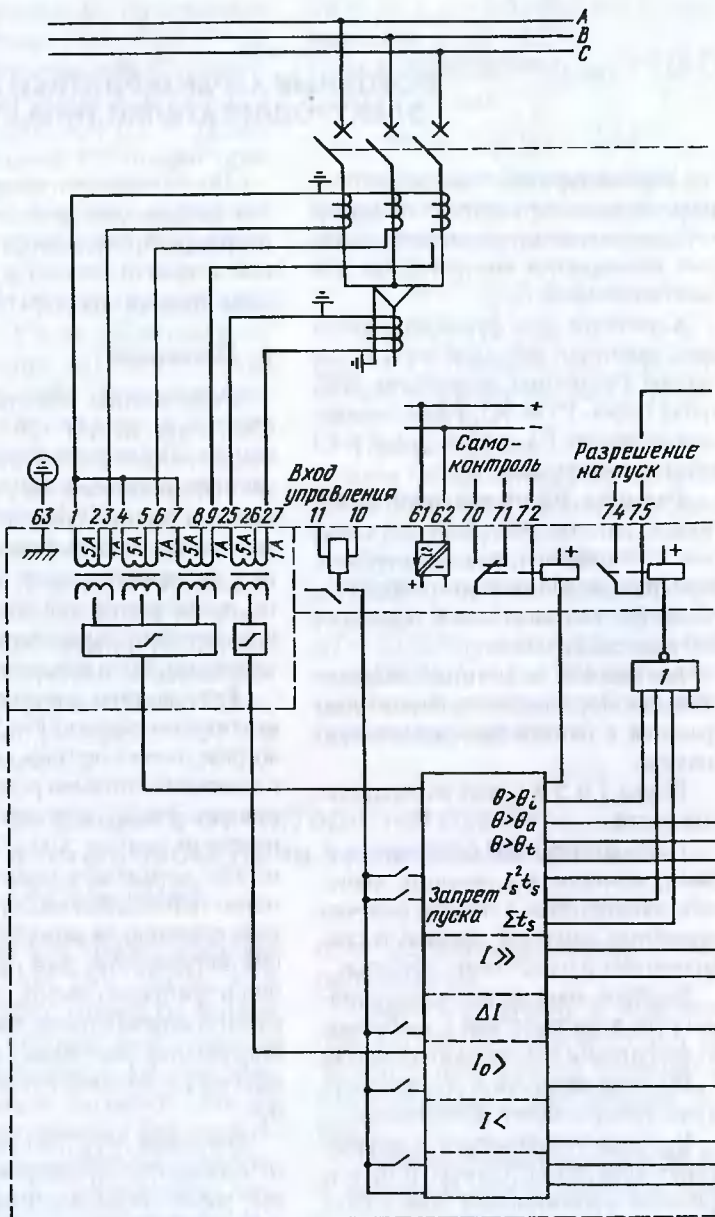
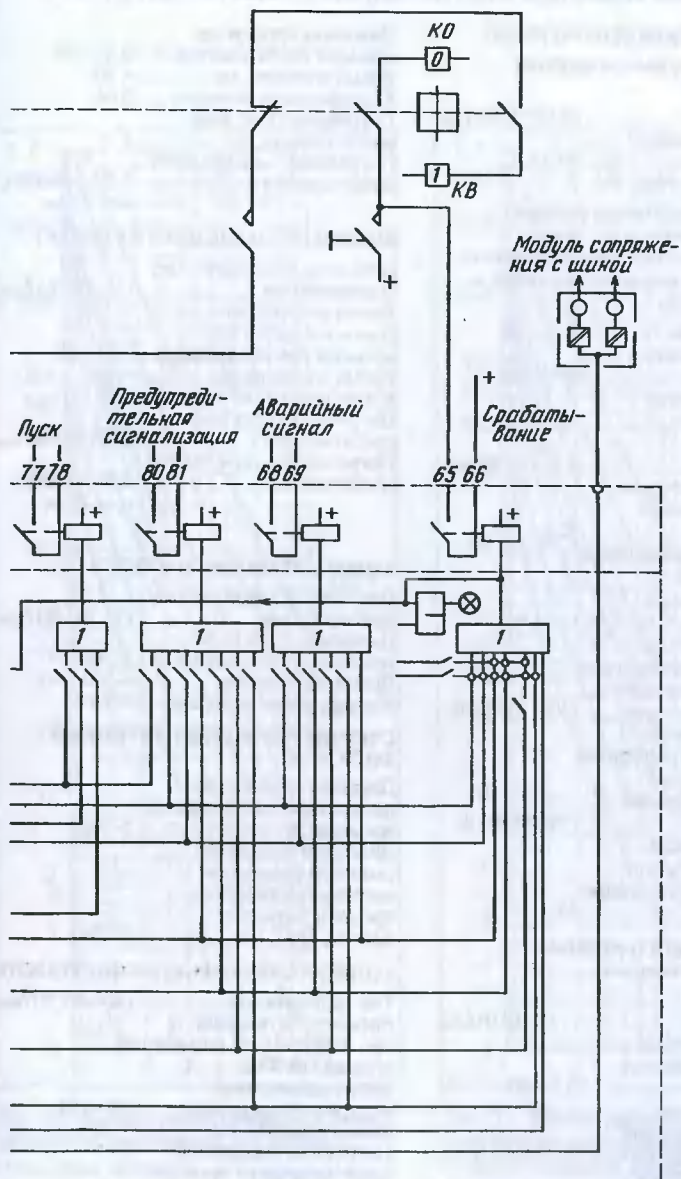


Рис. III. Структурная схема реле защиты электродвигателей типа SPAM 150С



Технические данные реле защиты электродвигателей типа SPAM 150C

ЗАЩИТА ОТ ТЕПЛОВОЙ ПЕРЕГРУЗКИ

Уставка по току полной нагрузки двигателя
 Диапазон уставок (0,50—1,50) $I_{ном}$
 Дискретность задания уставок 0,01 $I_{ном}$
 Погрешность по току, % ... 2

Уставка по допустимому времени заклинивания ротора $t_{бх}$, равная времени отключения электродвигателя при запуске из холодного состояния и входном токе $b_{л}$

Диапазон уставок, с 2,0—120
 Дискретность задания уставок, с 0,5—100
 Ступень увеличения счетчика времени, с 0,5
 Погрешность по времени 2 % или 25 мс
 Приближенное значение постоянной времени нагрева t_h 32 $t_{бх}$

Коэффициент охлаждения электродвигателя в состоянии покоя K_c , диапазон уставок (1—64) t_h
 Диапазон уставок по уровню предупредительной тепловой сигнализации θ_a , % уровня отключения (50—100 %) θ_t
 Диапазон уставок по уровню запрета повторного запуска перегретого двигателя θ_i , % уровня отключения (20—80 %) θ_t
 Кажущийся уровень нагрева двигателя при подаче или восстановлении питания, % 70

ЗАЩИТА ПУСКОВОГО РЕЖИМА (принцип теплового импульса)

Уставка по току срабатывания I_S (1,0—10,0) $I_{ном}$
 Диапазон уставок по времени срабатывания t_S , с 0,3—80
 Время возврата, мс < 400
 Точность определения теплового воздействия $\pm 10 \% I_S^2 t_S$
 Минимальное время срабатывания, мс около 400

ЗАЩИТА ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ КЗ

Диапазон уставок по току срабатывания (0,5—20,0) $I_{ном}$
 Время трогания, мс 50

Диапазон уставок по времени срабатывания, с ... 0,04—30
 Время возврата, мс < 80
 Коэффициент возврата 0,96
 Погрешность по току срабатывания, % 3
 Погрешность по времени срабатывания 2 % уставки или 25 мс

ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Диапазон уставок по току срабатывания (1—100 %) $I_{ном}$
 Время запуска, мс < 70
 Диапазон уставок по времени срабатывания, с ... 0,05—30
 Время возврата, мс < 80
 Коэффициент возврата 0,96
 Погрешность по току срабатывания 3 % + 0,0005 $I_{ном}$
 Погрешность по времени срабатывания 2 % уставки или 25 мс

ЗАЩИТА ОТ ПОТЕРИ НАГРУЗКИ

Диапазон уставок по току срабатывания (2—200 %) $I_{ном}$
 Диапазон уставок по времени срабатывания, с ... 2—60
 Время возврата, мс < 500
 Коэффициент возврата < 1,1

СЧЕТЧИК СУММАРНОГО ВРЕМЕНИ ЗАПУСКОВ

Диапазон уставок по допустимому суммарному времени запуска $\sum t_{Si}$, с 5—500
 Диапазон уставок по скорости снижения счетчика суммарного времени запусков $\Delta t_S / \Delta t$, с/ч 2—250

ЗАЩИТА ОТ НЕСИММЕТРИЧНОЙ РАБОТЫ

Ток трогания ΔI (10—40 %) I_{max}
 Время срабатывания t_d при наименьшей возможной уставке (10 %) с обратнoзависимой выдержкой времени, с 20—120
 Время возврата, мс < 250
 Погрешность времени срабатывания от уставки, % ± 10
 Время срабатывания при обрыве фазы, с 1
 Время срабатывания при нарушении чередования фаз, мс 600

Характеристики срабатывания защиты от токовой перегрузки

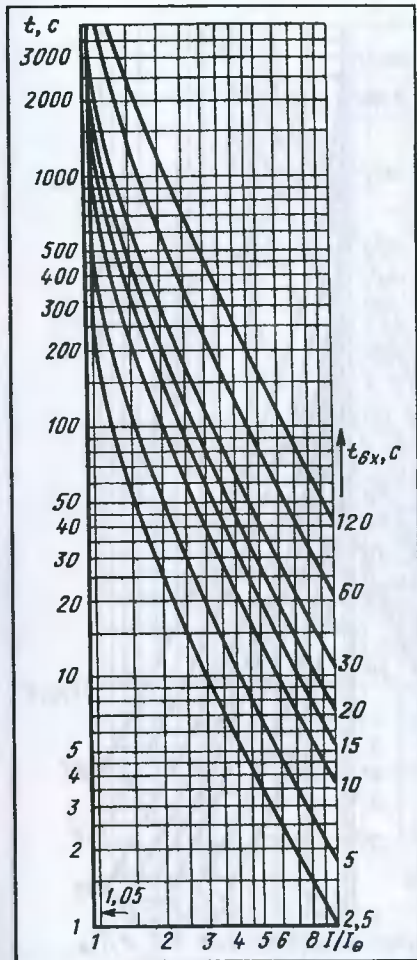


Рис. П2. Кривые срабатывания тепловой защиты без предварительной нагрузки ("холодные кривые")

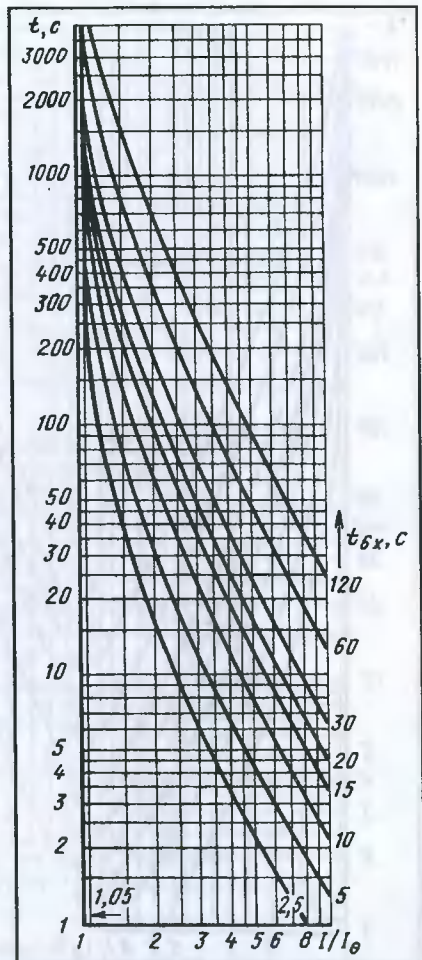


Рис. П3. Кривые срабатывания тепловой защиты с предварительной нагрузкой $1,0I_0$ ("горячие кривые"), $p = 50\%$

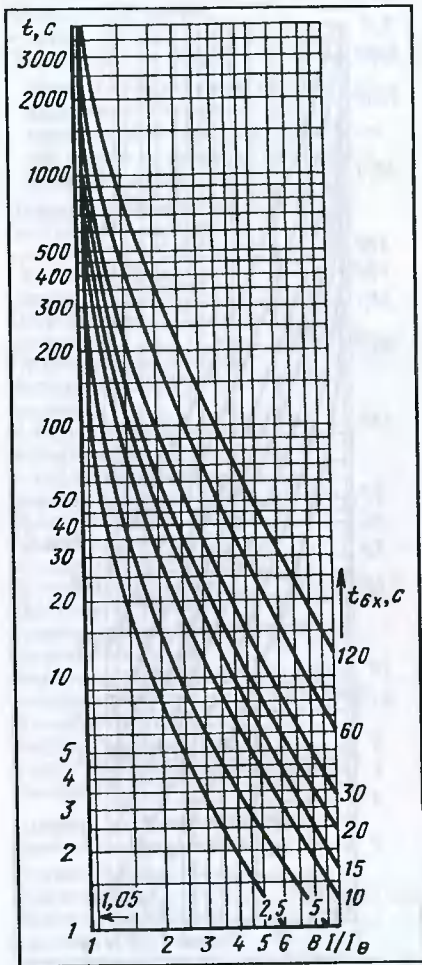


Рис. П4. Кривые срабатывания тепловой защиты с предварительной нагрузкой $1,0I_0$ ("горячие кривые"), $p = 75\%$

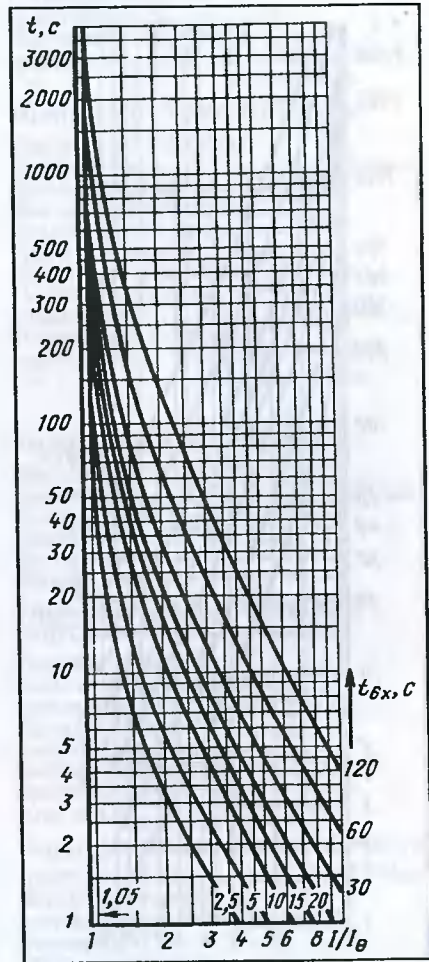


Рис. П5. Кривые срабатывания тепловой защиты с предварительной нагрузкой $1,0I_0$ ("горячие кривые"), $p = 100\%$

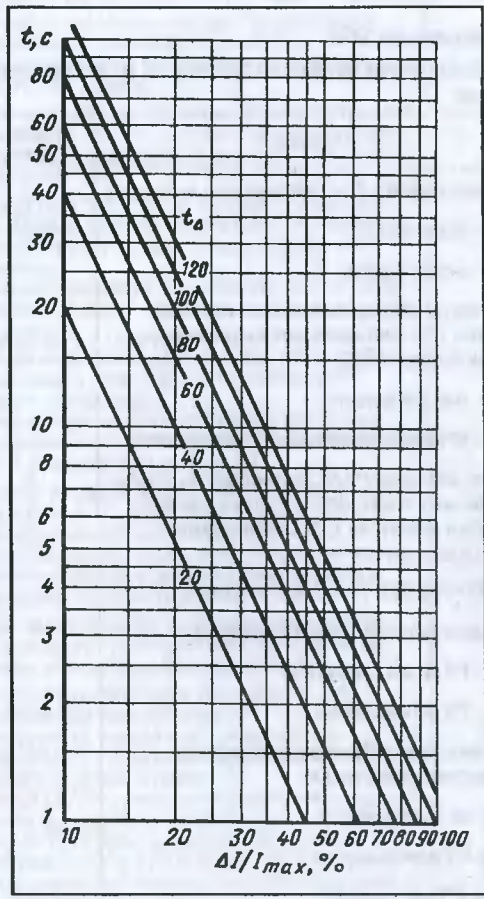


Рис. Пб. Кривые срабатывания РЗ от несимметричной работы при разных значениях t_Δ (20, 40, 60, 80, 100, 120 с)

Программируемые переключатели SPAM 150C

Дополнительные функции, определяемые конкретными случаями применения, задаются группами переключателей. На экране отображаются номера переключателей от 1 до 8 и положения переключателей 0 или 1 в режиме выставления уставок. В нормальном режиме при просмотре на экране показываются только контрольные суммы.

Группы переключателей SGF

Программируемые переключатели группы SGF используются для задания требуемых функций.

Переключатели	Функции	Заводская уставка	Контрольная сумма
SGF/1	Токовая отсечка $I_{>>}$ введена или выведена: 0 — выведена 1 — используется	1	1
SGF/2	Уставка по току срабатывания токовой отсечки $I_{>>}$ автоматически удваивается при включении ЭД: 0 — нет удваивания 1 — уставка автоматически удваивается	1	2
SGF/3	Запрет действия РЗ от замыканий на землю при фазных токах, больших тока полной нагрузки двигателя I_6 в определенное число раз SGF/3 = 0 и SGF/4 = 0 нет запрета	0	4
SGF/4		0	8
SGF/5	Ввод или вывод РЗ от небаланса фаз: 0 — РЗ не используется 1 — РЗ используется	1	16
SGF/6	Ввод или вывод РЗ от неправильной последовательности фаз: 0 — не используется 1 — РЗ используется	1	32
SGF/7	Выбор РЗ при запуске: 0 — токовая РЗ I_5 1 — РЗ от теплового воздействия $I_5^2 t_5$	1	64
SGF/8	Ввод или вывод РЗ $I < :$ 0 — РЗ не используется 1 — РЗ используется	0	128
	Контрольная сумма заводской уставки		115

Программируемые переключатели группы SGB

Программируемые переключатели группы SGB используются для определения функций внешнего сигнала управления реле

Переключатели	Функции	Заводская уставка	Контрольная сумма
SGB/1	Поступление информации о заклинивании от переключателя скорости ЭД (1). Этот сигнал используется для РЗ при запуске индукционных двигателей типа E*E. (0 — информация о заклинивании двигателя не поступает на вход)	0	1
SGB/2	Запрет перезапуска ЭД внешним управляющим сигналом (1). Может использоваться для управления перезапуском ЭД от внешних устройств автоматики	0	2
SGB/3	Когда SGB/3 = 1, подача внешнего управляющего сигнала блокирует действие РЗ от небаланса фаз. При отсутствии сигнала РЗ работает нормально. Может использоваться для блокировки РЗ при главном запуске	0	4
SGB/4	Когда SGB/4 = 1, подача внешнего управляющего сигнала блокирует действие РЗ от замыканий на землю, при отсутствии сигнала РЗ работает нормально. Может использоваться для предотвращения неправильного срабатывания РЗ из-за насыщения ТТ при главном запуске ЭД	0	8
SGB/5	Внешняя команда отключения выдается на выходное реле А (1). Благодаря этому другие РЗ могут действовать на выключатель ЭД. <i>Важно!</i> Внешний сигнал отключения не поддерживается модулем и должен образовываться контактами внешнего реле	0	16
SGB/6	Сброс реле внешним управляющим сигналом. Сброс может осуществляться оператором на станции или от устройств автоматики		
SGB/7	Защелка выходного реле отключения при срабатывании токовой отсечки $I_{>>}$, РЗ от замыканий на землю и от небаланса фаз. Когда SGB/7 = 0, выходное реле отключения возвращается при возврате РЗ. Когда SGB/7 = 1, выходное реле остается сработанным при исчезновении входного сигнала и возврате РЗ. Сброс защелки осуществляется нажатием кнопок PROGRAM и STEP, командой по последовательной связи или внешним управляющим сигналом	0	64
SGB/8	Защелка выходного реле отключения при срабатывании РЗ. Когда SGB/8 = 0, выходное реле отключения возвращается при возврате РЗ. Когда SGB/8 = 1, выходное реле остается сработанным при исчезновении входного сигнала и возврате РЗ. Сброс защелки осуществляется нажатием кнопок PROGRAM и STEP, командой по последовательной связи или внешним управляющим сигналом.	0	128
	Контрольная сумма заводской уставки		0

Группы переключателей SGRI и SGR2

Переключатели групп SGR1 и SGR2 используются для задания конфигурации выходных реле.

Переключатели группы SGRI

Переключатели	Функции	Заводская уставка	Контрольная сумма
SGR1/1	Когда SGR1/1 = 1, предварительный тепловой сигнал действует на SS2	1	1
SGR1/2	Когда SGR1/2 = 1, сигнал срабатывания тепловой защиты действует на SS2	0	2
SGR1/3	Когда SGR1/3 = 1, сигнал срабатывания P3 при запуске действует на SS2	0	4
SGR1/4	Когда SGR1/4 = 1, сигнал срабатывания токовой отсечки I >> действует на SS2	0	8
SGR1/5	Когда SGR1/5 = 1, сигнал срабатывания P3 от небаланса фаз действует на SS2	0	16
SGR1/6	Когда SGR1/6 = 1, сигнал срабатывания P3 от замыканий на землю действует на SS2	0	32
SGR1/7	Когда SGR1/7 = 1, сигнал срабатывания P3 от понижения тока действует на SS2	0	64
SGR1/8	Когда SGR1/8 = 1, сигнал срабатывания P3 от замыканий на землю действует на TS2	1	128
	Контрольная сумма заводской уставки		129

Программируемые переключатели SGR2

Переключатели	Функции	Заводская уставка	Контрольная сумма
SGR2/1	Когда SGR2/1 = 1, предварительный тепловой сигнал действует на SS1	0	1
SGR2/2	Когда SGR2/2 = 1, сигнал информации о запуске ЭД действует на SS1	1	2
SGR2/3	Когда SGR2/3 = 1, сигнал запуска токовой отсечки I >> действует на SS1	0	4
SGR2/4	Когда SGR2/4 = 1, сигнал отключения тепловой защиты действует на SS3	1	8
SGR2/5	Когда SGR2/5 = 1, сигнал отключения защиты при запуске действует на SS3	1	16
SGR2/6	Когда SGR2/6 = 1, сигнал P3 от небаланса фаз действует на SS3	1	32
SGR2/7	Когда SGR2/7 = 1, сигнал P3 от замыканий на землю действует на SS3	1	64
SGR2/8	Когда SGR2/8 = 1, сигнал P3 от понижения тока действует на SS3	1	128
	Контрольная сумма заводской уставки		250

Группы переключателей SG4

Группа переключателей программы содержит три переключателя. Контрольная сумма содержится в субменю SG4.

Переключатели	Функции	Заводская уставка	Контрольная сумма
SG4/1	Переключатель SG4 используется для выбора принципа вычисления величины $I_S^2 t_S$ при запуске (при SGF/7=1). Когда SG4/1 = 0, величина вычисляется при запуске. Когда SG4/1 = 1, величина начинает вычисляться при превышении уставки I_S	0	1
SG4/2	Когда SG4/2 = 1, сигнал разрешения перезапуска двигателя $TS1$ не выдается	0	2
SG4/3	Когда SG4/3 = 1, сигнал запуска P3 при запуске выдается на SSI	0	4
	Контрольная сумма заводской уставки		0

Список литературы

1. Релейная защита элементов сети собственных нужд 6,3 и 0,4 кВ электростанций с турбогенераторами. М.: Атомэнергопроект, 1987.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. — 15-е изд., перераб. и доп. М.; 1996.
4. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты. М.: Энергия, 1979.
5. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. — 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1995.
6. Кужеков С.Л., Чмыхалов Г.Н., Негримовский П.Я. Расчет уставок дифференциальных защит мощных электродвигателей // Экспресс-информация Информэнерго. Сер. Эксплуатация и ремонт электрических сетей. 1979. Вып. 9.
7. Корогодский В.И., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей выше 1 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1987.
8. Батраков А.И. Максимальная токовая защита на интегральной элементной базе асинхронных электродвигателей напряжением выше 1000 В от междуфазных коротких замыканий // Электрические станции, 1996, № 9.
9. Небрат И.Л. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты. Ч. 1 и 2. Изд. ПЭИпк, 1996.
10. Шабад М.А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. Ч. 1 и 2. Л.: Изд. ПЭИпк. 1995.
11. Собственные нужды тепловых электростанций/Под ред. Ю.М. Гододнова. М.: Энергоатомиздат, 1985.
12. Шабад М.А. Защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6—35 кВ. — 2-е изд., доп. Л.: Изд. ПЭИпк, 1997.
13. Линт Г.Э., Осечкин П.И., Сенаторов Д.В., Шевелев В.С. Опыт внедрения цифровой защиты электродвигателя SPAM 150С на Самарской ТЭЦ // Энергетик. № 4. 1997.
14. Technical information. Application examples for the relay SPAM 150С. 350 SPAM 04EN 1B. 1993-11-19.
15. Противоаварийный циркуляр от 11 октября 1984 г. № Ц-11-84(Э) "О повышении надежности собственных нужд 6 и 0,4 кВ энергоблоков".

Содержание

Предисловие	3
1. Виды повреждений и ненормальных режимов работы асинхронных электродвигателей и требования ПУЭ к выполнению релейной защиты	4
1.1. Защита от многофазных и витковых КЗ в обмотке статора	4
1.2. Защита от однофазных замыканий на землю в обмотке статора	6
1.3. Защита от перегрузки электродвигателей	7
1.4. Защита минимального напряжения	10
2. Выбор уставок срабатывания защит АД от многофазных КЗ	10
2.1. Расчет уставок срабатывания токовой отсечки АД	10
2.1.1. Токовая отсечка, выполненная с помощью реле серий РТ-40, РСТ-11, РСТ-13 и РТ-80	10
2.1.2. Токовая отсечка, входящая в состав комплексного устройства защиты серии ЯРЭ 2201	13
2.1.3. Токовая отсечка блока защиты АД типа SPAM 150C (SPAC 802/01)	13
2.2. Расчет уставок срабатывания дифференциальной токовой защиты АД	14
2.2.1. Дифференциальная защита АД с использованием реле типа РНТ-365	14
2.2.2. Дифференциальная защита АД с использованием реле типа ДЗТ-11	18
2.2.3. Дифференциальная защита АД с использованием реле типа РСТ-15	21
2.2.4. Упрощенный метод определения тока небаланса [6]	22
3. Выбор уставок срабатывания защиты от замыкания на землю в обмотке статора АД	23
3.1. Расчет первичного тока срабатывания защиты от замыкания на землю в обмотке статора	23
3.2. Защита от замыкания на землю в обмотке статора, выполненная с помощью реле РТ-40, РТЗ-50 и РТЗ-51	25
3.3. Земляная защита, входящая в состав комплексного устройства защиты серии ЯРЭ 2201	27
3.4. Земляная защита цифровой защиты АД типа SPAM 150C, SPAC 802	27
4. Выбор уставок срабатывания защиты АД от перегрузки	28
4.1. Защита от перегрузки, выполненная с помощью реле серии РТ-40, РСТ-11, РСТ-13 и РТ-80	28
4.2. Защита от перегрузки, входящая в состав комплексного устройства РЗ типа ЯРЭ 2201	29
4.3. Защиты от перегрузки в цифровом реле типа SPAM 150C (SPAC 802)	32
4.3.1. Защита от тепловой перегрузки	34
4.3.2. Защита от пускового режима	37
4.3.3. Счетчик суммарного времени запусков	38
5. Выбор уставок срабатывания РЗ от несимметричных режимов работы в цифровом реле типа SPAM 150C (SPAC 802)	40
6. Защита от потери нагрузки в цифровом реле типа SPAM 150C (SPAC 802)	42
<i>Приложение. Основные характеристики блока РЗ электродвигателей типа SPAM 150 C</i>	<i>43</i>
Список литературы	54
	55

Библиотечка электротехника

Приложение к производственно-массовому журналу "Энергетик"

АЛЕКСАНДРОВ АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

**Выбор уставок срабатывания защит асинхронных электродвигателей
напряжением выше 1 кВ**

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

109280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23

Телефоны: 275-19-06; 275-00-23 доб. 22-47

Редактор Л.Л. Жданова, Н.В. Ольшанская

Худож.-техн. редактор Т.Ю. Андреева

Корректор З.Б. Драновская

Сдано в набор 15.07.98 Подписано в печать 12.08.98

Формат 60×88 1/16. Печать офсетная.

Печ. л. 3,5. Тираж 600 экз. Заказ

Макет выполнен АО "Знак": 103012, Москва, Б. Черкасский пер., 2/10

Отпечатано типографией МЭИ: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 13.

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ
на журнал “Энергетик”
и приложение
“Библиотечка электротехника”

В России подписку должны оформить
в любом почтовом отделении связи.

Оба издания можно найти в объединенном
каталоге Госкомсвязи РФ “Подписка”
(Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы).

Индексы журнала “Энергетик”:

71108 — для предприятий и организаций;

71259 — для индивидуальных подписчиков.

Индексы “Библиотечки электротехника”

— приложения к журналу “Энергетик”:

88983 — для предприятий и организаций;

88982 — для индивидуальных подписчиков.

“Энергетик” и “Библиотечка электротехника” включены
также в подписные каталоги других стран СНГ
по договорам с АО “Агентство по распространению
зарубежных изданий” (АРЗИ).

Справки, где принимается подписка в этих государствах,
по телефонам АРЗИ в Москве:
(095) 280-83-65, 280-94-65.

Об авторе



Александр Михайлович Александров — опытный специалист по релейной защите, работает в ЦСРЗА “Ленэнерго” свыше 30 лет, заместитель начальника службы.

А.М. Александров — доцент Петербургского энергетического института повышения квалификации руководящих работников и специалистов Минтопэнерго РФ (ПЭИпк) по кафедре релейной защиты и автоматики электрических станций, сетей и энергосистем. Автор многих методических указаний по релейной защите, предназначенных для слушателей ПЭИпк.

Современная цифровая защита может продлить жизнь электродвигателей, если релейщики будут правильно настраивать защиты