

621.316.925
3-82

Библиотечка электротехника. 2012. № 12

О. Г. Захаров

**ЦИФРОВЫЕ
УСТРОЙСТВА
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.
АЛГОРИТМЫ
И УСТАВКИ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ
ЭНЕРГЕТИК**

Вниманию специалистов

Вышли в свет следующие выпуски

«Библиотечки электротехника»:

Арцишевский Я. Л., Задкова Е. А., Кузнецов Ю. П. **Техпереворужение релейной защиты и автоматики систем электроснабжения предприятий непрерывного производства**

Долгополов А. Г. **Релейная защита управляемых шунтирующих реакторов**

Беляков Ю. С. **Распределенные параметры в расчетах режимов электрических систем**

Киреева Э. А. **Современные приборы и устройства для измерения и контроля состояния коммутационного электрооборудования в системах электроснабжения: Справочные материалы**

Киреева Э. А. **Современные приборы и устройства для контроля работоспособности электрооборудования в системах электроснабжения: Справочные материалы (части 1 и 2)**

Каргин С. В., Краснова А. Н., Бекбулатов Р. Р. **Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях общего назначения**

Анчарова Т. В., Рашевская М. А. **Электроснабжение зданий (части 1 и 2)**

Ростик Г. В. **Поддержание живучести турбогенераторов**

Николаев В. Г., Ганага С. В., Перминов Э. М. **Состояние и перспективы развития мировой и отечественной ветроэнергетики (части 1 – 3)**

Алехнович А. Н. **Топочно-горелочные устройства пылеугольных котлов**

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **«ПРЕССА РОССИИ»**. Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы, а также в РЕДАКЦИИ.

Подписной индекс «Библиотечки электротехника» —
приложения к журналу «Энергетик»

88983

Адрес редакции
журнала «Энергетик»:

115280, Москва, ул. Автозаводская, д. 14/23.

Телефон (495) 675-19-06.

E-mail: energetick@mail.ru

Библиотечка электротехника

Приложение к журналу «Энергетик»

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 12 (168)

О. Г. Захаров

ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. АЛГОРИТМЫ И УСТАВКИ

Часть 1

**НИГРЭС
НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА**

Москва

НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик»

2012

55468

УДК 621.316.925

ББК 31.27-05

3 38

Главный редактор журнала «Энергетик» А. Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

«Библиотечки электротехника»

И. И. Батюк (*зам. председателя*), К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов,
А. Н. Жулев, В. А. Забегалов, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев,
Н. В. Лисицын, В. И. Пуляев, А. И. Таджикибаев

О. Г. Захаров

- 3 38 Цифровые устройства релейной защиты электродвигателей. Алгоритмы и уставки (Часть 1). — М.: НТФ «Энергопрогресс», 2012. — 82 с.: ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 12 (168)].

Рассмотрены цифровые устройства РЗ различных производителей и приведены описания используемых алгоритмов.

Приведены требования к РЗ электродвигателей, установленные в «Правилах устройства электроустановок», а также примеры расчетов и рекомендации по выбору уставок защиты для разных цифровых устройств.

Приведена информация по международным кодам ANSI алгоритмов защиты, применяемых для электродвигателей, и обширный систематизированный список литературы по цифровым устройствам, расчету уставок, а также нормативных документов.

Предназначено для специалистов, занимающихся настройкой и эксплуатацией цифровых устройств релейной защиты.

Предисловие

Для современного этапа развития энергетической отрасли России характерно широкое внедрение цифровых устройств защиты электродвигателей напряжением от 0,4 до 10 кВ.

Практически каждое предприятие, выпускающее цифровые устройства релейной защиты, предлагает ряд исполнения устройств, предназначенных для защиты асинхронных и асинхронных электродвигателей.

В этих устройствах предусмотрены как алгоритмы защиты от аварийных режимов, возникающих при работе любого электрического оборудования, так и специальные алгоритмы технологических защит, используемых в электроприводах.

В предлагаемой брошюре приведены систематизированные сведения об алгоритмах, обеспечивающих защиту электродвигателей и приводимых ими механизмов, и методики расчета уставок для этих алгоритмов.

Примеры расчета уставок, использованные в данной брошюре, основаны на материалах стандарта организации [40] и статьях [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52].

В брошюре приведены результаты исследований цифровых устройств БМРЗ-Д на физической модели [6], выполненные совместно со специалистами Вологодского государственного технического университета, а также использованы результаты работ, выполненных совместно с И. С. Фрейцисом [11, 12] на стендах ЦНИИ СЭТ.

Автор благодарит всех, кто любезно предоставил материалы по цифровым устройствам и ответил на возникшие у него при подготовке рукописи вопросы, и выражает особую признательность И. И. Батюку, поддержавшему идею издания брошюры.

Автор будет признателен всем, кто сочтет возможным поделиться своим мнением о данной брошюре (E-mail: olegzaharov@yandex.ru).

**Замечания и пожелания по брошюре
просим направлять по адресу:
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14.
Редакция журнала «Энергетик».**

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

Цифровые устройства защиты электродвигателей

1.1. Сравнительные характеристики цифровых устройств

Для защиты асинхронных и синхронных электродвигателей напряжением 6–10 кВ в настоящее время выпускают цифровые устройства «Сириус-Д» [75] (рис. 1.1), БМРЗ-ДА [73] (рис. 1.2), БМРЗ-100 (рис. 1.3).

В эксплуатации также используются цифровые устройства с микроконтроллером, выпускаемые ПАО «Электротехнический

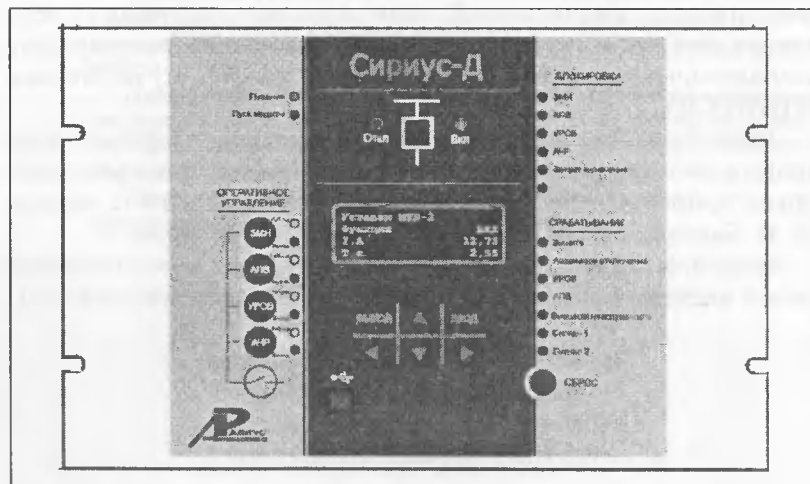


Рис. 1.1. Лицевая панель устройства «Сириус-Д»

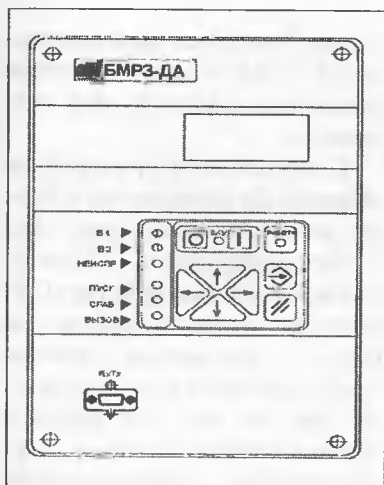


Рис. 1.2. Лицевая панель устройства БМРЗ-ДА

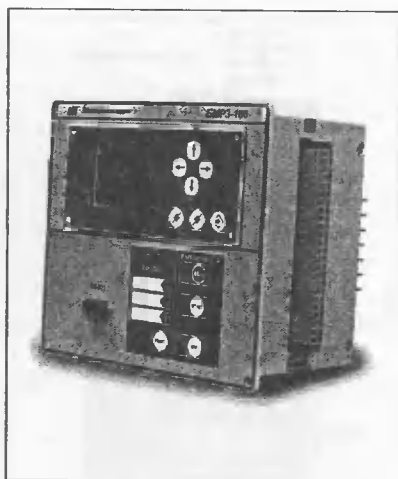


Рис. 1.3. Лицевая панель устройства БМРЗ-100

завод» [76, 77] для защиты электродвигателей напряжением до 0,4 кВ.

Устройство РДЦ-06 предназначено как для выступающего (рис. 1.4), так и для утопленного монтажа на панели шкафа управления.

Устройство РДЦ-01 (рис. 1.5) предназначено только для выступающего монтажа на лицевой панели.

Устройства «Сириус-Д» и БМРЗ-ДА состоят из съемных модулей, которые просто и быстро можно заменить на месте эксплуата-



Рис. 1.4. Лицевая панель устройства РДЦ-06

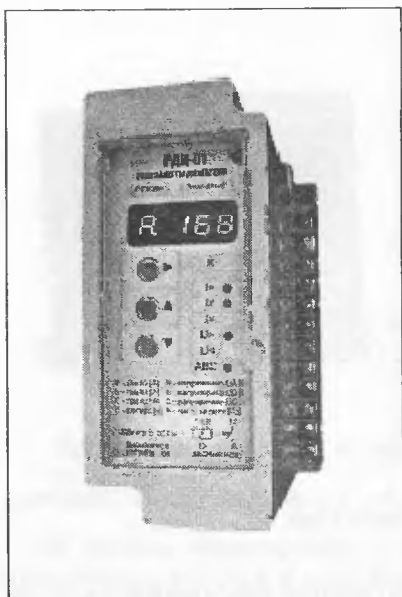


Рис. 1.5. Лицевая панель устройства РДЦ-01

тации. Благодаря наличию модулей обеспечивается высокая ремонтпригодность этих устройств.

Съемные модули устройств «Сириус-Д» вставляются в корпус устройства сзади (рис. 1.6).

Функциональное назначение модулей в устройстве «Сириус-Д» иллюстрируется на рис. 1.7. На модуле питания предусмотрена съемная крышка (см. на рис. 1.6 надпись «Отсек сменной батареи»), закрывающая гальванический элемент, предназначенный для питания цепей устройства, обеспечивающих ход часов и сохранение информации при выключении оперативного питания блока.

Аналоговые входы тока и напряжения разнесены по двум разным модулям (соединители X1 и X2 на рис. 1.6).

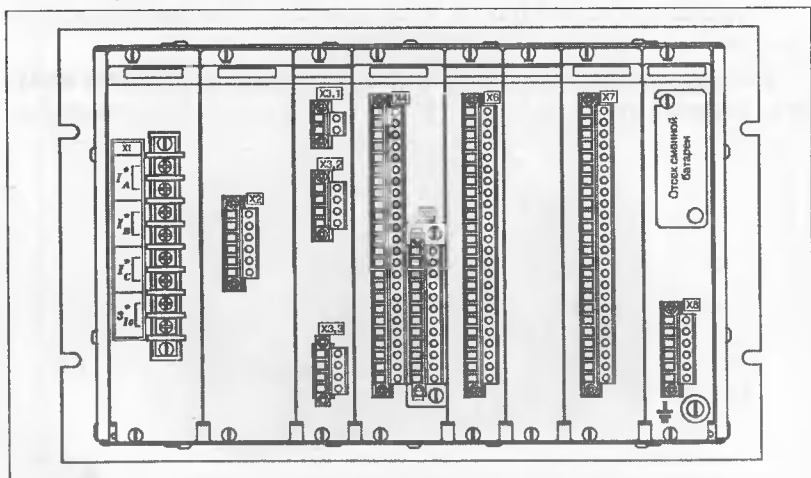


Рис. 1.6. Расположение модулей в устройствах «Сириус-Д»

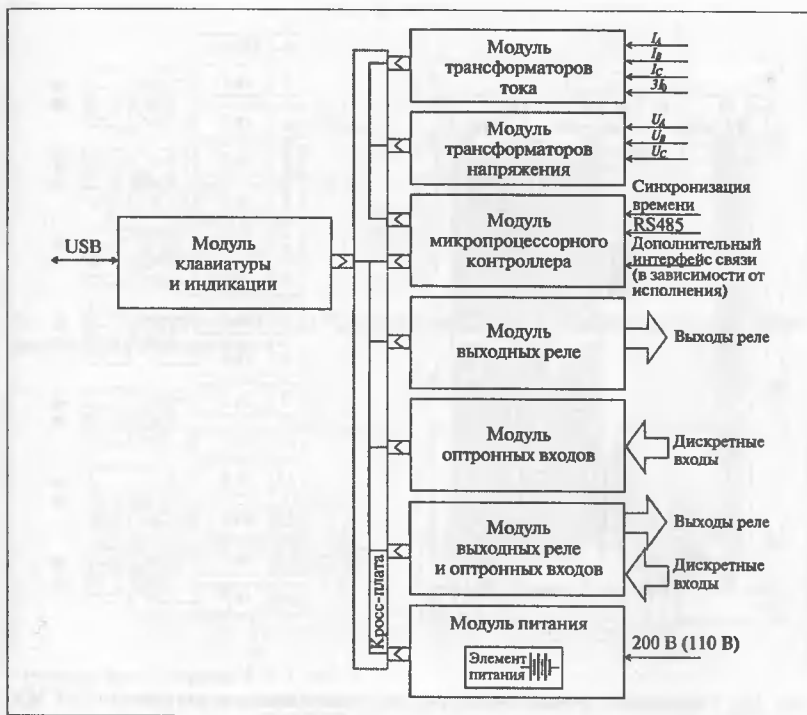


Рис. 1.7. Структурная схема устройства «Сириус-Д»

В устройстве БМРЗ-ДА установлено четыре съемных модуля (рис. 1.8):

- модуль аналого-цифрового процессора *МАЦП*, в котором расположены трансформаторы тока и напряжения и аналого-цифровой преобразователь;
- модуль центрального процессора *МЦП*;
- модуль ввода — вывода *МВВ*;
- модуль питания и ввода — вывода *МПВВ*.

В отличие от устройства «Сириус-Д» все аналоговые сигналы подходят к одному модулю *МАЦП* (см. соединители 11–13 на рис. 1.8).

В устройствах «Сириус-Д» и БМРЗ соединение всех модулей между собой обеспечивает *Кросс-плата* (см. рис. 1.7). Гальваническую развязку входных цепей во всех рассматриваемых устройствах обеспечивают оптроны.

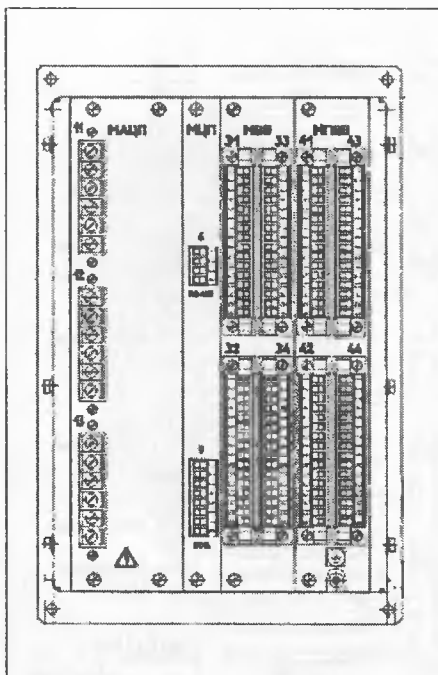


Рис. 1.8. Расположение модулей в устройстве БМРЗ-ДА

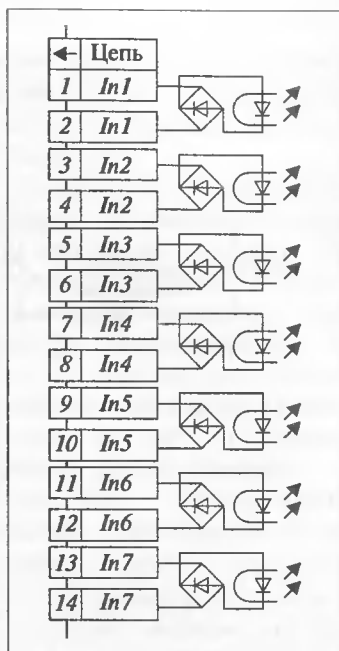


Рис. 1.9. Универсальные дискретные входы в устройстве МРЗС-05Д [66]

Дискретные входы могут быть универсальные (для переменного, постоянного и выпрямленного оперативного напряжения), как это сделано в блоках МРЗС-05Д (рис. 1.9), так и только для постоянного оперативного напряжения, как это предусмотрено в некоторых исполнениях блоков БМРЗ.

Все выпускаемые в настоящее время цифровые устройства предназначены для работы в системе АСУ. Например, устройства РДЦ-06 объединяют с помощью витой пары по интерфейсу RS485, подключая их по схеме, приведенной на рис. 1.10.

Для синхронизации внутреннего времени со временем в автоматической системе управления АСУ в блоках БМРЗ предусмотрен вход RS422 (рис. 1.11).

Аналогичный вход есть и в блоках «Сириус-Д» (см. сигнал «Синхронизация времени» на рис. 1.7).

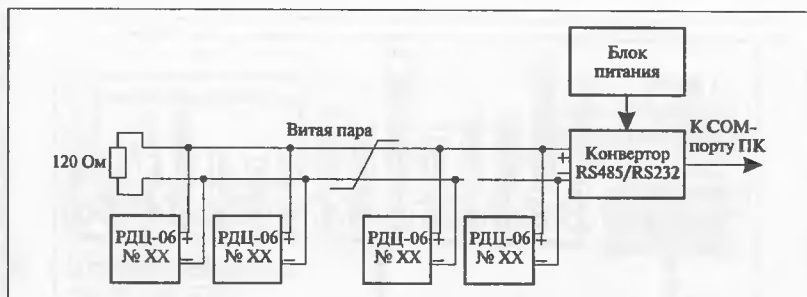


Рис. 1.10. Подключение блоков РДЦ-06 к персональному компьютеру или функциональному контроллеру

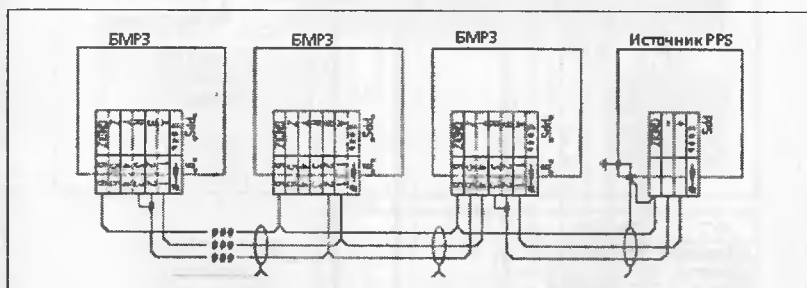


Рис. 1.11. Схема синхронизации внутренних часов блоков БМРЗ

Обратимся теперь к устройству РДЦ-06, структурная схема которого приведена на рис. 1.12.

В отличие от других устройств, в комплект поставки устройства РДЦ-06 входит датчик температуры (рис. 1.13), предназначенный для измерения температуры защищаемого электродвигателя. Информация, поступающая от датчика температуры, обрабатывается микроконтроллером и отображается на индикаторе в режиме «b». При отключенном датчике температуры на индикаторе в этом режиме высвечивается надпись «OFF».

Значение температуры электродвигателя отображается в диапазоне от -20 до $+100$ °C с дискретностью 1 °C. На лицевой панели устройства предусмотрен светодиод «Температура», (см. рис. 1.12), который начинает мигать при достижении температуры, °C:

$$T = (t_{уст} - 10),$$

где $t_{уст}$ — уставка по температуре, °C.

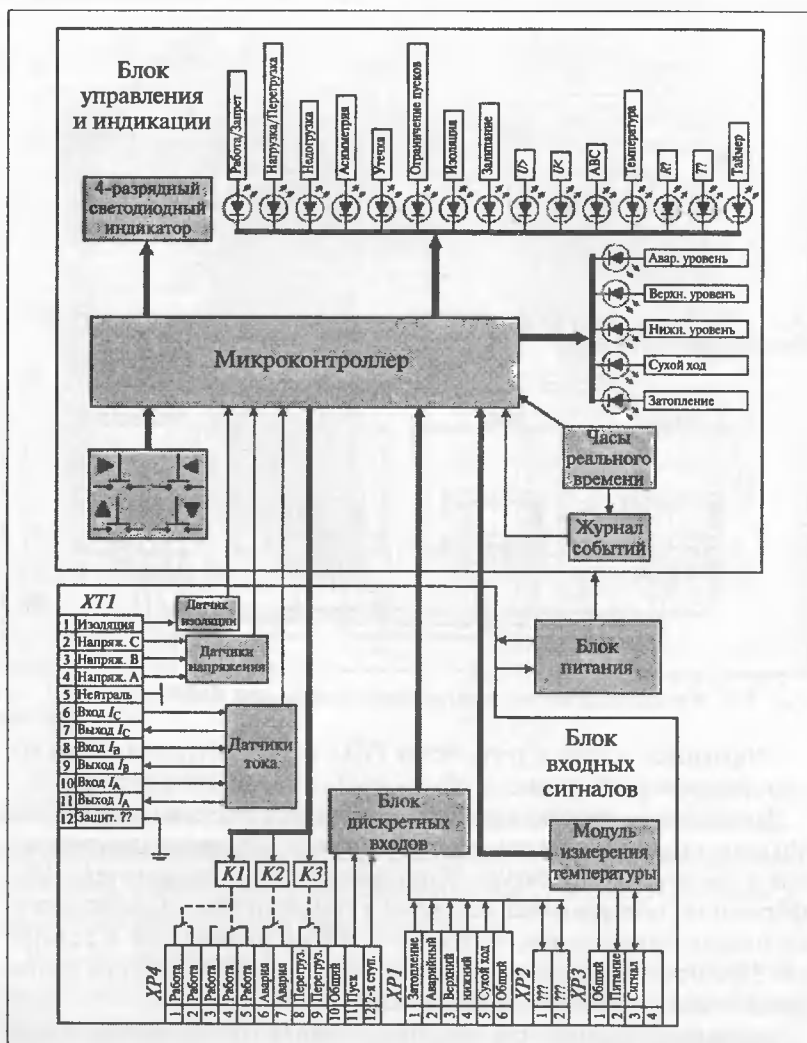


Рис. 1.12. Структурная схема устройства РДЦ-06

При увеличении температуры до значения $T = t_{уст}$, включается реле аварии $K2$ (см. рис. 1.12) и выключается реле управления $K1$, управляющее контактором K (рис. 1.14).

При понижении температуры до значения $T = (t_{уст} - 10)$, °C, аварийный режим выключится автоматически.

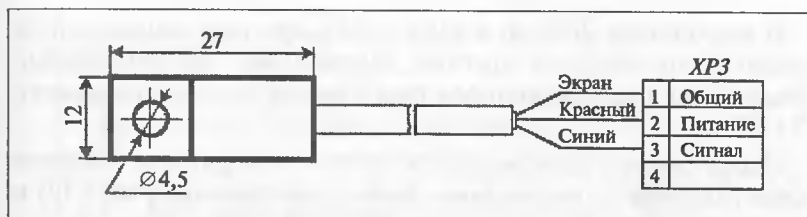


Рис. 1.13. Датчик температуры

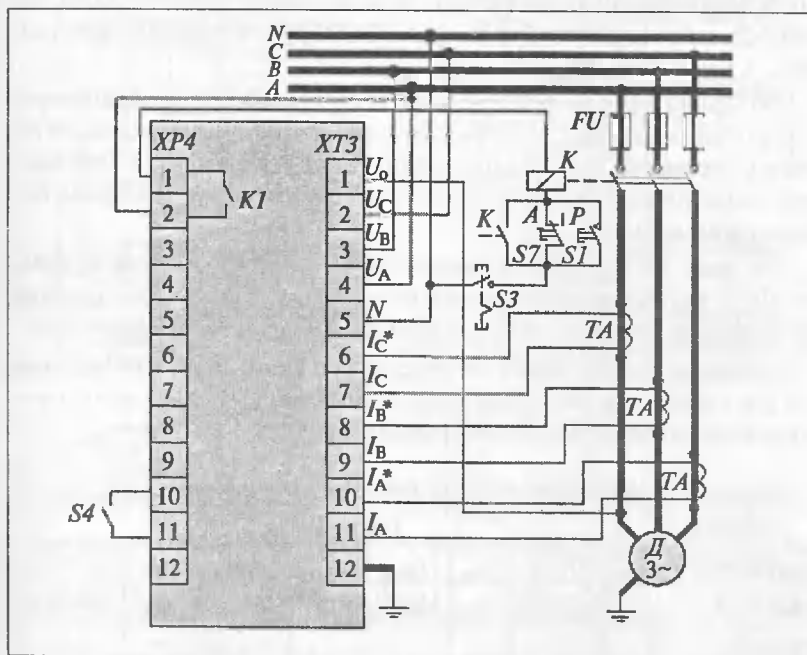


Рис. 1.14. Схема подключений устройства РДЦ-06 с трансформаторами тока

Функциональные возможности устройств в первом приближении можно оценить по количеству аналоговых сигналов, подаваемых на их входы.

Например, к устройству РДЦ-06 можно подключить три трансформатора тока *ТА*, измеряющих ток в фазах электродвигателя (см. рис. 1.14), а к входам устройств БМРЗ и «Сириус-Д» можно помимо этого подключить трансформатор тока нулевой последовательности (табл. 1.1).

В устройствах РДЦ-06 и РД-01-054 отсутствие замыканий на землю контролируется другими алгоритмами, не требующими применения трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП).

Перед каждым пуском электродвигателя устройство измеряет сопротивление изоляции (см. «Датчик изоляции» на рис. 1.12) и сравнивает его с заданной уставкой, значение которой можно выбрать от 0,2 до 1,0 МОм. При снижении сопротивления изоляции пуск двигателя будет запрещен. Вход датчика изоляции соединен непосредственно с одной из фаз обмоток электродвигателя (см. рис. 1.12).

Во время работы электродвигателя устройство контролирует ток утечки на корпус электродвигателя. Уставку срабатывания по этому параметру задают в процентах номинального тока. При возрастании тока утечки устройство отключает электродвигатель без выдержки времени.

На рис. 1.15 показана схема соединения устройства «Сириус-Д» с источниками токовых сигналов, а также подключение дискретных входных сигналов и выходных исполнительных реле.

На входы блоков БМРЗ-ДА поступают два фазных напряжения [67], а в некоторых исполнениях и сигнал от трансформатора напряжения нулевой последовательности (табл. 1.2).

Таблица 1.1. Аналоговые входы устройств — токовые входы

Устройство	Токовые входы							
«Сириус-Д»	$I_{\text{нач}}$	$I_{\text{кон}}$	$I_{\text{нач}}$	$I_{\text{кон}}$	$I_{\text{нач}}$	$I_{\text{кон}}$	$3I_0$	$3I_0$
БМРЗ-ДА	I_A	общ. I_A	I_B	общ. I_B	I_C	общ. I_C	$3I_0$	общ. $3I_0$
РДЦ-06	I_A^*	I_A	I_B^*	I_B	I_C^*	I_C	—	—
РДЦ-01-054							—	—

Таблица 1.2. Аналоговые входы устройств — входы напряжения

Устройство	Входы напряжения					
«Сириус-Д»	U_A	U_B	U_C	$U_{\text{общ}}$	—	
БМРЗ-ДА	U_A	U_B	U_C	$U_{\text{общ}}$	$3U_0$	общ. $3U_0$
РДЦ-06	U_A	U_B	U_C	—	—	
РДЦ-01-054				—	—	

К входам блоков «Сириус-Д» подключают три линейных напряжения и общую точку, к которой присоединяют нулевой провод трансформатора напряжения.

К входам блоков РДЦ-06 и РД-01-054 подключают линейные напряжения и нейтральный провод.

В блоках «Сириус-Д», где отсутствует сигнал от трансформатора напряжения нулевой последовательности, процессор устройства вычисляет значение напряжения нулевой последовательности по формуле [75]:

$$3U_0 = U_A + U_B + U_C, \quad (1.1)$$

где U_A, U_B, U_C — линейные напряжения.

Новые устройства серии БМРЗ-100 (см. рис. 1.3) отличаются меньшим числом аналоговых входов и, как следствие, меньшим набором алгоритмов защиты электродвигателей.

Схема подключения устройств БМРЗ-ДА показана на рис. 1.16.

Сравнение устройств позволяет предположить, что блоки имеют примерно одинаковый набор алгоритмов защиты, автоматики, управления и сигнализации, о чем будет подробно рассказано в главе 3 «Алгоритмы защиты электродвигателей».

В число алгоритмов защиты и автоматики, используемых в рассмотренных выше устройствах, входят как общие, используемые для других защищаемых объектов (табл. 1.3), так и специальные (табл. 1.4) алгоритмы, применяемые только для защиты электродвигателей [56]. Для большинства алгоритмов в таблицах дано их международное обозначение в кодах ANSI [41, 60]¹, а названия алгоритмов, использованные в документации изготовителей, унифицированы.

Отметим, что совокупность алгоритмов, приведенных в табл. 1.3 и 1.4, позволяет реализовать все защиты электродвигателей, предусмотренные в ПУЭ.

Если первая группа алгоритмов предназначена для ликвидации повреждений и ненормальных режимов в электрической части энергосистем, то во вторую группу наряду с алгоритмами, обеспечивающими защиту от ненормальных и аварийных режимов, также входят и алгоритмы защиты и автоматики, реагирующие на

¹ Нормы American National Institute (ANSI), занимающегося стандартизацией в США.

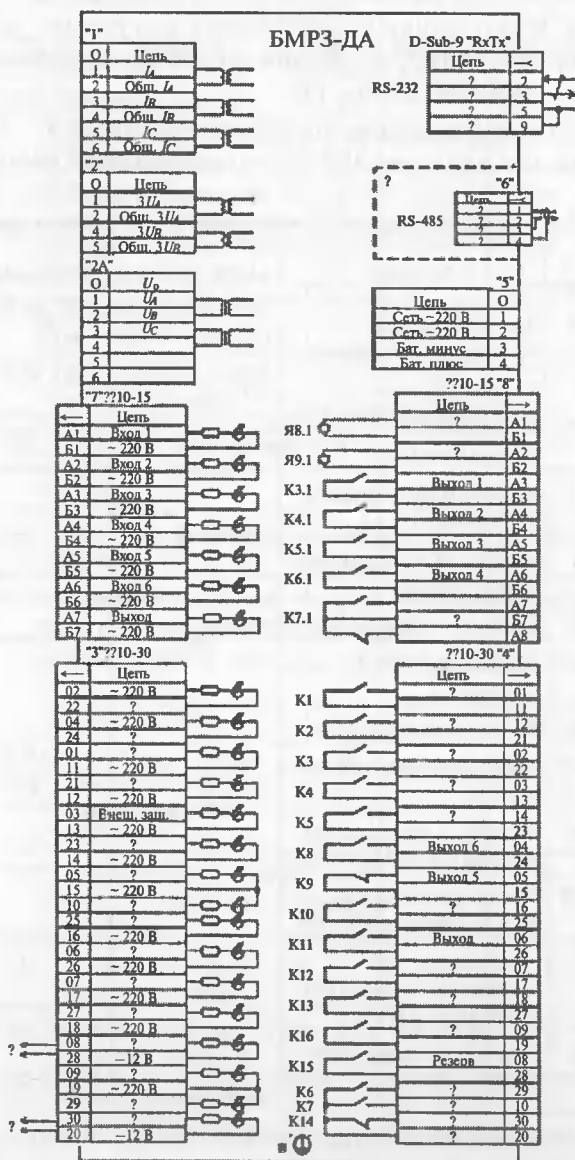


Рис. 1.16. Схема подключения устройства БМРЗ-ДА

изменения технологических параметров защищаемых электродвигателей. Информация о специальных алгоритмах, использованных в блоках БМРЗ, предназначенных для защиты электродвигателей, приведена в табл. 1.5.

Анализируя информацию, приведенную в табл. 1.3 – 1.5, можно заметить, что алгоритм ЗБР использован в семи исполнениях

Таблица 1.3. Алгоритмы защиты и автоматики, общие для всех изделий

Аббре-виатура	Код ANSI	Алгоритм	БМРЗ	Сириус-Д	РДЦ-01-054	РДЦ-06
АПВ	79	Автоматическое повторное включение	+	+	+	—
АЧР		Автоматическая частотная разгрузка [2]	+	+	—	—
ДгЗ		Дуговая защита	+	+	—	—
ЗМН	27	Защита минимального напряжения	+	+	+	+
ЗНР		Защита от несимметричных режимов	+	—	+	+ ²
ЗОФ	46	Защита от обрыва фаз	+	+	—	+
ЗПП	27/59	Защита от потери питания	+	—	—	—
ЛЗШ	68	Логическая защита шин	+	—	—	—
МТЗ	50/67/51V	Максимальная токовая защита	+	+	+	—
ОЗЗ	64	Защита от однофазных замыканий на землю [30]	+	+	+	+ ²
УРОВ	50BF	Резервирование при от- казе выключателя [38, 65]	+	+	—	—
ЧАПВ		Автоматическое повторное включение по частоте [2]	+	+	—	—
ЗПН	59	Защита от повышения напряжения	—	—	+	+

¹ Защита от обратного порядка чередования фаз. Работает при пуске двигателя [76].

² Используются два алгоритма — контроль сопротивления изоляции перед пуском (код ANSI — 64M) и контроль тока утечки по время работы электро- двигателя.

Таблица 1.4. Алгоритмы защиты и автоматики для электродвигателей

Аббре- виатура	Код ANSI	Алгоритм	БМРЗ	Сириус-Д	РДЦ-01-054	РДЦ-06
ДЗТ	87M	Дифференциально- фазная защита с тормо- жением [48]	+	—	—	—
ДЗТНП		Дифференциальная защита нулевой после- довательности с тормо- жением	+	—	—	—
ДТО	87 M	Дифференциальная токовая отсечка [46]	+	—	—	—
ДФО	87 M	Дифференциальная фазовая отсечка	+	—	—	—
ЗБР	48	Защита от блокировки ротора и затянутого пуска	+	+	—	—
ЗЗП	14	Защита от затянутого пуска	+	+	+ ¹	—
ЗКН		Защита от колебаний нагрузки (технологиче- ская защита) ²	+	—	—	—
ЗППД		Запрет пуска перегре- того двигателя	+	+	—	—
КАиРМ	32 P/ 32Q	Контроль активной (обратной) (АМ) и реактивной (РМ) мощности	+	+	—	—
МинТЗ	37	Минимальная токовая защита от потери нагрузки	+	+	+ ³	+ ³
ОКП	66	Ограничение количества пусков	+	—	+	—
ТМ	49	Тепловая модель электродвигателя	+	—	—	—
ФОО		Функция опережаю- щего отключения	+	—	—	—

¹ В документации [76, 77] «Защита от перегрузки по току».

² Антипомпажная защита [8].

³ В документации [76, 77] «Защита от работы с недогрузкой».

Таблица 1.5. Специальные алгоритмы защиты электродвигателей в блоках БМРЗ и БМРЗ-100

Алгоритм	Блоки БМРЗ-ДА- 01-02-12(13)	Блоки БМРЗ-ДА- 05-02-11	Блоки БМРЗ-ДА- 09(10)-32-11	Блоки БМРЗ-ДА-00 (01,10,11)-31-22	БМРЗ-ДД-00 (01)-04-11	БМРЗ-ДД-00 (01,10,11)-04-21	БМРЗ-ДС- 00-01-11	БМРЗ- 105(115)-ДД-01
ДЗТ					ДЗТ	ДЗТ		
ДЗТНП						ДЗТНП		
ДТО	ДТО				ДТО	ДТО	ДТО	
ДФО					ДФО			
ЗБР	ЗБР	ЗБР	ЗБР	ЗБР	ЗБР	ЗБР		ЗБР
ЗЗП	ЗЗП	ЗЗП						
ЗКН							ЗКН	ЗКН
ЗППД				ЗППД		ЗППД	ЗППД	ЗППД
К _И РМ				К _И РМ				
МинГЗ				МинГЗ	МинГЗ	МинГЗ		МинГЗ
ОКП			ОКП	ОКП	ОКП	ОКП		
ТМ			ТМ	ТМ	ТМ	ТМ		
ФОО							ФОО	

блоков БМРЗ и БМРЗ-100, а наибольшее число специальных алгоритмов (8 из 13) нашло применение в блоке БМРЗ-ДД-00(01,10,11)-04-21 (см. табл. 1.5).

Наименьшее число специальных алгоритмов (всего два) использовано в блоке БМРЗ-ДА-05-02-11.

В устройстве «Сириус-Д» применено 9 алгоритмов из 12, перечисленных в табл. 1.3, и 5 алгоритмов из 13, приведенных в табл. 1.4. Рекомендации по применению некоторых специальных и общих защит, отвечающие требованиям, изложенным в ПУЭ, приведены в табл. 1.6 и 1.7 [37].

Структурная схема индивидуальной защиты электродвигателя *М* с устройствами БМРЗ показана на рис. 1.17. В схеме предусмотрена возможность питания электродвигателя *М* от одной из двух ячеек. Первая ячейка обеспечивает пуск электродвигателя *М* с помощью устройства плавного пуска УПП АЗ, а вторая — прямой пуск электродвигателя. Подключение УПП АЗ к электродвигателю *М* осуществляется через контактор *К* (цепи управления этим контактором на рис. 1.1 не показаны).

Таблица 1.6. Рекомендации по применению некоторых специальных алгоритмов защит электродвигателей напряжением 6 — 10 кВ

Алгоритм	Электродвигатель	
	асинхронный	синхронный
ТО	Применяют*	Применяют
ДЗТ	Применяют в следующих случаях: • при мощности электродвигателя более 5 МВт; • если ТО не удовлетворяет требованиям по чувствительности.	
ДТО	Рекомендуется применять в качестве вспомогательной защиты при использовании ДЗТ	
ФОО	Не применяют	Рекомендуется применять всегда
ЗКН	Необходимо применять при возможности возникновения колебаний нагрузки	
Защита от перегрузки	Рекомендуется применять всегда	

* Применяют для защиты каждой обмотки многоскоростных асинхронных электродвигателей.

В каждой из ячеек предусмотрено устройство релейной защиты серии БМРЗ (устройства *A1* и *A2*), управляющей работой вводных выключателей *Q1* и *Q2*.

Информацию о токах, протекающих в обмотках электродвигателя, устройства *A1* и *A2* получают от трансформаторов тока *TA1* и *TA2*, установленных со стороны питания, и трансформатора *TA3*, установленного со стороны нейтрали электродвигателя *M*.

Информация о напряжении на шинах секции 6 – 10 кВ поступает от трансформатора напряжения *TV1*.

Для защиты от междофазных замыканий в устройствах *A1* и *A2* рекомендуется предусматривать алгоритмы защиты ТО и ДТО (см. табл. 1.3 и 1.4, 1.6 и 1.7).

Алгоритм ДЗТ предусмотрен только в блоке *A2*, а его использование в блоке *A1*, установленном в ячейке с УПП *A3*, нецелесообразно.

В блоках серии БМРЗ и БМРЗ-100 предусмотрена возможность блокирования дифференциальных защит на время прямого пуска электродвигателя. Блокирование происходит при снижении мак-

Таблица 1.7. Рекомендации по применению некоторых общих алгоритмов защит электродвигателей напряжением 6 – 10 кВ

Алгоритм	Электродвигатель	
	асинхронный	синхронный
ОЗЗ	Необходимо применять при токе замыканий на землю: • ≥ 10 А — при мощности электродвигателя менее 2 МВт; • ≥ 5 А — при мощности электродвигателя более 2 МВт. Рекомендуется применять для всех электродвигателей ¹	
ЗМН	Применяют ^{2, 3}	Не применяют
ЗПП	Не применяют ⁴	Применяют
ЗНР	Рекомендуется применять всегда	
УРОВ	Рекомендуется применять всегда	

¹ Применяют для защиты каждой из обмоток многоскоростных асинхронных электродвигателей.

² При участии электродвигателя в процессе самозапуска следует предусматривать выдержку времени на срабатывание.

³ Алгоритм ЗМН должен переводить многоскоростной электродвигатель, участвующий в процессе самозапуска, на низшую частоту вращения.

⁴ В том случае, когда не предусмотрен самозапуск электродвигателя.

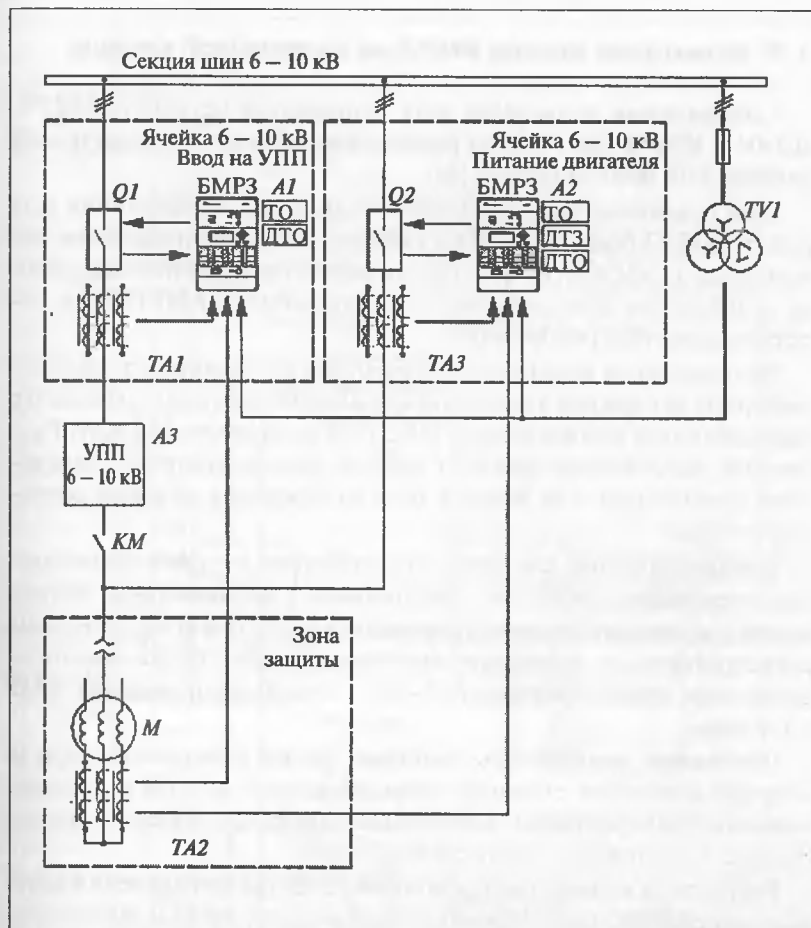


Рис. 1.17. Структурная схема релейной защиты электродвигателя *М* с блоками серии БМРЗ

симального значения одного из фазных токов со стороны питания электродвигателя ниже 75 % тока холостого хода электродвигателя.

Следует особо отметить, что в любых схемах с УПП (см. *А3* на рис. 1.17) необходимо учитывать дополнительные рекомендации и указания, содержащиеся в документации производителя данного устройства.

Методику расчета уставок для алгоритмов ТО устройств *А1* и *А2* рассмотрим в гл. 2.

1.2. Испытания блоков БМРЗ на физической модели

Специальные испытания двух исполнений устройств БМРЗ-ДД-04 и БМРЗ-ДА-31 были проведены на электродинамической физической модели (рис. 1.18).

Электродинамическая физическая модель для испытания устройств БМРЗ была создана на кафедре «Электроснабжение» Вологодского государственного технического университета на основе трехфазного асинхронного электродвигателя АИР100S4 с короткозамкнутым ротором [6].

Эквивалентом механической нагрузки асинхронного электродвигателя M служила электрическая машина постоянного тока G с параллельным возбуждением ПБСТ-52 мощностью 4,1 кВт. Различные нагрузочные режимы работы электродвигателя задавались изменением тока якоря и тока возбуждения машины постоянного тока.

Контролируемые сигналы, поступающие от трансформаторных преобразователей (ток – напряжение и напряжение – напряжение), измерялись и регистрировались внешним компьютерным регистратором с помощью многоканального блока аналого-цифровых преобразователей L-761 (*L-card*) производства ЗАО «Л-Кард».

Датчиками температуры лобовых частей обмотки статора и корпуса двигателя служили терморезисторы ММТ-1 с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, включенные в мостовые измерительные схемы.

Результаты испытаний блоков БМРЗ-Д при определении кривых нагревания, параметров тепловой модели, пуска и самозапуска электродвигателя приведены выше.

В блоке БМРЗ-ДД-04 предусмотрена специальная дифференциальная защита для выявления однофазных замыканий на землю в обмотках статора электродвигателя, работающего в сети с заземленной нейтралью (рис. 1.19).

Входными сигналами для этой защиты служат сумма фазных токов и ток в нейтрали контролируемого электродвигателя (так называемая REF-защита или REF-дифференциал).

При исследованиях устройств серии БМРЗ-Д на модели были реализованы наиболее вероятные и опасные внутренние повреждения электродвигателя.

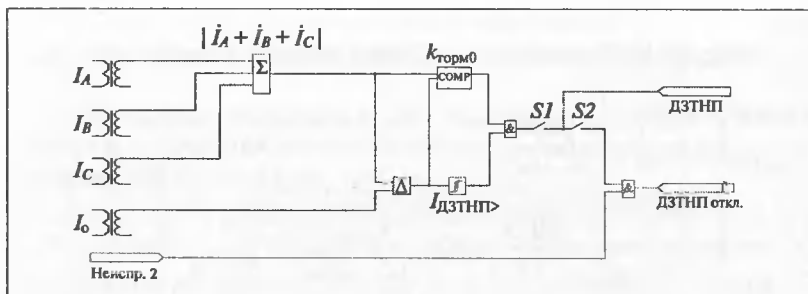


Рис. 1.19. Алгоритм REF-защиты

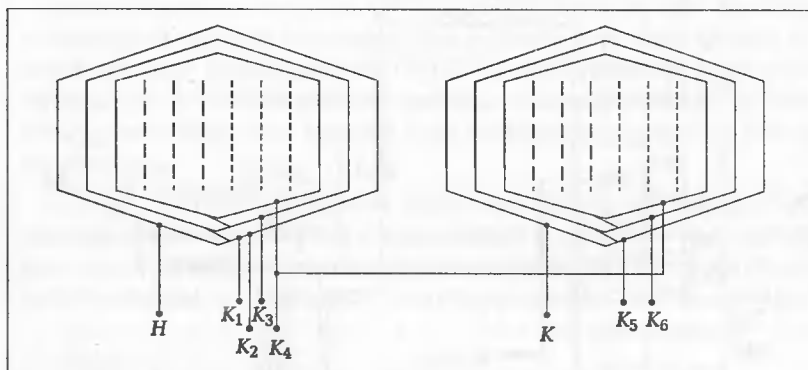


Рис. 1.20. Схема расположения выводов в обмотке электродвигателя для моделирования КЗ

При замыкании 16 % витков обмотки одной фазы со стороны нейтрали (замыкание на нейтраль ближайшей шестой отпайки обмотки фазы С), возник ток КЗ, который превысил номинальное значение почти в 3 раза (рис. 1.21).

При замыкании 88 % витков обмотки фазы С (замыкание на нейтраль ближайшей к фазному выводу отпайки обмотки) ток в поврежденной фазе С превысил номинальный в 10 раз (рис. 1.22), а наибольшие мгновенные значения достигли 25 и 100 А.

При моделировании двухфазного КЗ на выводах электродвигателя (внутреннее междуфазное КЗ) возникали токи, осциллограмма которых приведена на рис. 1.23.

Форма токов значительно отличается от синусоидальной, а максимальные мгновенные значения превышают номинальные в 30 раз и достигают 280 А.

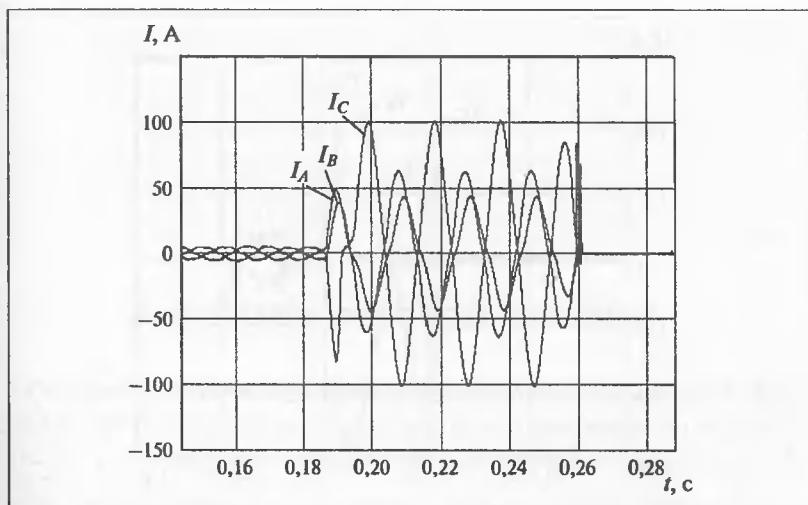


Рис. 1.21. Осциллограммы токов при замыкании 16 % витков обмотки одной фазы

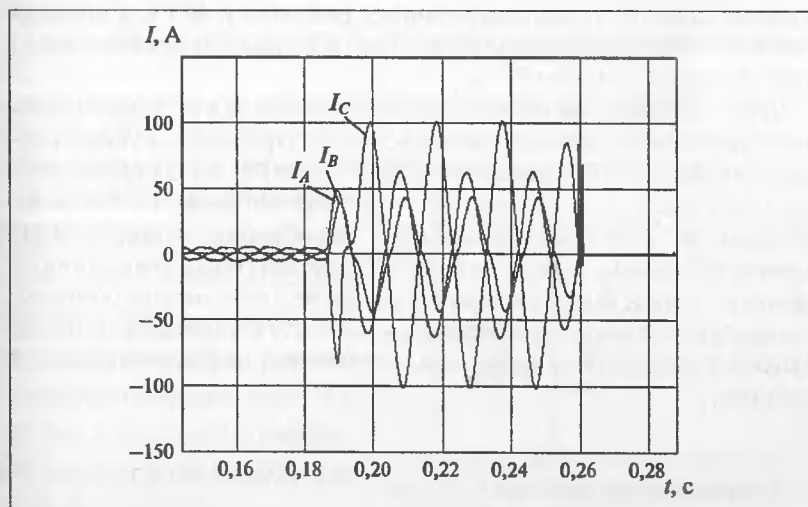


Рис. 1.22. Осциллограммы токов при замыкании 88 % витков обмотки одной фазы

При уставке по току, равной $2,1 I_{\text{ном,дв}}$, отсечка срабатывает за время не более 0,1 с.

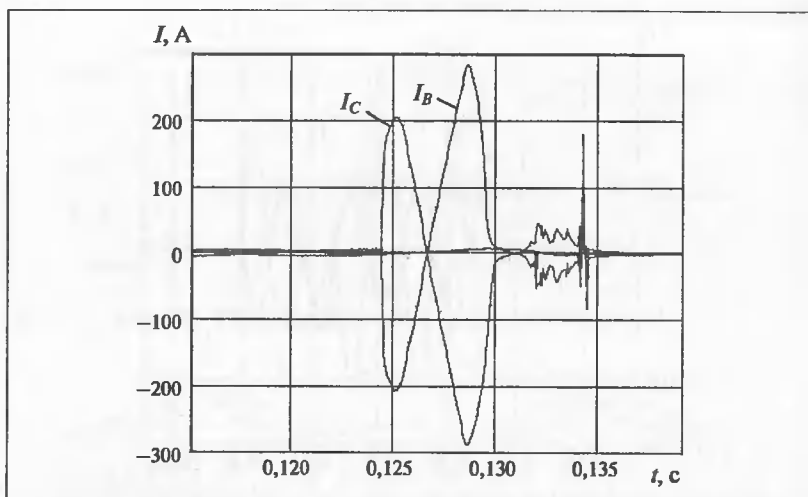


Рис. 1.23. Осциллограммы токов при междуфазном КЗ

В каждом из рассмотренных случаев в блоках БМРЗ-Д срабатывали защиты от несимметричных режимов и МТЗ, а поврежденный электродвигатель *М* (см. рис. 9.6, часть 2) отключался от сети за время не более 0,2 с.

В результате испытаний электродвигателя *М* при моделировании многочисленных и разнообразных внутренних КЗ установлено, что защиты в блоках БМРЗ-ДД-04 и БМРЗ-ДА-31 срабатывают селективно и устойчиво при всех моделировавшихся междуфазных и витковых замыканиях в обмотке статора. Зона нечувствительности блоков БМРЗ-Д при витковых замыканиях в обмотке одной фазы составляет не более 16 % витков обмотки, что вполне согласуется с требованиями ПУЭ к защитах машин, на которых невозможна установка поперечной дифференциальной защиты.

ГЛАВА ВТОРАЯ

Алгоритм токовой отсечки

Согласно ПУЭ для электродвигателей мощностью менее 2 МВт должна быть обязательно предусмотрена однорелейная токовая отсечка¹, защищающая от многофазных замыканий (см. табл. 1.6 и 1.7).

Если однорелейная токовая отсечка не удовлетворяет требованиям чувствительности, то для защиты электродвигателей мощностью менее 2 МВт можно использовать двухрелейную токовую отсечку.

Сразу необходимо отметить, что при коротком замыкании между фазами *AB* или *BC* на вход схемы однорелейной токовой отсечки от двух трансформаторов тока, соединенных на разность токов (рис. 2.1), поступает сигнал в 3 раза меньший, чем при симметричной нагрузке или при трехфазном коротком замыкании.

В технической литературе [22] принято говорить, что такая схема имеет в $\sqrt{3}$ раз худшую чувствительность, чем двухрелейная схема с двумя трансформаторами тока [1], однако правильнее говорить, что выходной ток в такой схеме в $\sqrt{3}$ раз меньше.

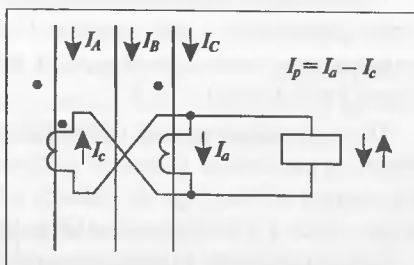


Рис. 2.1. Соединение трансформаторов тока на разность токов двух фаз

¹ Существует мнение, что этот термин возник потому, что алгоритм токовой отсечки обеспечивает защиту только части объекта, его отсека (см. http://www.rza001.narod.ru/txt/shabad_2/raschet_to.htm).

ПУЭ рекомендует применять двухрелейную токовую отсечку для защиты электродвигателей мощностью 2 МВт и более, имеющих защиту от однофазных замыканий на землю, действующую на отключение.

Если же защита от однофазных замыканий на землю отсутствует, то для электродвигателей мощностью 2 МВт и более следует применять трехрелейную токовую отсечку с тремя трансформаторами тока.

ПУЭ допускает применять и двухрелейную токовую отсечку для защиты электродвигателей мощностью 2 МВт и более, не имеющих защиты от однофазных замыканий на землю. Однако в этом случае необходимо дополнительно предусмотреть защиту от двойных замыканий на землю.

Наиболее просто и полно все требования, изложенные в ПУЭ, реализуются при использовании серийно выпускаемых устройств БМРЗ (см. табл. 1.5) и «Сириус-Д», предназначенных для защиты синхронных и асинхронных электродвигателей.

В ряде случаев для защиты асинхронных двигателей можно применять устройства БМРЗ и БМРЗ-100, рассчитанные на защиту воздушных и кабельных линий.

Во всех этих блоках для выполнения токовой отсечки используют первую ступень алгоритма максимальной токовой защиты МТЗ с нулевой выдержкой времени (рис. 2.2).

При превышении любым из фазных токов I_A , I_B , I_C уставки соответствующего компаратора 1 – 3 возникает сигнал «Пуск $I_{>}$ », и при отсутствии блокирующих сигналов элемент выдержки времени 5 начинает отсчет.

При использовании первой ступени МТЗ в качестве токовой отсечки выдержка времени устанавливается равной нулю, поэтому сигнал «Откл. $I_{>}$ » на выходе алгоритма появляется после сигнала «Пуск $I_{>}$ » без временной задержки.

Блокирование [4] срабатывания любой ступени МТЗ выполняется элементом 4. Сигнал блокирования поступает на элемент 13.

В связи с тем, что в данном алгоритме устанавливается нулевое значение выдержки времени, то необходимость ускорения срабатывания защиты (при ручном включении выключателя или в цикле АПВ) отсутствует.

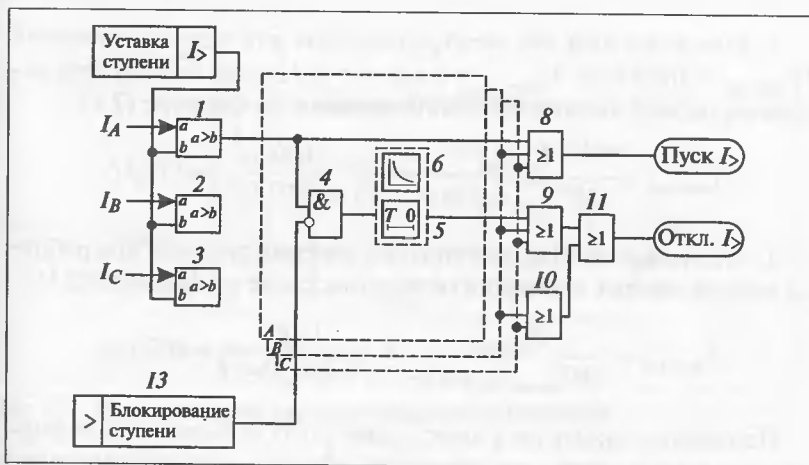


Рис. 2.2. Структурная схема алгоритма максимальной токовой защиты (ТО — первая ступень МТЗ) [26]

В устройствах БМРЗ и «Сириус-Д» предусмотрено необходимое число цифровых реле максимального тока для каждой фазы, поэтому применение предусмотренной в ПУЭ отсечки в виде однорелейной схемы (см. рис. 2.1) нецелесообразно.

Пример 2.1. Расчет уставок для ТО, защищающей асинхронный двухскоростной двигатель АДО-1600/1000-10/12 с прямым пуском на первой частоте вращения.

Исходные данные для расчета приведены в приложении.

Для расчета уставок токовой отсечки необходимо знать номинальный ток электродвигателя. Если значение этой характеристики не приведено в документации двигателя или исходных данных для расчета, то определить его можно по формуле, А:

$$I_{\text{ном.дв}} = \frac{P_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном.дв}} \eta \cos \varphi}, \quad (2.1)$$

где $P_{\text{ном.дв}}$ — номинальная мощность электродвигателя, кВт;
 $U_{\text{ном.дв}}$ — номинальное линейное действующее напряжение двигателя, кВ; η — номинальный КПД электродвигателя; $\cos \varphi$ — номинальный коэффициент мощности электродвигателя.

1. Номинальный ток электродвигателя для заданных условий ($P_{\text{ном.дв}} = 1000$ кВт, $U_{\text{ном.дв}} = 6$ кВ, $\eta = 0,92$, $\cos\varphi = 0,53$) при работе на первой частоте вращения находим по формуле (2.1):

$$I_{\text{ном.дв1}} = \frac{P_{\text{ном.дв1}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном.дв}}\eta_1 \cos\varphi_1} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,92 \cdot 0,53} \approx 197,3 \text{ А.}$$

2. Номинальный ток для этого же электродвигателя при работе на второй частоте вращения определим также по формуле (2.1):

$$I_{\text{ном.дв2}} = \frac{P_{\text{ном.дв2}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном.дв}}\eta_2 \cos\varphi_2} = \frac{1600}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,95 \cdot 0,8} \approx 202,6 \text{ А.}$$

По номинальному току электродвигателя выбираем трансформаторы тока (сигнал с их вторичных обмоток поступает на токовые входы I_A , I_B , I_C цифрового устройства, показанные на рис. 1.15) с таким коэффициентом трансформации, чтобы при номинальном токе электродвигателя вторичный ток трансформатора тока не превышал 5 А. Рекомендуемый диапазон изменения вторичного тока от 1 до 4 А.

Для найденного значения тока (197,3 А) предварительно выбираем трансформаторы тока типа ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р и коэффициентом трансформации $K_I = 200/5$.

При кратности тока 17 и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом трансформаторы тока этого типа имеют погрешность не более 10 % [14]. Указанная кратность тока соответствует току в первичной обмотке 3400 А ($17 \cdot 200$ А).

Для оценки пригодности выбранного трансформатора тока по погрешности, соответствующей предельной кратности тока необходимо знать максимальные броски пускового тока электродвигателя (рис. 2.3)

Принято считать, что процесс пуска электродвигателя завершен, когда пусковой ток станет меньше $1,25 I_{\text{ном.дв}}$. Значение максимального пускового тока при прямом пуске электродвигателя с учетом апериодической составляющей, А, находят по формуле:

$$I_{\text{бр.пуск}} = k_{\text{ампер}} k_{\text{пуск}} I_{\text{ном.дв}}, \quad (2.2)$$

где $k_{\text{ампер}} = 1,8$ — коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую пускового тока машины; $k_{\text{пуск}}$ — кратность пускового тока машины (как правило, $3 \div 8 I_{\text{ном.дв}}$).

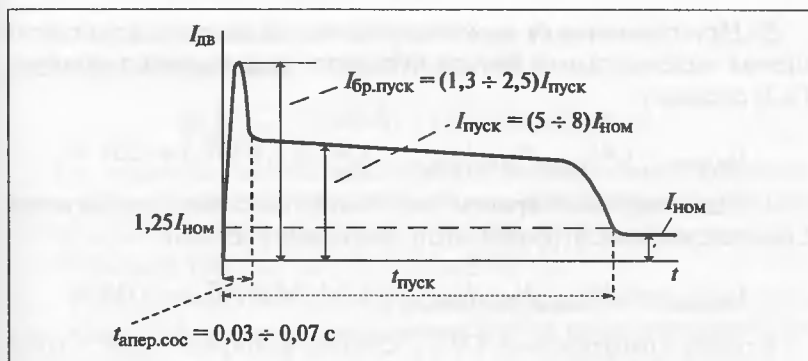


Рис. 2.3. Пример пусковой характеристики электродвигателя

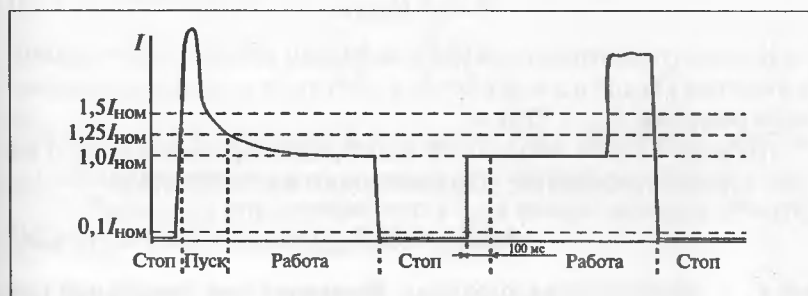


Рис. 2.4. Режимы работы двигателя

В некоторых цифровых блоках [16] пусковую характеристику электродвигателя используют для автоматического определения режима работы электродвигателя путем сравнения потребляемого им тока с уставкой — номинальным током нагрузки $I_{\text{ном}}$.

При токе $I < 0,1 I_{\text{ном}}$ считается, что двигатель находится в режиме *Стоп* (рис. 2.4).

Возрастание тока от $I < 0,1 I_{\text{ном}}$ до значения $I > 1,5 I_{\text{ном}}$ за время, не превышающее 100 мс, устройство определяет как *Пуск*.

Режим *Пуск* считается окончанным, если ток снижается до значения $I < 1,25 I_{\text{ном}}$, после чего полагают, что двигатель перешел в режим *Работа*.

Переход в режим *Работа* может происходить и после режима *Стоп*, если за время, не превышающее 100 мс, ток увеличился от значения $I < 0,1 I_{\text{ном}}$ до $I < 1,5 I_{\text{ном}}$.

3. При самозапуске электродвигателя на первой частоте вращения максимальный бросок пускового тока согласно формуле (2.2) составит:

$$I_{\text{бр.пуск}} = 1,4k_{\text{ампер}}k_{\text{пуск}}I_{\text{ном.дв}} = 1,4 \cdot 1,8 \cdot 6,7 \cdot 197,3 \approx 3331 \text{ А.}$$

4. Максимальный бросок тока самозапуска электродвигателя при его работе на второй частоте вращения составит:

$$I_{\text{бр.пуск}} = 1,4k_{\text{ампер}}k_{\text{пуск}}I_{\text{ном.дв}} = 1,4 \cdot 1,8 \cdot 6,5 \cdot 202,6 \approx 3319 \text{ А.}$$

Уставку срабатывания ТО $I_{>1}$ следует выбирать такой, чтобы выполнялось соотношение:

$$I_{>>>} \geq I_{\text{бр.пуск}} \quad (2.3)$$

Используя соотношение (2.3), выбираем уставки срабатывания алгоритма ТО для первой и второй частоты вращения одинаковыми и равными $I_{>>>1} = 3350 \text{ А.}$

Проверим ранее выбранный трансформатор тока (см. п. 3) на соблюдение требования, установленного в п. 3.2.29 ПУЭ

$$1,1I_{>>>} < (k_{\text{т}}I_{\text{ном}}), \quad (2.4)$$

где $k_{\text{т}}$ — кратность тока короткого замыкания при допустимой погрешности 10 %; $I_{\text{ном}}$ — номинальный первичный ток трансформатора тока.

5. Проверяем выполнение неравенства (2.4):

$$[1,1I_{>>>1} = 1,1 \cdot 3350 = 3685 \text{ А}] > (17 \cdot 200 = 3400 \text{ А}).$$

Из соотношения видно, что требование (2.4) при применении данного трансформатора тока не соблюдается.

В связи с тем, что погрешность выбранного ранее трансформатора тока с коэффициентом трансформации $K_{\text{т}} = 200/5$ превосходит 10 % при токе двигателя, превышающем уставку срабатывания на 10 % ($1,1I_{>>>1} = 3685 \text{ А}$), выбираем трансформаторы тока этого же типа, но с коэффициентом трансформации 300/5.

¹ По традиции, в цифровых устройствах, выпускаемых НТЦ «Механотроника» характеристики ступеней обозначают так: ($I_{>>>}$) — первая ступень; ($I_{>>}$) — вторая ступень; ($I_{>}$) — третья ступень.

6. Проверим выполнения требования (2.4) для вновь выбранного трансформатора:

$$[1,1I_{>>>2} = 3685 \text{ A}] < [17 \cdot 300] = 5100 \text{ A}].$$

Как видно из соотношения, при той же допустимой кратности тока (17) погрешность трансформаторов тока не будет превышать 10 % даже при токе, равном 5100 А (17·300 А), и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом.

Убедившись в том, что выбранные трансформаторы тока соответствует требованиям, изложенным в ПУЭ, продолжим дальнейшие расчеты.

Ток двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя находим по формуле, А:

$$I_{\kappa}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\kappa}^{(3)}, \quad (2.5)$$

где $I_{\kappa}^{(3)}$ — ток трехфазного КЗ на вводах питания данного электродвигателя (исходные данные для расчета см. в приложении).

7. Расчетный ток двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя в соответствии с (2.5) составит:

$$I_{\kappa}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 8000 \approx 6928 \text{ A}.$$

Коэффициент чувствительности защиты [59, 70] при двухфазном КЗ находим по формуле:

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\kappa}^{(2)}}{I_{>>>}}. \quad (2.6)$$

Данный коэффициент представляет собой отношение расчетного значения фазного тока при металлическом КЗ в пределах защищаемой зоны к фазному току, соответствующему срабатыванию защиты.

8. По формуле (2.6) находим коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ:

$$k_{\text{ч1}}^{(2)} = \frac{I_{\kappa}^{(2)}}{I_{>>>1}} = \frac{6928}{3350} \approx 2,1.$$

Поскольку коэффициент чувствительности ТО оказался больше 2, нет необходимости применять дополнительно дифференциальную защиту для защиты данного двигателя от междуфазных КЗ.

Защита от междуфазных КЗ работает без выдержки времени, как и токовая отсечка.

При расчете уставок ТО для синхронного двигателя следует учитывать, что машина запускается в асинхронном режиме, поэтому значение броска пускового тока находят аналогично тому, как это было сделано в примере 2.1.

Отстройка ТО должна быть выполнена от:

- броска апериодической составляющей пускового тока;
- тока несинхронного включения двигателя.

При расчете уставки ТО для электродвигателя с реакторным пуском сначала необходимо найти по формуле (2.2) максимальный бросок пускового тока для прямого пуска электродвигателя с учетом апериодической составляющей $I_{\text{бр.пр.пуск}}$.

Полученное значение $I_{\text{бр.пр.пуск}}$ используют для определения полного пускового сопротивления двигателя x_d , Ом:

$$x_d = \frac{U_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} I_{\text{бр. пр. пуск}}}. \quad (2.7)$$

На основании полученных результатов находят максимальный бросок пускового тока двигателя при реакторном пуске, А:

$$I_{\text{бр. пуск}} = \frac{U_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3}(x_c + x_d + x_p)}, \quad (2.8)$$

где x_c — индуктивное сопротивление сети; x_p — индуктивное сопротивление реактора.

Если двигатель работает в режиме самозапуска, то полученное по формуле (2.2) значение тока $I_{\text{бр.пуск}}$ необходимо увеличить в 1,3 — 1,4 раза, так как в этом режиме напряжение на двигателе может достигать 1,3 — 1,4 номинального значения.

Полученные таким образом значения проверяют по неравенству (2.3).

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

Алгоритмы дифференциальных защит ДЗТ и ДТО

Согласно требованиям ПУЭ электродвигатели мощностью 5 МВт и более, имеющие выводы от начал и концов фазных обмоток, должны быть защищены¹ от междуфазных замыканий с помощью дифференциальной токовой защиты (см. также табл. 1.6 и 1.7).

Такой же защитой должны быть оборудованы электродвигатели мощностью менее 5 МВт, если коэффициент чувствительности ТО меньше или равен 2 [59, 22, 17].

Принцип работы дифференциальной защиты показан на рис. 3.1.

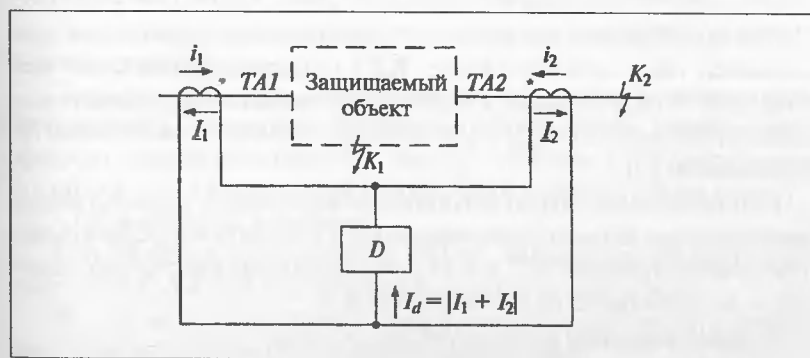


Рис. 3.1. Дифференциальная защита с двумя группами трансформаторов тока [26]

¹ В случаях, когда не применяются предохранители.

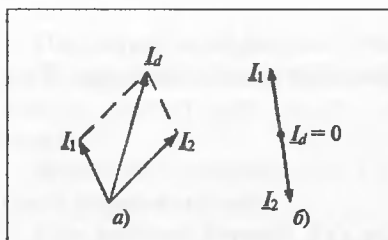


Рис. 3.2. Векторные диаграммы токов при внутреннем (а) и внешнем (б) КЗ [26]

Измерительный элемент D (на рис. 1.17 этот элемент, находящийся внутри устройств $A1$ и $A2$, не показан) определяет значение дифференциального тока I_d , равного геометрической сумме токов трансформаторов тока $TA1$ и $TA2$.

Вернемся к рис. 1.17. При питании электродвигателя через УПП измерительный элемент

D , встроенный в блок $A1$, использует сигналы, поступающие от трансформаторов $TA1$ и $TA2$. При питании электродвигателя непосредственно от сети измерительный элемент D , встроенный в блок $A2$, использует сигналы, поступающие от трансформаторов $TA3$ и $TA2$.

При КЗ внутри защищаемой зоны $K1$ (внутреннее КЗ) измеряемые токи I_1 и I_2 практически совпадают по фазе, поэтому дифференциальный ток I_d существенно больше нуля и соизмерим с геометрической суммой этих токов (рис. 3.2, а).

При КЗ вне зоны $K2$ (внешнее КЗ) геометрическая сумма токов (дифференциальный ток I_d) в идеальном случае (при отсутствии погрешностей трансформаторов тока) равна нулю (рис. 3.2, б).

Для обеспечения правильного срабатывания защиты как при внешних, так и при внутренних КЗ в цифровых устройствах используют алгоритм (рис. 3.3), обеспечивающий загроуление установки срабатывания $I_{dуст}$ с увеличением сравниваемых токов, — *торможение* [5].

Использование такого алгоритма обеспечивает неселективное срабатывание защиты¹ при внешних КЗ и селективное срабатывание при внутренних КЗ, а в случае правильно выбранных уставок — несрабатывание при внешних КЗ.

Данный алгоритм формирует два сигнала:

- дифференциальный ток $I_d = \Sigma I$, абсолютное значение которого $I_d = |\Sigma I|$;

¹ Срабатывание может быть обусловлено возможным нарушением баланса токов из-за неодинакового насыщения трансформаторов тока.

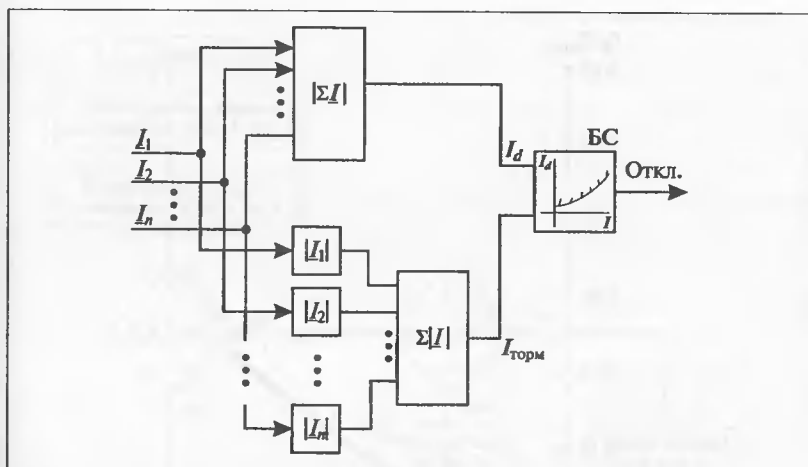


Рис. 3.3. Структурная схема алгоритма торможения [26]

- ток торможения $I_{\text{торм}}$, равный сумме абсолютных значений сравниваемых токов $I_{\text{торм}} = \Sigma |I|$.

Сравнение тока торможения и дифференциальных токов происходит в блоке сравнения БС (см. рис. 3.3).

В устройствах БМРЗ и БМРЗ-100, используемых для защиты электрических машин, применяется алгоритм торможения, характеристика которого имеет два участка (рис. 3.4).

Расчет значений всех токов производят по алгоритму, показанному на рис. 3.5.

Дифференциальная защита электродвигателей может быть реализована в двух- или трехфазном исполнении, причем двухфазную дифференциальную защиту согласно [17] допускается выполнять при совместном применении с ней одной из защит:

- от замыканий на землю;
- от двойных замыканий на землю, использующей трансформатор тока нулевой последовательности и токовое реле.

Во всех остальных случаях дифференциальная защита должна выполняться с тремя трансформаторами тока.

В соответствии с требованиями ПУЭ для блоков электродвигатель — трансформатор (автотрансформатор) мощностью более 2 МВт должна предусматриваться дифференциальная отсечка в двухрелейном исполнении, отстроенная от бросков тока намагничивания трансформатора.

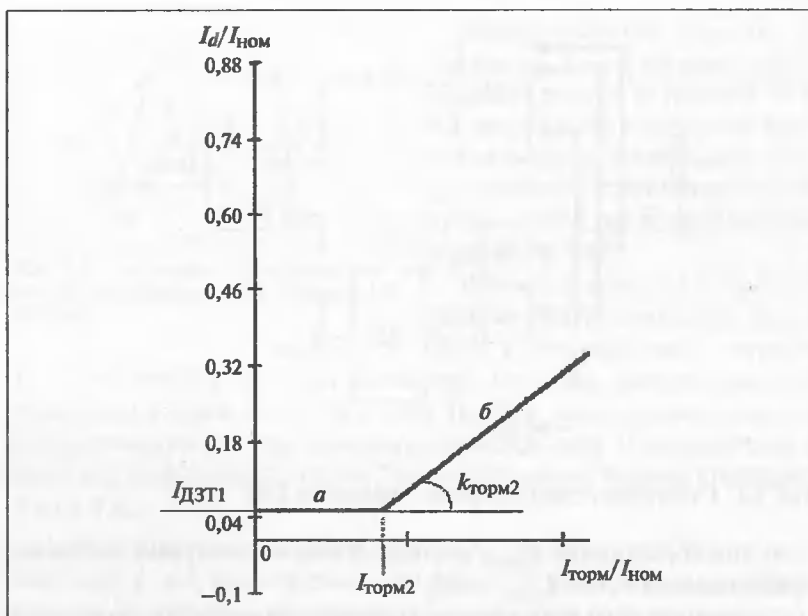


Рис. 3.4. Характеристика алгоритма ДЗТ в устройствах БМРЗ и БМРЗ-100:

$I_{ДЗТ}$ — уставка по начальному дифференциальному току срабатывания;
 $I_{торм2}$ — начальный ток торможения на участке б; $k_{торм2}$ — коэффициент торможения на втором участке тормозной характеристики

Такой же защитой должны быть оборудованы блоки электродвигатель — трансформатор (автотрансформатор) мощностью менее 2 МВт, если коэффициент чувствительности ТО [59, 70] меньше или равен 2 при междуфазном КЗ на выводах электродвигателя.

Согласно ПЭУ оценка чувствительности дифференциальных защит должна производиться при помощи коэффициента чувствительности, определяемого как отношение расчетного значения дифференциального тока при металлическом КЗ в пределах защищаемой зоны к значению дифференциального тока, при котором происходит срабатывание защиты.

Для блоков электродвигатель — трансформатор (автотрансформатор) должна быть предусмотрена дифференциальная токовая защита в двухрелейном исполнении с промежуточными насыщающимися трансформаторами тока.

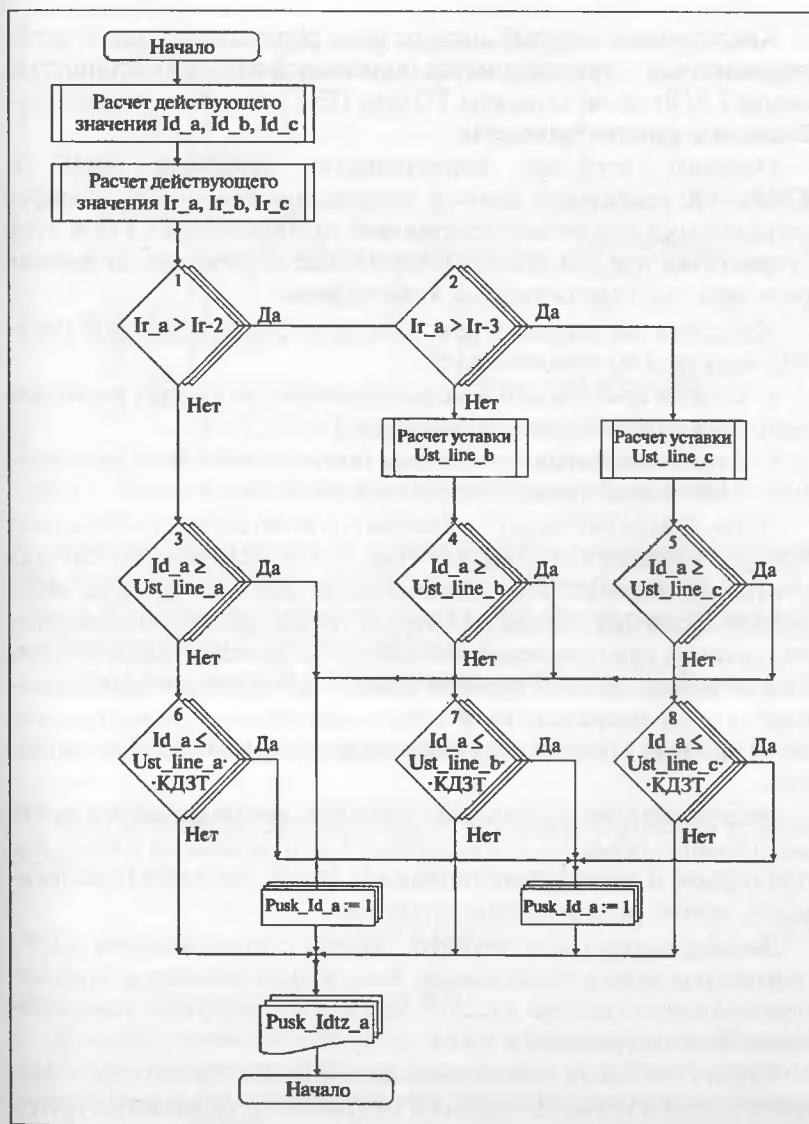


Рис. 3.5. Алгоритм расчета токов в устройствах БМРЗ и БМРЗ-100:

$Pusk_Idtz_a = 0$ — начальные значения переменных; Id_a — действующее значение дифференциального тока фазы A , отн. ед.; Ir_a — действующее значение тока торможения фазы A , отн. ед.; $Pusk_Idtz_a$ — признак срабатывания реле по дифференциальному току фазы A .

Аналогичной защитой должны быть оборудованы блоки электродвигатель — трансформатор (автотрансформатор) мощностью менее 2 МВт, если алгоритм ТО (см. ПЭУ) не удовлетворяет требованиям чувствительности.

Отметим, что при использовании устройств БМРЗ и БМРЗ-100 реализация двух- и трехфазных исполнений дифференциальных защит не представляет трудностей, так как в этих устройствах предусмотрено необходимое количество цифровых реле максимального тока для каждой фазы.

Известны два варианта выполнения дифференциальной токовой защиты электродвигателей:

- с током срабатывания меньше номинального тока защищаемого электродвигателя (см. примеры 3.1, 3.2, 3.3);
- с током срабатывания больше номинального тока защищаемого электродвигателя (см. пример 3.4).

Первый вариант защиты применяют на объектах с постоянным обслуживающим персоналом. При его использовании следует учитывать возможность неправильного действия защиты электродвигателя при обрыве или другой неисправности токовых цепей, а также при неисправности одного из трансформаторов тока. Тем не менее, данный вариант защиты обеспечивает минимизацию объема повреждений в электродвигателях при внутренних междуфазных коротких замыканиях в статорной обмотке машины.

Второй вариант защиты рекомендован для применения на ответственных объектах и обеспечивает ее правильную работу как при обрыве и неисправности токовых цепей, так и при неисправности одного из трансформаторов тока.

Дифференциальную токовую защита с торможением (ДЗТ) применяют в качестве основной. Вместе с ней используют дифференциальную токовую отсечку (ДТО), являющуюся вспомогательной по отношению к ДЗТ.

Существуют исполнения блоков серии БМРЗ-100 в которых предусмотрен только алгоритм ДТО (рис. 3.6), тогда как алгоритм ДЗТ отсутствует. Учитывая, что применение в блоке только алгоритма ДТО без алгоритма ДЗТ некоторыми специалистами не рекомендуется, то во всех выпускаемых в настоящее время блоках серий БМРЗ и БМРЗ-100 предусмотрено применение обоих алгоритмов.

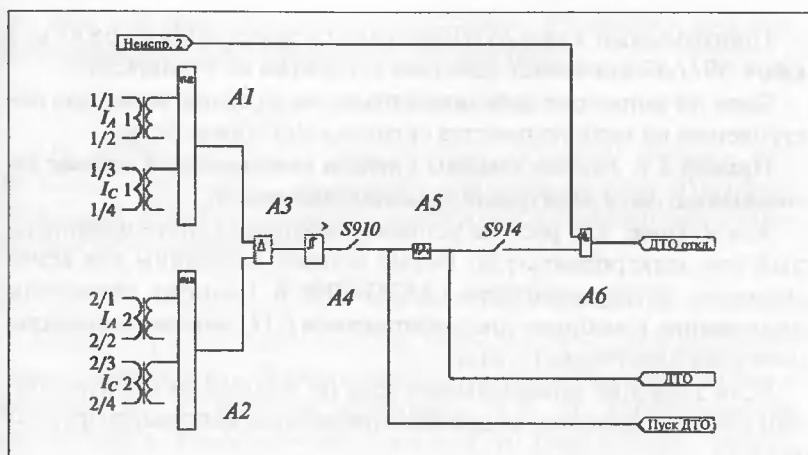


Рис. 3.6. Алгоритм дифференциальной токовой отсечки в блоке БМРЗ

В блоке *A1* алгоритма ДТО выявляют максимальные значения токов со стороны питания (ввода) защищаемого объекта $I_{\text{в}}$, а в блоке *A2* — максимальные значения токов со стороны общей точки (нейтрали) защищаемого объекта $I_{\text{н}}$.

Блок *A3* определяет дифференциальный ток по формуле

$$i_d(t) = i_{\text{в}}(t) - i_{\text{н}}(t). \quad (3.1)$$

Блок *A4* формирует выходной сигнал при выполнении условия (3.1):

$$|i_d(t)| \geq I_{\text{ДТО}}, \quad (3.2)$$

где $I_{\text{ДТО}}$ — уставка срабатывания ДТО.

В данном варианте алгоритма предусмотрен элемент $A5^1$, который обеспечивает его действие с задержкой по времени срабатывания. При задании минимальной (нулевой) уставки по времени срабатывание ДТО происходит не более чем за 35 мс при кратности дифференциального тока по отношению к уставке равной 1,2.

¹ Опыт использования алгоритмов дифференциальной защиты показал, что элемент задержки времени не нужен.

Программный ключ *S910* выводит алгоритм ДТО из работы, а ключ *S911* обеспечивает действие алгоритма на отключение.

Блок *A6* запрещает действие алгоритма на отключение при поступлении на вход устройства сигнала «Неисправность».

Пример 3.1. *Расчет защиты с током срабатывания меньше номинального тока асинхронного электродвигателя.*

Как и ранее, для расчета уставок необходимо знать номинальный ток электродвигателя. Расчет уставок выполним для асинхронного электродвигателя ДАЗО-2000-6 (данные приведены в приложении), выбирая ток срабатывания ДТО меньше номинального тока электродвигателя.

Если значение номинального тока не приведено в документации электродвигателя, то для его определения используем формулу (2.1):

$$I_{\text{ном.дв}} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,961 \cdot 0,9} \approx 222,5 \text{ А.}$$

По номинальному току электродвигателя необходимо выбрать трансформаторы тока с таким коэффициентом трансформации, чтобы при номинальном токе электродвигателя вторичный ток не превышал 5 А. (Рекомендуемый диапазон изменения вторичного тока от 1 до 4 А).

Для полученного значения тока (222,5 А) предварительно выбираем для установки со стороны питания электродвигателя и со стороны нейтрали трансформаторы типа ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $K_I = 300/5$.

Трансформаторы тока этого типа имеют погрешность не более 10 % при кратности тока до 17 ($17 \cdot 300 = 5100$) [13, 14].

Указанная погрешность трансформатора тока обеспечивается только в том случае, если максимальное сопротивление токовых цепей не превышает 0,5 Ом. Поэтому необходимо обратить внимание на то, что в исходных данных для расчета (см. приложение) указаны следующие значения максимальных сопротивлений токовых цепей:

- не более 0,5 Ом со стороны питания электродвигателя;
- не более 1 Ом со стороны нейтрали электродвигателя.

Для оценки пригодности выбранных трансформаторов тока по погрешности, соответствующей предельной кратности тока, определим по формуле (2.2) максимальный бросок пускового тока

(см. рис. 1.3), приняв во внимание тот факт, что данный электродвигатель в процессе самозапуска не участвует:

$$I_{\text{бр.пуск}} = 1,8 \cdot 7 \cdot 222,5 \approx 2804 \text{ А.}$$

Ток срабатывания токовой отсечки выбираем равным или большим полученного расчетного значения броска пускового тока $I_{\gg\gg} = 2810 \text{ А}$ и проверяем выбранные ранее трансформаторы тока по соотношению (2.4):

$$[1,1 I_{\gg\gg}] = 1, 1 \cdot 2810 = 3091 < (17 \cdot 300 = 5100).$$

Вычисления доказали, что для выбранных трансформаторов тока соотношение (2.4) выполняется. Так как погрешность трансформаторов тока не будет превышать 10 %, нет необходимости использовать трансформатор тока другого типа и расчет можно продолжать.

В связи с тем, что необходимость применения дифференциальной токовой защиты связана с коэффициентом чувствительности алгоритма ТО [59], определим ток двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя по формуле (2.5):

$$I_{\text{к}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 5000 \approx 4330 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности [17, 55], который представляет собой отношение расчетного значения фазного тока при металлическом КЗ в пределах защищаемой зоны к фазному току, соответствующему срабатыванию защиты, вычисляем по формуле (2.6):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{4330}{2810} \approx 1,54.$$

В связи с тем, что коэффициент чувствительности меньше 2, в данном примере необходимо применять дифференциальную токовую защиту.

Для дальнейших расчетов необходимо определить полные относительные погрешности трансформаторов тока, установленных со стороны нейтрали электродвигателя:

ϵ_1 — при токе, соответствующем максимальному броску апериодической составляющей пускового тока электродвигателя;

ϵ_2 — при номинальном токе электродвигателя.

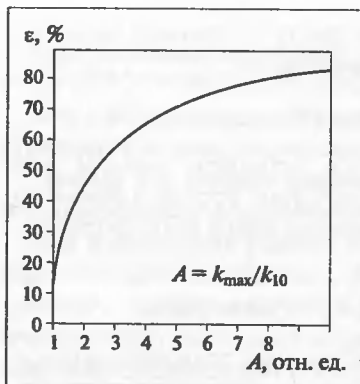


Рис. 3.7. Типовая кривая намагничивания [1]:

$k_{\max}$ — максимальная кратность измеряемого тока по отношению к номинальному току трансформатора тока; k_{10} — допустимая кратность измеряемого тока, соответствующая погрешности $\varepsilon = 10\%$

Для определения этих характеристик воспользуемся типовой кривой намагничивания (рис. 3.7).

Для повышения точности расчета необходимо использовать кривую намагничивания для того типа трансформатора тока, который использован в системе защиты.

Расчетное значение максимального тока небаланса $I_{\text{нб.пуск}}$, соответствующее максимальному броску пускового тока электродвигателя $I_{\text{бр.пуск}}$, с учетом апериодической составляющей рассчитывается по формуле, А,

$$I_{\text{нб.пуск}} = (\varepsilon_1 + \gamma + \delta) I_{\text{бр.пуск}}, \quad (3.3)$$

где γ — основная относительная погрешность измерения дифференциального тока БМРЗ (складывается из погрешностей измерения двух токовых каналов, погрешность каждого равна 2,5 %); δ — технологический запас, обусловленный наличием дополнительной погрешности измерения устройством БМРЗ. Для расчетов значение δ принимают равным половине основной погрешности измерения дифференциального тока ($\delta = 2,5\%$).

Для дальнейших расчетов выбираем значения $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,1$ по кривой, приведенной на рис. 3.7. Подставив соответствующие значения в формулу (3.3), получим

$$I_{\text{нб.пуск}} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 2804 \approx 491 \text{ А.}$$

Максимальный ток небаланса в цепях дифференциальной защиты находим по формуле, в которой учтено значение коэффициента отстройки ($k_{отс} = 1,2$):

$$I_{\text{раб.пуск}} \geq k_{\text{отс}} I_{\text{нб.пуск}} \quad (3.4):$$

Используя полученное значение $I_{\text{нб.пуск}}$, находим

$$I_{\text{раб.пуск}} \geq 1,2 \cdot 491 \approx 590 \text{ А.}$$

Коэффициент торможения дифференциальной защиты вычисляем по формуле

$$k_{\text{торм}} \geq I_{\text{раб.пуск}} / I_{\text{бр.пуск}} = k_{\text{отс}} (\epsilon_1 + \gamma + \delta).$$

Как следует из формулы (3.5), коэффициент торможения зависит от выбранного коэффициента отстройки $k_{\text{отс}}$, а также от погрешностей трансформатора тока и устройства защиты, соответствующих значению броска пускового тока.

Вычисляем коэффициент торможения:

$$k_{\text{торм}} \geq 1,2(0,1 + 0,05 + 0,025) = 0,21.$$

Полученное значение коэффициента торможения округляем в большую сторону до сотых долей.

Следующий этап расчета — определение уставки срабатывания дифференциальной токовой отсечки (ДТО), А,

$$I_{\text{ДТО}} = k_{\text{торм}} I_{\text{бр.пуск}} \quad (3.6)$$

При выборе уставки необходимо учесть необходимость отстройки от максимального тока небаланса при максимальном броске пускового тока электродвигателя, т. е. $I_{\text{ДТО}} \geq I_{\text{нб.пуск}}$.

Подставив полученные ранее значения коэффициента торможения и максимального броска пускового тока в формулу (3.6), получим

$$I_{\text{ДТО}} = 0,21 \cdot 2804 \approx 589 \text{ А.}$$

Для расчета уставки дифференциальной токовой защиты с тор-
можением $I_{ДЗТ}$ необходимо предварительно найти максимальное
значение тока небаланса, A , при номинальном токе двигателя

$$I_{нб.мин\ расч} = (\epsilon_2 + \gamma + \delta) I_{ном.дв}. \quad (3.7)$$

Подставив в формулу полученные ранее значения, получим

$$I_{нб.мин\ расч} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 222,5 = 38,94 \text{ A}.$$

Уставка $I_{ДЗТ}$ должна быть равна или превышать произведение
тока небаланса на коэффициент отстройки:

$$I_{ДЗТ} \geq k_{отс} I_{нб.мин\ расч}, \quad (3.8)$$

где $k_{отс} = 1,2$.

Полученные ранее значения позволяют вычислить по формуле
(3.8) нижнее значение уставки

$$I_{ДЗТ} \geq 1,2 \cdot 0,175 I_{ном.дв} = 0,21 I_{ном.дв}.$$

Как было сказано выше, ток срабатывания дифференциальной
защиты выбирают либо меньше, либо больше номинального тока
защищаемого электродвигателя, при этом значение $I_{ДЗТ}$ должно
находиться в диапазоне от $0,3 I_{ном}$ до $1,2 I_{ном}$.

В связи с тем, что полученное по формуле значение $I_{ДЗТ}$ мень-
ше ($0,21 I_{ном.дв}$), чем минимально рекомендуемое ($0,3 I_{ном.дв}$), то
нижнюю границу уставки $I_{ДЗТ}$ найдем по-другому, умножив зна-
чение номинального тока электродвигателя на нижнюю границу
значения $I_{ДЗТ}$ в долях номинального тока:

$$I_{ДЗТ} = 0,3 I_{ном.дв} = 0,3 \cdot 222,5 = 66,75 \text{ A}. \quad (3.9)$$

Необходимо отметить, что данное соотношение применимо в
том случае, когда уставку срабатывания выбирают ниже номи-
нального тока электродвигателя, а вычисления по формуле (3.9)
дают результат меньше, чем $0,3 I_{ном.дв}$.

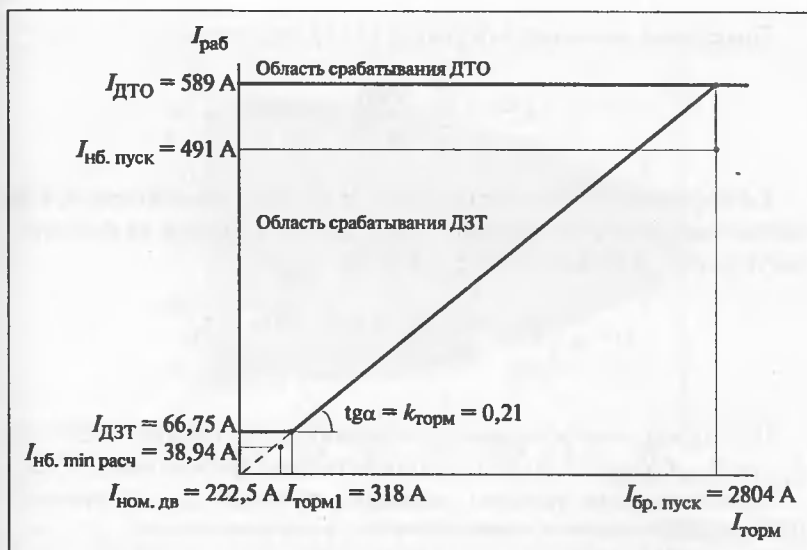


Рис. 3.8. Расчетные характеристики дифференциальной токовой защиты электродвигателя ДАЗО-2000-6

Для построения характеристики срабатывания ДЗТ (см. рис. 3.4) необходимо определить точку $I_{\text{торм1}}$, А, в которой происходит ее излом

$$I_{\text{торм1}} = \frac{I_{\text{ДЗТ}}}{k_{\text{торм}}}. \quad (3.10)$$

Подставив значения в формулу (3.7), получим

$$I_{\text{торм1}} = \frac{66,75}{0,21} \approx 318 \text{ А}.$$

На основании результатов выполненного расчета можно построить характеристику дифференциальной защиты (рис. 3.8).

Проверка чувствительности защиты производится путем определения коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя для ДЗТ:

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{к}}^{(3)}}{I_{\text{ДЗТ}}}. \quad (3.11)$$

Подставив значения в формулу (3.11), получим

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{5000}{66,75} \approx 64,9.$$

Коэффициент чувствительности ДТО при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя определим по этой же формуле, используя полученное ранее значение $I_{\text{ДТО}}$:

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{ДТО}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{к}}^{(3)}}{I_{\text{ДТО}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{5000}{589} = 7,35.$$

Поскольку коэффициенты чувствительности для значений $I_{\text{ДТО}}$ и $I_{\text{ДЗТ}}$ больше 2, то защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Устанавливаем нулевую выдержка времени для алгоритмов ДТО и ДЗТ.

Пример 3.2. Расчет защиты с током срабатывания меньше номинального тока синхронного электродвигателя.

Рассмотрим расчет уставок дифференциальной защиты для синхронного электродвигателя с резистором, включенным в цепь обмотки возбуждения.

Двигатель типа СДНЗ (см. приложение) не участвует в самозапуске.

В связи с тем, что номинальная мощность электродвигателя более 5 МВт, то для его защиты от междуфазных замыканий требуется применение дифференциальной защиты. Одновременно выполним расчет уставок для ТО, которую планируем применять в качестве резервной защиты.

Значение номинального тока не приведено в документации электродвигателя и в данных для расчета.

Подставив известные исходные данные в формулу (2.1), получим:

$$I_{\text{ном. дв}} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,964 \cdot 0,9} \approx 419 \text{ А.}$$

По номинальному току электродвигателя выбираем трансформаторы тока с таким коэффициентом трансформации, чтобы при номинальном токе электродвигателя вторичный ток не превышал

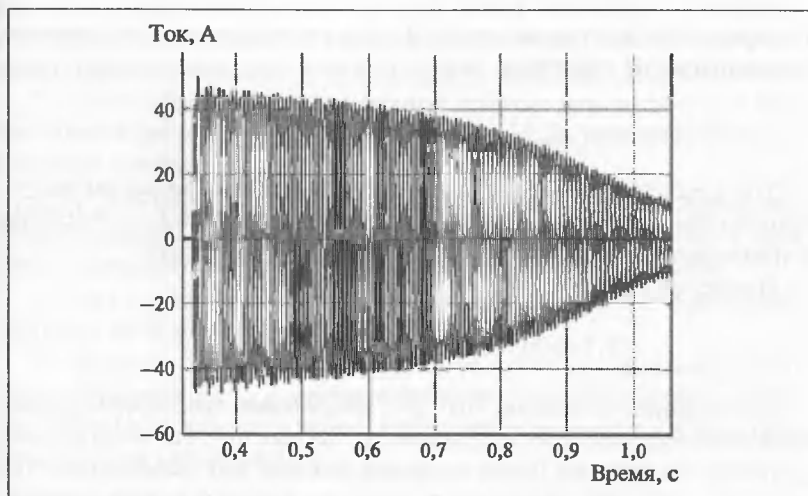


Рис. 3.9. Осциллограмма пуска электродвигателя в номинальном режиме

5 А. Рекомендуемый диапазон изменения вторичного тока от 1 до 4 А.

Для найденного значения тока (419 А) предварительно выбираем трансформаторы тока типа ТЛМ10 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $K_I = 500/5$.

Трансформаторы тока этого типа имеют погрешность не более 10 % при кратности тока до 22 ($22 \cdot 500 = 11000$) [13].

Указанная погрешность трансформатора тока обеспечивается только в том случае, если максимальное сопротивление токовых цепей не превышает 0,5 Ом. Поэтому необходимо обратить внимание на то, что в исходных данных для расчета (см. приложение) указаны следующие значения максимальных сопротивлений токовых цепей:

- не более 0,5 Ом со стороны питания электродвигателя;
- не более 1 Ом со стороны нейтрали электродвигателя.

Для иллюстрации на рис. 3.9 приведена осциллограмма пуска электродвигателя в номинальном режиме.

Для оценки пригодности выбранных трансформаторов тока по погрешности, соответствующей предельной кратности тока, по формуле (2.2) определим максимальный бросок пускового тока

(см. рис. 2.3), учитывая что данный электродвигатель в процессе самозапуска не участвует:

$$I_{\text{бр.пуск}} = 1,8 \cdot 6 \cdot 419 \approx 4525 \text{ A.}$$

Ток срабатывания токовой отсечки выбираем большим полученного расчетного значения броска пускового тока $I_{\gg} = 4600 \text{ A}$ и проверяем выбранные ранее трансформаторы тока:

Проверяем выполнение соотношения (2.4)

$$(1,1 \cdot 4600 = 5060) < (22 \cdot 500 = 11000).$$

Вычисления доказали, что для выбранных трансформаторов тока соотношение (2.4) выполняется. Так как погрешность трансформаторов тока не будет превышать 10 %, нет необходимости использовать трансформатор тока другого типа и расчет уставок можно продолжать.

Для вычисления коэффициента чувствительности находим значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя по формуле (2.5):

$$I_{\kappa}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10000 \text{ A} \approx 8660 \text{ A.}$$

Коэффициент чувствительности [17, 59], определяемый как отношение расчетного значения фазного тока при металлическом КЗ в пределах защищаемой зоны к фазному току, соответствующему срабатыванию защиты, вычисляем по формуле (2.6):

$$K_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{8660}{4600} \approx 1,88.$$

В связи с тем, что мощность данного электродвигателя превышает 5 МВт, дифференциальную токовую защиту необходимо применять независимо от значения коэффициента чувствительности.

Выдержку времени защиты принимаем равной нулю.

Выбранные выше трансформаторы тока типа ТЛМ-10 устанавливаем и со стороны нейтрали электродвигателя. Трансформатор тока типа ТЛМ-10 при кратности тока до 15 ($15 \cdot 500 = 7500$) и мак-

симальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом имеет погрешность, не превышающую 10 % и поэтому отвечает требованиям, предъявляемым к ним в ПУЭ (см. п. 3.2.29).

Для дальнейших расчетов найдем полные относительные погрешности трансформаторов тока (см. рис. 3.7), установленных со стороны нейтрали электродвигателя:

$\varepsilon_1 = 0,1$ — полная относительная погрешность ТТ в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учетом аperiodической составляющей;

$\varepsilon_2 = 0,1$ — полная относительная погрешность ТТ при номинальном токе электродвигателя.

По формуле (3.3) находим расчетное значение максимального тока небаланса $I_{\text{нб.пуск}}$, соответствующее максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учетом аperiodической составляющей $I_{\text{бр.пуск}}$:

$$I_{\text{нб.пуск}} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 4525 \approx 792 \text{ А.}$$

По формуле (3.4) находим максимальный ток небаланса в цепях дифференциальной защиты с учетом значения коэффициента отстройки $k_{\text{отс}} = 1,2$:

$$I_{\text{раб.пуск}} \geq 1,2 \cdot 792 \approx 951 \text{ А.}$$

Как и в предыдущем примере, находим коэффициент торможения по формуле (3.5), а полученное значение округляем в большую сторону до сотых долей:

$$k_{\text{торм}} \geq 1,2 \cdot (0,1 + 0,05 + 0,025) = 0,21.$$

Следующий этап расчета — определение уставки срабатывания ДТО по формуле (3.6). При выборе уставки ДТО следует учесть коэффициент торможения и необходимость отстройки от максимального тока небаланса при максимальном броске пускового тока электродвигателя, т. е. $I_{\text{ДТО}} \geq I_{\text{нб.пуск}}$.

Подставив полученные ранее значения коэффициента торможения и максимального броска пускового тока в формулу (3.5), получим значение уставки ДТО:

$$I_{\text{ДТО}} = 0,21 \cdot 4525 \approx 951 \text{ А.}$$

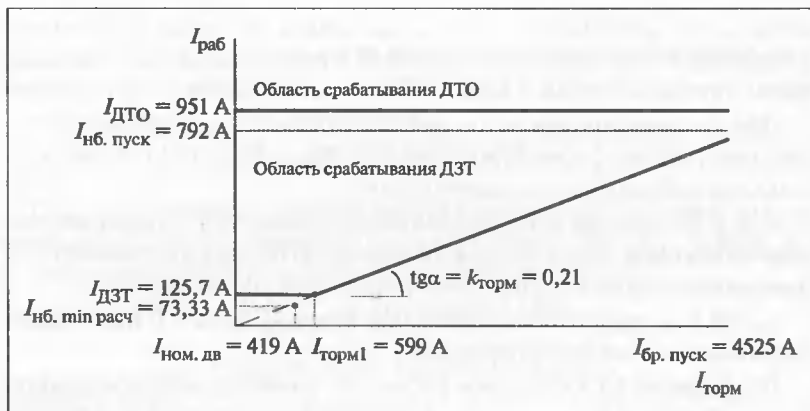


Рис. 3.10. Характеристика дифференциальной защиты электродвигателя СДНЗ мощностью 6300

Максимальное значение тока небаланса при номинальном токе двигателя определяем по формуле (3.7):

$$I_{\text{нб. min расч}} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 419 = 73,33 \text{ A.}$$

Используя полученные ранее результаты, находим по формуле (3.8) уставку

$$I_{\text{ДЗТ}} = 1,2 \cdot 0,175 I_{\text{ном. дв}} = 0,21 I_{\text{ном. дв.}}$$

Полученное расчетное значение уставки $I_{\text{ДЗТ}} < 0,31 I_{\text{ном. дв.}}$, поэтому принимаем $I_{\text{ДЗТ}} = 0,3 I_{\text{ном. дв}} = 0,3 \cdot 419 = 125,7 \text{ A.}$

Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимаются нулевыми.

Для построения характеристики ДЗТ по формуле (3.10) определим ток торможения, при котором выполняется излом характеристики дифференциальной защиты:

$$I_{\text{торм1}} = 125,7 / 0,21 \approx 599 \text{ A.}$$

Проверяем соответствие защиты ДЗТ требованиям ПУЭ, определяя коэффициент чувствительности при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя по формуле (3.11):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{10000}{125,7} \approx 68,9.$$

Так как коэффициент чувствительности больше 2, то защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Характеристика дифференциальной защиты, построенная на основании расчета, приведена на рис. 3.10.

Рассмотрев примеры расчета уставок дифференциальных защит при прямом пуске асинхронного двигателя (пример 3.1) и при пуске синхронного двигателя с резистором в обмотке возбуждения (пример 3.2), перейдем к примеру расчета уставок при реакторном пуске синхронного электродвигателя.

Пример 3.3. Расчет уставок защиты для синхронного электродвигателя СТД-3200-2 с реакторным пуском.

Исходные данные для расчета приведены в приложении. Расчет дифференциальных защит проводим для тока срабатывая меньше номинального тока электродвигателя.

Как и в предыдущих примерах расчет начнем с определения номинального тока электродвигателя по формуле (2.1):

$$I_{\text{ном. дв}} = \frac{3200}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,972 \cdot 0,9} \approx 211 \text{ А.}$$

По номинальному току электродвигателя выбираем трансформаторы тока с таким коэффициентом трансформации, чтобы при номинальном токе электродвигателя вторичный ток не превышал 5 А. Рекомендуемый диапазон изменения вторичного тока от 1 до 4 А.

Для найденного значения тока 211 А предварительно выбираем трансформаторы тока типа ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $K_I = 300/5$.

Погрешность трансформаторов тока этого типа не превышает 10 % (см. [14], с. 118, рис. П2-6) при максимальном сопротивлении токовых цепей 0,5 Ом и кратности тока 17 ($300 \cdot 17 = 5100$).

Все это позволяет использовать данный трансформатор тока со стороны питания электродвигателя.

Для оценки пригодности выбранных трансформаторов тока по погрешности, соответствующей предельной кратности тока, необходимо определить несколько значений.

Сначала по формуле (2.2) найдем максимальный бросок пускового тока при прямом пуске (см. рис. 2.3), учитывая то, что данный электродвигатель в процессе самозапуска не участвует:

$$I_{\text{бр. прям. пуск}} = 1,8 \cdot 6,63 \cdot 211 \approx 2518 \text{ А.}$$

В связи с тем, что данный двигатель запускается с помощью реактора, то для определения максимального броска пускового тока двигателя при реакторном пуске необходимо сначала найти индуктивное сопротивление сети x_c , Ом, при известном значении тока трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя $I_{ш}^{(3)}$:

$$x_c \approx z_c = \frac{U_{ном.дв}}{\sqrt{3} I_{ш}^{(3)}}. \quad (3.12)$$

Подставив известные исходные данные, получим:

$$x_c \approx z_c = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 1700} = 3,4 \text{ Ом.}$$

Полное индуктивное сопротивление двигателя x_d найдем по формуле (2.7), подставив в нее исходные ($U_{ном.дв}$) и расчетные ($I_{>бр.пр.пуск}$) данные:

$$x_d = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 2518} = 2,29 \text{ Ом.}$$

Найдя значения всех величин, входящих в формулу (2.8), можно найти максимальный бросок пускового тока при реакторном пуске электродвигателя:

$$I_{бр.пуск} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot (3,4 + 2,29 + 0,35)} \approx 956 \text{ А.}$$

Округляя полученное значение, принимаем ток срабатывания ТО $I_{>>>} = 1000 \text{ А.}$

Выбранные выше трансформаторы тока типа ТЛМ10-5-82 при токе двигателя $1,1 I_{>>>} = 1100 \text{ А}$ [см. формулу (2.4)] обеспечивают погрешность не более 10 %, что позволяет использовать их в цепи максимальной токовой отсечки (см. ПУЭ, п. 3.2.29).

Значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя находим по соотношению (2.4), а коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ по формуле (2.5):

$$I_k^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1700 \approx 1472 \text{ А;}$$

$$k_{\chi}^{(2)} = \frac{1472}{1000} \approx 1,47.$$

Выдержку времени защиты принимаем равной нулю.

Расчетное значение коэффициента чувствительности ТО оказалось меньше 2, поэтому для защиты данного двигателя от междофазных замыканий дополнительно необходимо применить дифференциальную защиту.

Проверим, насколько подходят выбранные ранее трансформаторы тока типа ТЛМ10-5-82 для установки их со стороны нейтрали, где максимальное сопротивление токовых цепей не более 1 Ом (см. [14], с. 118, рис. П2-6). При таком сопротивлении токовых цепей погрешность трансформатора тока не будет превышать 10% при кратности тока 12 ($12 \cdot 300 = 3600$).

Следовательно, трансформаторы тока удовлетворяют требованиям ПУЭ (п. 3.2.29), поэтому расчет можно продолжить.

Воспользуемся кривой намагничивания электротехнической стали (см. рис. 3.7) и определим для ТТ, установленных со стороны нейтрали электродвигателя, полные относительные погрешности:

- в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учетом апериодической составляющей, $\epsilon_1 = 0,1$;
- при номинальном токе электродвигателя $\epsilon_2 = 0,1$.

Знание погрешности ϵ_1 позволяет вычислить по формуле (3.3) максимальный ток небаланса $I_{\text{нб.пуск}}$, соответствующий максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учетом апериодической составляющей $I_{\text{бр.пуск}}$:

$$I_{\text{нб.пуск}} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 956 \approx 167,3 \text{ А.}$$

Зная погрешность ϵ_2 , по формуле (3.7) можно найти максимальное значение тока небаланса при номинальном токе:

$$I_{\text{нб.мин расч}} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 211 = 37 \text{ А.}$$

Результаты вычислений $I_{\text{нб.пуск}}$ используем для определения максимального тока небаланса в цепях дифференциальной защиты, обусловленного максимальным значением броска пускового тока при выбранном значении коэффициента отстройки $k_{\text{отс}} = 1,2$, применив формулу (3.4):

$$I_{\text{раб.пуск}} \geq 1,2 \cdot 167,3 \approx 201 \text{ А.}$$

Воспользуемся формулой (3.5) и найдем значение коэффициента торможения:

$$k_{\text{торм}} \geq 1,2 \cdot (0,1 + 0,05 + 0,025) = 0,2.$$

Продолжим расчет и найдем по формуле (3.6) уставку срабатывания дифференциальной токовой отсечки $I_{\text{ДТО}}$, обеспечивающую отстройку от максимального тока небаланса при максимальном броске пускового тока электродвигателя $I_{\text{бр.пуск}}$, используя вычисленное значение коэффициента торможения:

$$I_{\text{ДТО}} = 0,21 \cdot 956 \approx 201 \text{ А.}$$

Определим уставку $I_{\text{ДЗТ}}$ по формуле (3.8):

$$I_{\text{ДЗТ}} \geq 1,2 \cdot 0,175 I_{\text{ном.дв}} = 0,21 I_{\text{ном.дв}}.$$

В связи с тем, что по условиям данного примера уставка срабатывания должна быть меньше номинального тока электродвигателя, в соответствии с рекомендациями (3.9) найдем уставку $I_{\text{ДЗТ}}$:

$$I_{\text{ДЗТ}} = 0,3 \cdot 211 = 63,3 \text{ А.}$$

Для построения характеристики ДЗТ необходимо по формуле (3.10) найти значение тока торможения $I_{\text{торм1}}$, при котором происходит излом характеристики дифференциальной защиты:

$$I_{\text{торм1}} = 63,3 / 0,21 \approx 302 \text{ А.}$$

Для ДТО и ДЗТ принимаем нулевые выдержки времени.

В конце расчета необходимо проверить коэффициент чувствительности ДЗТ при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя, воспользовавшись соотношением (3.11)::

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1700}{63,3} \approx 23,3.$$

В связи с тем, что коэффициент чувствительности больше 2, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

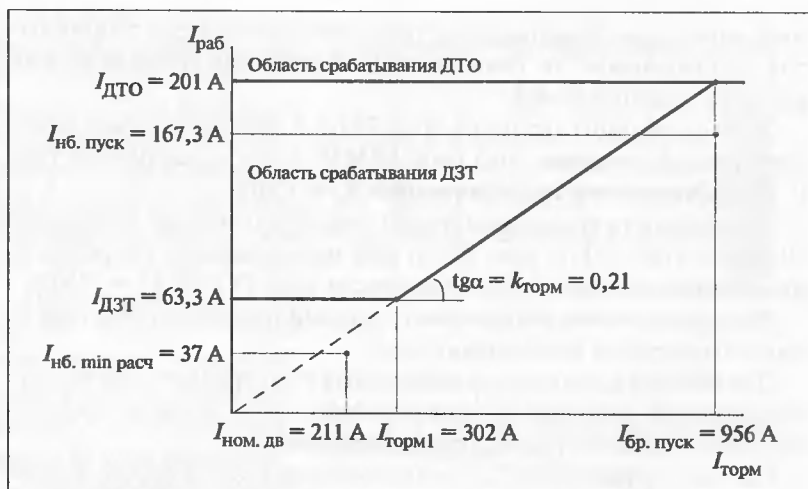


Рис. 3.11. Характеристика дифференциальной защиты электродвигателя СТД-3200-2 с реакторным пуском

Полученные при расчете результаты позволяют построить характеристику работы дифференциальных защит для электродвигателя СТД-3200-2 (рис. 3.11).

Во всех рассмотренных ранее примерах ток срабатывания дифференциальной защиты был меньше номинального тока электродвигателя.

В следующем примере дан расчет для случая, когда ток срабатывания превышает номинальный ток электродвигателя.

Пример 3.4. Расчет уставок защиты для синхронного электродвигателя серии А4 с прямым пуском.

Исходные данные для расчета приведены в приложении.

Расчет дифференциальных защиты произведем для тока срабатывания, превышающего номинальный ток электродвигателя.

Как и в предыдущих примерах, расчет начнем с определения номинального тока электродвигателя по формуле (2.1).

Подставив известные исходные данные в формулу (1.1), получим:

$$I_{\text{ном. дв}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,955 \cdot 0,89} \approx 113,2 \text{ А.}$$

По найденному номинальному току электродвигателя выбираем трансформаторы тока с таким коэффициентом трансформа-

ции, чтобы при номинальном токе электродвигателя вторичный ток не превышал 5 А. Рекомендуемый диапазон изменения вторичного тока от 1 до 4 А.

Для найденного значения тока 213,2 А предварительно выбираем трансформаторы тока типа ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $K_I = 150/5$.

Погрешность трансформаторов тока этого типа не превышает 10 % (см. [14], с. 118, рис. П2-6) при максимальном сопротивлении токовых цепей 0,5 Ом и кратности тока 17 ($150 \cdot 17 = 2550$).

Все это позволяет использовать данный трансформатор тока со стороны питания электродвигателя.

Для оценки пригодности выбранных трансформаторов тока по погрешности, соответствующей предельной кратности тока, необходимо определить несколько значений.

Сначала по формуле (2.2) найдем максимальный бросок пускового тока при прямом пуске (см. рис. 2.3), учитывая, что данный электродвигатель участвует в процессе самозапуска (рис. 3.12):

$$I_{\text{нб.пуск}} = 1,4 k_{\text{апер}} k_{\text{пуск}} I_{\text{ном.дв}} = 1,4 \cdot 1,8 \cdot 5,7 \cdot 113,2 \approx 1626 \text{ А.}$$

Выбираем ток срабатывания ТО $I_{>} = 1650 \text{ А}$. Выдержку времени защиты принимаем равной нулю.

Выбранные выше трансформаторы тока типа ТЛМ10-5-82 при токе двигателя $1,1 I_{>}} = 1815 \text{ А}$ [см. формулу (2.4)] обеспечивают погрешность не более 10 %, что позволяет использовать их в цепи максимальной токовой отсечки (см. [17] п. 3.2.29).

Ток двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя находим по соотношению (2.5), а коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ — по формуле (2.6):

$$I_{\text{к}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 3500 \approx 3031 \text{ А;}$$

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{3031}{1650} \approx 1,84.$$

Расчетное значение коэффициента чувствительности ТО оказалось меньше 2, поэтому для защиты данного двигателя от междоузельных замыканий дополнительно необходимо применить дифференциальную защиту.

Проверим, насколько подходят выбранные ранее трансформаторы тока типа ТЛМ10-5-82 для установки их со стороны нейтрали, где максимальное сопротивление токовых цепей не более 1 Ом (см. [14], с. 118, рис. П2-6).

При таком сопротивлении токовых цепей погрешность трансформатора тока не будет превышать 10 % при номинальном токе двигателя.

Следовательно, трансформаторы тока удовлетворяют требованиям ПУЭ (п. 3.2.29), поэтому расчет можно продолжить.

Воспользуемся кривой намагничивания электротехнической стали (см. рис. 3.7) и определим для ТТ, установленных со стороны нейтрали электродвигателя, полные относительные погрешности:

- в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учетом аperiodической составляющей $\varepsilon_1 = 0,1$;
- при номинальном токе электродвигателя $\varepsilon_2 = 0,1$.

Знание погрешности ε_1 позволяет вычислить по формуле (3.3) максимальный ток небаланса $I_{\text{нб.пуск}}$, соответствующий максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учетом аperiodической составляющей $I_{\text{бр.пуск}}$:

$$I_{\text{нб.пуск}} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 1626 \approx 285 \text{ А.}$$

Зная погрешность ε_2 , по формуле (3.7) можно найти максимальное значение тока небаланса при номинальном токе:

$$I_{\text{нб.мин расч}} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 211 = 37 \text{ А.}$$

Результаты вычислений $I_{\text{нб.пуск}}$ используем для определения максимального тока небаланса в цепях дифференциальной защиты

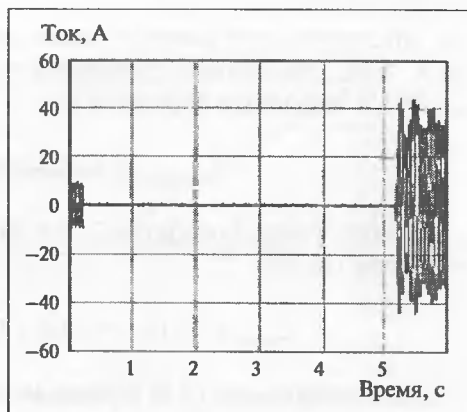


Рис. 3.12. Осциллограмма процесса самозапуска электродвигателя

ты, обусловленного максимальным значением броска пускового тока при выбранном значении коэффициента отстройки $k_{отс} = 1,2$, используя формулу (3.4):

$$I_{\text{раб.пуск}} \geq 1,2 \cdot 285 = 342 \text{ А.}$$

Воспользуемся формулой (3.5) и найдем значение коэффициента торможения:

$$k_{\text{торм}} \geq 1,2 \cdot (0,1 + 0,05 + 0,025) = 0,21.$$

Далее по формуле (3.6) найдем уставку срабатывания дифференциальной токовой отсечки $I_{\text{ДТО}}$, обеспечивающую отстройку от максимального тока небаланса при максимальном броске пускового тока электродвигателя $I_{\text{бр.пуск}}$, используя вычисленное ранее значение

$$I_{\text{ДТО}} = 0,21 \cdot 1626 \approx 342 \text{ А.}$$

Определим уставку $I_{\text{ДЗТ}}$, используя формулу (3.8) и результаты вычислений, выполненных ранее:

$$I_{\text{ДЗТ}} \geq 1,2 \cdot 0,175 I_{\text{ном.дв}} = 0,21 I_{\text{ном.дв}}.$$

По условиям данного примера уставка срабатывания должна быть *больше* номинального тока электродвигателя.

Ранее было указано, что значение $I_{\text{ДЗТ}}$ должно находиться в диапазоне от $0,3 I_{\text{ном}}$ до $1,2 I_{\text{ном}}$. Выбираем верхнюю границу диапазона 1,2 и находим уставку $I_{\text{ДЗТ}}$ для этого значения:

$$I_{\text{ДЗТ}} = 1,2 I_{\text{ном.дв}} \approx 135,8 \text{ А.}$$

Для построения характеристики ДЗТ необходимо по формуле (3.10) найти значение тока торможения $I_{\text{торм1}}$, при котором происходит излом характеристики дифференциальной защиты:

$$I_{\text{торм1}} = 135,8 / 0,21 = 647 \text{ А.}$$

Для защит ДТО и ДЗТ принимаем нулевые выдержки времени.

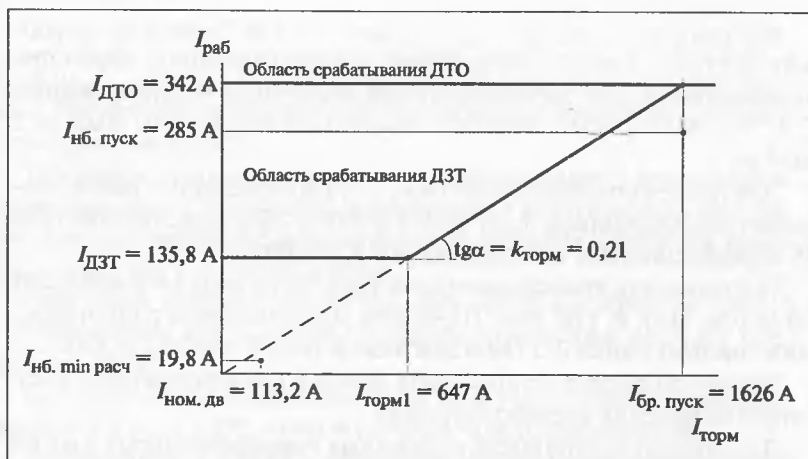


Рис. 3.13. Характеристика дифференциальной защиты электродвигателя серии А4 мощностью 1000 кВт

В конце расчета необходимо проверить коэффициент чувствительности ДЗТ при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя, воспользовавшись соотношением (3.11):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{3500}{135,8} \approx 22,3.$$

В связи с тем, что коэффициент чувствительности больше 2, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Полученные результаты расчета позволяют построить характеристику работы дифференциальных защит для электродвигателя серии А4 (рис. 3.13).

Пример 3.5. Расчет уставок защиты для ячейки питания от сети асинхронного электродвигателя АО-3150-6000 (см. рис. 1.17).

Расчет дифференциальной защиты производим для тока срабатывания, превышающего номинальный ток электродвигателя. Исходные данные для расчета приведены в приложении.

Как и в предыдущих примерах, расчет начнем с определения номинального тока электродвигателя по формуле (2.1):

$$I_{\text{ном. дв}} = \frac{3150}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,968 \cdot 0,83} \approx 377,3 \text{ А.}$$

По номинальному току электродвигателя выбираем трансформаторы тока с таким коэффициентом трансформации, чтобы при номинальном токе электродвигателя вторичный ток не превышал 5 А. Рекомендуемый диапазон изменения вторичного тока от 1 до 4 А.

Для найденного значения тока (377,3 А) предварительно выбираем трансформаторы тока типа ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $K_I = 400/5$.

Погрешность трансформаторов тока этого типа не превышает 10 % (см. [14], с. 118, рис. П2-6) при максимальном сопротивлении токовых цепей 0,5 Ом и кратности тока 17 ($400 \cdot 22 = 8800$).

Все это позволяет использовать данный трансформатор тока со стороны питания электродвигателя.

Для оценки пригодности выбранных трансформаторов тока по погрешности, соответствующей предельной кратности тока, необходимо определить несколько значений.

Сначала по формуле (2.2) найдем максимальный бросок пускового тока при прямом пуске (см. рис. 2.3), учитывая, что данный электродвигатель участвует в процессе самозапуска, в том числе и при переключении ячеек питания:

$$I_{\text{бр.пуск}} = 1,4 \cdot 1,8 \cdot 5,5 \cdot 377,3 \approx 5229 \text{ А.}$$

Выбираем ток срабатывания ТО $I_{>>>} = 5250 \text{ А}$. Выдержку времени защиты принимаем равной нулю.

Выбранные выше трансформаторы тока типа ТЛМ10-5-82 при токе двигателя $1,1 I_{>>>} = 5775 \text{ А}$ [см. неравенство (2.4)] обеспечивают погрешность не более 10 %, что позволяет использовать их в цепи максимальной токовой отсечки (см. ПЭУ, п. 3.2.29).

Значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя находим по соотношению (2.5), а значение коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ по формуле (2.6):

$$I_{\kappa}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 8000 \approx 6928 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\kappa}^{(2)}}{I_{>>>}} = \frac{6928}{5250} \approx 1,32.$$

Согласно расчету коэффициент чувствительности ТО оказался меньше 2, поэтому для защиты данного двигателя от междуфазных замыканий необходимо дополнительно применить дифференциальную защиту.

Проверим, насколько подходят выбранные ранее трансформаторы тока типа ТЛМ10-5-82 для установки их со стороны нейтрали, где максимальное сопротивление токовых цепей не более 1 Ом (см. [14], с. 118, рис. П2-6).

При таком сопротивлении токовых цепей и кратности тока 15 ($15 \cdot 400 = 6000$) погрешность трансформатора тока не будет превышать 10 %.

Следовательно, трансформаторы тока удовлетворяют требованиям ПУЭ (п. 3.2.29), поэтому расчет можно продолжить.

Воспользуемся кривой намагничивания электротехнической стали (см. рис. 3.7) и определим для ТТ, установленных со стороны нейтрали электродвигателя, полные относительные погрешности:

- в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учетом апериодической составляющей, $\varepsilon_1 = 0,1$;
- при номинальном токе электродвигателя $\varepsilon_2 = 0,1$.

Знание погрешности ε_1 позволяет по формуле (3.3) вычислить максимальный ток небаланса $I_{\text{нб.пуск}}$, соответствующий максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учетом апериодической составляющей $I_{\text{бр.пуск}}$:

$$I_{\text{нб.пуск}} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 5229 \approx 915 \text{ А.}$$

Зная погрешность ε_2 , по формуле (3.7) можно найти максимальное значение тока небаланса при номинальном токе:

$$I_{\text{нб. min расч}} = (0,1 + 0,05 + 0,0250) \cdot 377,3 = 66 \text{ А.}$$

Результаты вычислений $I_{\text{нб.пуск}}$ используем для определения максимального тока небаланса в цепях дифференциальной защиты, обусловленного максимальным значением броска пускового тока при выбранном значении коэффициента отстройки $k_{\text{отс}} = 1,2$, применив формулу (3.4):

$$I_{\text{раб.пуск}} \geq 1,2 \cdot 915 \approx 1098 \text{ А.}$$

Воспользуемся формулой (3.5) и найдем значение коэффициента торможения:

$$k_{\text{торм}} = 1,2(0,1 + 0,05 + 0,025) = 0,21.$$

Найдем по формуле (3.6) уставку срабатывания дифференциальной токовой отсечки $I_{\text{ДТО}}$, обеспечивающую отстройку от максимального тока небаланса при максимальном броске пускового тока электродвигателя $I_{\text{бр.пуск}}$, используя вычисленное ранее значение коэффициента торможения:

$$I_{\text{ДТО}} = 0,21 \cdot 5229 \approx 1098 \text{ А.}$$

Определим уставку $I_{\text{ДЗТ}}$, используя формулу (3.8) и результаты вычислений, выполненных ранее:

$$I_{\text{ДЗТ}} = 1,2 \cdot 0,175 I_{\text{ном.дв}} = 0,21 I_{\text{ном.дв.}}$$

В связи с тем, что по условиям данного примера уставка срабатывания должна быть больше номинального тока электродвигателя, в соответствии с рекомендациями находим уставку

$$I_{\text{ДЗТ}} = 1,2 \cdot 377,3 \approx 453 \text{ А.}$$

Для построения характеристики ДЗТ необходимо по формуле (3.10) найти значение тока торможения $I_{\text{торм1}}$, при котором происходит излом характеристики дифференциальной защиты:

$$I_{\text{торм1}} = 453/0,21 \approx 2157 \text{ А.}$$

Для защит ДТО и ДЗТ принимаем нулевые выдержки.

Трансформаторы удовлетворяют требованиям (см. [17] п. 3.2.29) по установке в цепях дифференциальной защиты, поскольку обеспечивают погрешность не более 10 % при токе двигателя соответствующем $I_{\text{торм1}}$.

В конце расчета необходимо проверить коэффициент чувствительности ДЗТ при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя, воспользовавшись соотношением (3.11):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{8000}{453} \approx 15,3.$$

Поскольку коэффициент чувствительности больше 2, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

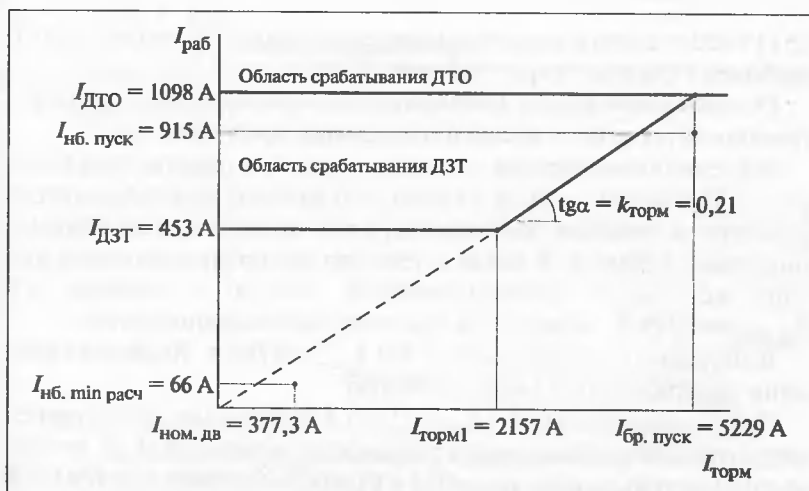


Рис. 3.14. Характеристика дифференциальной защиты для ячейки питания электродвигателя АО-3150-6000 от сети (см. рис. 1.1)

Предусматриваем блокирование алгоритмов дифференциальных защит при снижении максимального из трех фазных токов ниже значения, соответствующего 75 % тока холостого хода электродвигателя.

Построенная по результатам расчета уставок характеристика дифференциальных защит приведена на рис. 3.14.

Пример 3.6. Расчет уставок защиты для ячейки питания устройства плавного пуска (УПП).

В схеме используется асинхронный электродвигатель АО-3150-6000 с плавным пуском, а алгоритм ДЗТ не применяется (см. рис. 1.17).

Исходные данные для расчета приведены в приложении.

В связи с тем, что некоторые расчетные данные для данного электродвигателя были найдены в примере 3.4, используем их при выполнении расчетов в этом примере.

Номинальный ток электродвигателя равен 377,3 А.

Для этого значения номинального тока выбираем трансформаторы тока, устанавливаемые со стороны питания УПП, аналогичные выбранным ранее — ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $K_I = 400/5$. Трансформатор тока ТЛМ10-5-82 имеет погрешность не более 10 % при кратности тока

15 ($15 \cdot 400 = 6000$) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом (см. [14], с. 118, рис. П2-6).

Оценим пригодность выбранных трансформаторов тока по погрешности, соответствующей предельной кратности тока.

Максимальный бросок пускового тока при прямом пуске (см. рис. 2.3) находим исходя из того, что данный электродвигатель участвует в процессе самозапуска, в том числе и при переключении ячеек питания. В связи с тем, что расчет производится для того же самого электродвигателя, что и в примере 3.5 $I_{\text{бр.пуск}} = 5229$ А, используем значение, вычисленное ранее.

Выбираем ток срабатывания ТО $I_{>>>} = 5250$ А. Выдержку времени защиты устанавливаем нулевую.

При токе двигателя $1,1 I_{>>>} = 5775$ А выбранные ранее трансформаторы тока обеспечивают погрешность не более 10 %, поэтому они могут быть использованы и в цепях максимальной токовой отсечки.

Значение тока двухфазного КЗ на вводах питания УПП определено ранее: $I_{\text{к}}^{(2)} = 6928$ А.

Коэффициент чувствительности для данного примера будет таким же, который вычислен в примере 3.5, т. е. $k_{\text{ч}}^{(2)} = 1,32$.

Учитывая это, для защиты электродвигателя от междуфазных замыканий необходимо применить дифференциальную защиту. В соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.17, в ячейке питания применен только алгоритм ДТО.

Расчет уставок для этого алгоритма начнем с определения максимального броска пускового тока при плавном пуске, А,

$$I_{\text{бр.пл.п}} = k_{\text{УПП}} I_{\text{ном.дв}}, \quad (3.13)$$

где $k_{\text{УПП}}$ — предельная кратность пускового тока при использовании УПП.

Как правило, это значение выбирается от 3 до 4 в соответствии с рекомендациями изготовителя УПП.

Подставив известные данные в (3.13) и произведя вычисления, получим

$$I_{\text{бр.пл.п}} = 4 \cdot 377,3 = 1509 \text{ А.}$$

Уставку срабатывания ДТО, А, найдем по формуле

$$I_{\text{ДТО}} = 1,1 I_{\text{бр.пл.п}}, \quad (3.14)$$

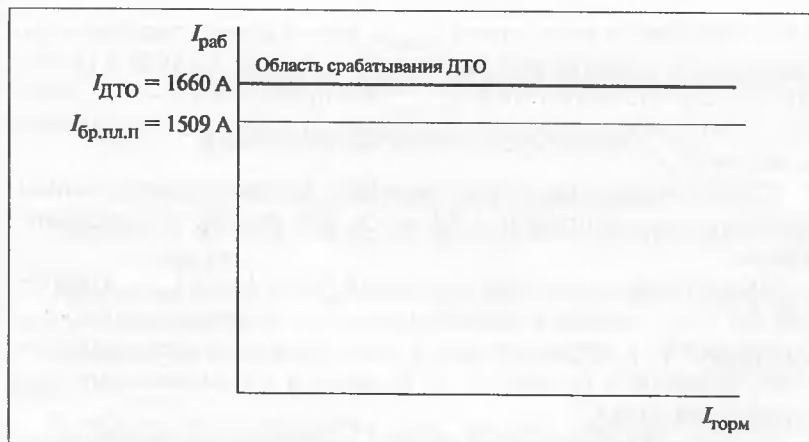


Рис. 3.15. Характеристика дифференциальной защиты электродвигателя АО-3150-6000 для ячейки питания УПП (см. рис. 1.17)

Подставив известные данные в (3.14) и произведя вычисления, получим: $I_{\text{ДТО}} = 1,1 \cdot 1509 = 1660 \text{ А}$.

При токе двигателя, соответствующем уставке $I_{\text{ДТО}} = 1660 \text{ А}$ выбранные трансформаторы тока имеют погрешность, не превышающую 10 % и поэтому удовлетворяют требованиям ПУЭ (п. 3.2.29).

Найдем коэффициент чувствительности ДТО при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя по формуле (3.11):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{8000}{1660} \approx 4,17.$$

Так как значение коэффициента чувствительности больше 2, то данная защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

На основании выполненных расчетов строим характеристику защиты (рис. 3.15).

Сравним построенные по результатам расчетов характеристики ДТО для разных электродвигателей в примерах 3.1 – 3.6. Для каждого из примеров область срабатывания ДТО расположена выше соответствующей линии $I_{\text{ДТО}}$. Ниже соответствующей линии $I_{\text{ДТО}}$ расположена линия, соответствующая значению $I_{\text{нб.пуск}} (I_{\text{бр.пл.п}})$ для соответствующего примера расчета.

Точки пересечения линий $I_{ДТО}$ с вертикалями, восстановленными к оси ординат в точках 956 А, 2804 А, 4525 А и 1626 А (значения броска пускового тока $I_{бр.пуск}$ для примеров 3.1 — 3.5), соответствуют точкам пересечения характеристик ДЗТ с характеристиками ДТО.

Сравним теперь характеристики ДЗТ, построенные по данным, рассчитанным в примерах 3.1 — 3.5, для разных электродвигателей.

Независимо от расчетных значений токов $I_{ДЗТ}$ и $I_{торм1}$ в примерах 3.1 — 3.3 значение коэффициента торможения одинаково и составляет 0,21, следовательно, угол наклона всех трех характеристик одинаков и не зависит от мощности и номинального тока электродвигателя.

Линии, ограничивающие область срабатывания дифференциальной защиты с торможением справа, на всех характеристиках проходят через начало координат и точку с координатами $I_{ДТО}$ и $I_{бр.пуск}$.

Как было отмечено в примере 3.1, значение коэффициента торможения зависит от выбранного коэффициента отстройки $k_{отс}$, а также от погрешностей измерения броска пускового тока трансформатором тока и устройством защиты в соответствии с формулой (3.5).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА УСТАВОК

Асинхронные электродвигатели

Двухскоростной двигатель АДО-1600/1000-10/12

Мощность на валу двигателя для первой частоты вращения:

$$P_{\text{ном.дв1}} = 1000 \text{ кВт.}$$

Мощность на валу двигателя для второй частоты вращения:

$$P_{\text{ном.дв2}} = 1600 \text{ кВт.}$$

Коэффициент мощности для первой частоты вращения:

$$\cos \varphi_1 = 0,53.$$

Коэффициент мощности для второй частоты вращения:

$$\cos \varphi_2 = 0,8.$$

Номинальное напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 6 \text{ кВ.}$

КПД для первой частоты вращения: $\eta_1 = 0,92.$

КПД для второй частоты вращения: $\eta_2 = 0,95.$

Кратность пускового тока для первой частоты вращения:

$$k_{\text{пуск1}} = 6,7.$$

Кратность пускового тока для второй частоты вращения:

$$k_{\text{пуск2}} = 6,5.$$

Ток трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя:

$$I_{\text{ш}}^{(3)} = 8 \text{ кА.}$$

Двигатель участвует в процессе самозапуска, который может осуществляться как на первой, так и на второй частоте вращения.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны питания электродвигателя (проектное значение) — не более 0,5 Ом.

Электродвигатели серии А4

Двигатель мощностью 1000 кВт

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 1000 \text{ кВт.}$

Коэффициент мощности: $\cos \varphi = 0,89.$

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 6 \text{ кВ.}$

КПД: $\eta = 0,955.$

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 5,7.$

Ток трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя:

$$I_{\text{ш}}^{(3)} = 3,5 \text{ кА.}$$

Пуск двигателя прямой от напряжения питающей сети.

Двигатель участвует в самозапуске.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны питания электродвигателя (по проекту) — не более 0,5 Ом.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны вывода нейтрали электродвигателя (по проекту) — не более 1 Ом.

Двигатель мощностью 630 кВт

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 630$ кВт.

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,88$.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 6$ кВ.

КПД: $\eta = 0,952$.

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 5,5$.

Ток трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя: $I_{\text{ш}}^{(3)} = 5$ кА.

Электродвигатель подключен медным кабелем с бумажной изоляцией, площадью сечения 185 мм² и длиной 40 м.

Суммарное значение тока ОЗЗ сети на вводах питания АД, в которой работает этот двигатель, составляет $I_{\text{озз}}^{(1)} = 1,4$ А.

Трансформатор тока нулевой последовательности типа ТЗР.

Двигатель мощностью 800 кВт

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 800$ кВт.

Номинальный ток двигателя: $I_{\text{ном.дв}} = 57$ А.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 10$ кВ.

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 5,5$.

Пуск прямой от питающей сети.

Охлаждение обмоток статора — косвенное. Вентилятор охлаждения закреплен на валу двигателя.

Вариант 1.

Двигатель соответствует требованиям ГОСТ 183—74.

Время пуска (по проекту): $t_{\text{пуск}} = 5$ с.

Вариант 2.

Кратность пускового момента: $k_{\text{м}} = 1,9$.

Номинальная частота вращения двигателя: $\omega_{\text{ном}} = 1000$ об/мин.

Двигатель соответствует требованиям ГОСТ Р 52776—2007.

Время пуска (по проекту): $t_{\text{пуск}} = 10$ с.

Класс изоляции двигателя: F (с использованием по классу V).

Асинхронный электродвигатель ДАЗО-2000-6

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 2000$ кВт.

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,9$.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 6$ кВ.

КПД: $\eta = 0,961$.

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 7$.

Ток трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя:
 $I_{ш}^{(3)} = 5 \text{ кА}$.

Пуск двигателя прямой от напряжения питающей сети.

Двигатель в самозапуске не участвует.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны питания электродвигателя (по проекту) — не более 0,5 Ом.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны нейтрали электродвигателя (по проекту) — не более 1 Ом.

Электродвигатель типа АО-3150-6000

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 3150 \text{ кВт}$.

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,83$.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 6 \text{ кВ}$.

КПД: $\eta = 0,968$.

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 5,5$.

Ток трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя и на вводах УПП: $I_{ш}^{(3)} = 5 \text{ кА}$.

Пуск двигателя плавный, в соответствии с настройками УПП, максимальная кратность пускового тока: $k_{\text{упп}} = 4$.

Двигатель участвует в самозапуске (в том числе и при переключении ячеек питания).

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны питания электродвигателя (по проекту) — не более 0,5 Ом.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны нейтрали электродвигателя (по проекту) — не более 1 Ом.

Синхронные электродвигатели

Электродвигатель типа СДНЗ

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 6300 \text{ кВт}$.

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,9$.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 10 \text{ кВ}$.

КПД: $\eta = 0,964$.

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 6$.

Ток трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя:
 $I_{ш}^{(3)} = 10 \text{ кА}$.

Пуск двигателя асинхронный, прямой, от полного напряжения сети с включенным резистором в цепь обмотки возбуждения.

Двигатель не участвует в самозапуске.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны питания электродвигателя (по проекту) — не более 0,5 Ом.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны нейтрали электродвигателя (по проекту) — не более 1 Ом.

Электродвигатель типа СТД-4000-2

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 4000$ кВт.

Полная мощность двигателя: $S_{\text{ном.дв}} = 4560$ кВ·А.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 10$ кВ.

Сверхпереходное сопротивление двигателя: $x_d'' = 14,29$ %.

Сопротивление двигателя: $x_d = 185,1$ %.

Электродвигатель типа СТД-3200-2

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 3200$ кВт.

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,9$.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 10$ кВ.

КПД: $\eta = 0,972$.

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 6,63$.

Ток трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя: $I_{\text{ш}}^{(3)} = 1,7$ кА.

Пуск двигателя реакторный, после завершения пуска двигатель продолжает работать через токоограничивающий бетонный реактор типа БР-10-1000-035.

Двигатель в самозапуске не участвует.

Длительно допустимый ток реактора: 1000 А

Номинальное индуктивное сопротивление реактора: 0,35 Ом

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны питания электродвигателя (по проекту) — не более 0,5 Ом.

Максимальное сопротивление токовых цепей со стороны нейтрали электродвигателя (по проекту) — не более 1 Ом.

Электродвигатель типа СТД-6300-2

Мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 6300$ кВт.

Напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 10$ кВ.

Коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,9$.

КПД: $\eta = 0,975$.

Кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 6,28$.

Двигатель подключен тремя медными кабелями с бумажной изоляцией сечением 185 мм² длиной 100 м.

Суммарное значение тока ОЗЗ на частоте 50 Гц сети, в которой работает этот СД, составляет $I_{\text{ОЗЗ}}^{(1)} = 0,5$ А.

Есть необходимость использования ОЗЗ с выдержкой времени для отстройки от переходных режимов.

Общие характеристики синхронных электродвигателей

В табл. П.1 – П.3 приведена информация о емкости статорных обмоток и эквивалентном сопротивлении для некоторых типов синхронных электродвигателей в зависимости от напряжения и мощности, а также о допустимом перегреве изоляции обмоток.

Таблица П.1. Емкость статорных обмоток

Тип СД	Мощность, кВт	Емкость, мкФ, при напряжении	
		6 кВ	10 кВ
СТД-5000-2	5000	0,085	0,11
СТД-6300-2	6300	0,11	0,11
СТД-8000-2	8000	0,11	0,17
СТД-10000-2	10000	0,15	0,17
СТД-1250002	125000	0,15	0,22

Таблица П.2. Эквивалентное сопротивление электродвигателей

Тип СД	Номинальное напряжение, кВ	$R_{\text{экв.дв.}}$ Ом
СТД-4000-2	6	0,210
СТД-4000-2	10	0,600
СТД-12500-2	6	0,067
СТД-12500-2	10	0,197

Таблица П.3. Допустимая кратность перегрева

Класс изоляции*	Предельно допустимая температура перегрева, °С	k_{max}
A (A)	65	1,000
E (A)	80	1,231
B (E)	90	1,125
F (B)	115	1,278
H (F)	140	1,217

* В скобках в виде класса изоляции указана фактическая температура, при которой работают обмотки электродвигателя. Например, если обмотка, имеющая изоляцию класса В, работает при температуре, не превышающей 80 °С, считается, что она используется как изоляция класса Е.

Сведения об удельном емкостном токе линии, выполненной кабелем с бумажной изоляцией, приведены в табл. П.4.

Таблица П.4. Удельный емкостной ток в зависимости от напряжения сети

Площадь сечения жил кабеля, мм ²	Удельный емкостной ток I_C , А/км, при напряжении сети	
	6 кВ	10 кВ
16	0,40	0,55
25	0,50	0,65
35	0,58	0,72
50	0,68	0,80
70	0,80	0,92
95	0,90	1,04
120	1,00	1,16
150	1,18	1,30
185	1,25	1,47
240	1,45	1,70

Значения коэффициентов трансформации для некоторых типов трансформаторов тока нулевой последовательности ТТНП приведены в табл. П.5.

Таблица П.5. Коэффициенты трансформации ТТНП

Тип трансформатора тока	Коэффициент трансформации
ТЗЛ	1/25
ТЗЛМ	1/25
ТЗР	1/18
ТЗРЛ	1/30

Список литературы

Книги и статьи в печатных изданиях

1. Александров А. М. Выбор уставок срабатывания защит асинхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Александров В. Ф., Езерский В. Г., Захаров О. Г., Мальшев В. С. Частотная разгрузка в энергосистемах. В 2-х частях (Вып. 8 (104) Алгоритмы и устройства; Вып. 9 (105) Аварийные режимы и уставки). М.: НТФ «Энергопрогресс», 2007.
3. Трансформаторы тока. В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, В. М. Кибель и др. Л.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Беляев А. В. Противоаварийное управление в узлах нагрузки с синхронными двигателями большой мощности. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004
5. Баглейбтер О. И., Сабраманиан С. Использование дополнительного торможения ДЗЛ в переходных режимах // Релейщик. 2011. № 1. Июль. С. 34.
6. Бульчев А. В., Езерский В. Г., Захаров О. Г., Поздеев Н. Д. Исследование цифровых устройств серии БМРЗ-Д для защиты электродвигателей на физической модели // Энергетик. 2006. № 3. С. 19 – 22.
7. Вавин В. Н. Релейная защита блоков турбогенератор – трансформатор. М.: Энергоиздат, 1982.
8. Воронецкий А. В. Современные центробежные компрессоры. М.: Премиум Инжиниринг, 2007.
9. Емельянцева А. С., Петров С. Логика ЦРЗА и цепей вторичной коммутации. Опасности непрофессиональных решений // Новости электротехники. 2011. № 2 (68).
10. Захаров О. Г. Снижение требований к РЗА недопустимо // Новости электротехники. 2011. № 2 (68).
11. Захаров О. Г., Фрейцис И. И. Метод определения коэффициента загрузки асинхронного электродвигателя // Вопросы судостроения. Сер. Судовая электротехника и связь. 1985. Вып. 42. С. 78.
12. Захаров О. Г., Фрейцис И. И. Энергосберегающий метод испытаний на нагревание судового электрооборудования // Вопросы судостроения. Сер. Промышленная энергетика. 1983. Вып. 3. С. 82.
13. Корогодский В. И., Кужеков С. Л., Паперно Л. Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1987.

14. Королев Е. П., Либерзон Э. М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. М.: Энергия, 1980.
15. Костенко Л. М., Пиотровский Л. М. Электрические машины. В 2-х частях. М.: Энергия, 1973.
16. Манилов А. М. Способ повышения чувствительности защит от однофазных замыканий на землю // Энергоэксперт. 2011. № 4(27). С. 52.
17. Правила устройства электроустановок. М.: Госэнергонадзор России, 1998.
18. Слодарж М. И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных двигателей. М.: Энергия, 1977.
19. Соловьев А. Л. Защита генераторов малой и средней мощности терминалами «Сириус-ГС». М.: НТФ «Энергопрогресс», 2009.
20. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984.
21. Фигурнов Е. П., Жарков Ю. И., Петрова Т. Е. Релейная защита сетей тягового электроснабжения переменного тока. М.: Маршрут, 2006.
22. Чернобровов Н. В. Семенов В. А. Релейная защита энергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1998.
23. Шабад М. А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6 – 35 кВ. СПб.: ПЭИПК, 2001.
24. Шабад М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. СПб.: ПЭИПК, 2008.
25. Шабад М. А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. Экспериментальная и расчетная проверки (Конспект лекций). СПб.: ПЭИПК, 2010.
26. Шнеерсон Э. М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007.

Нормативные документы

27. ГОСТ 183–74. Межгосударственный стандарт. Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия (отменен 01.07.2010).
28. ГОСТ 7746–2001. Межгосударственный стандарт. Трансформаторы тока. Общие технические условия.
29. ГОСТ 8865–93. Межгосударственный стандарт. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация.

30. ГОСТ 13109—97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
31. ГОСТ 26522—85. Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения.
32. ГОСТ 27514—87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.
33. ГОСТ 29176—91. Короткие замыкания в электроустановках. Методика расчета в электроустановках постоянного тока.
34. ГОСТ 50254—92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания.
35. ГОСТ 50270—92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ.
36. ГОСТ Р 52776—2007. Национальный стандарт РФ. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики (введен с 01.01.2008).
37. РД 153-34.0-20.527—98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования.
38. РД 153-34.0-35.301-2002. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения.
39. РД 34.35.310—97. Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем. М.: ОРГРЭС, 1997.
40. СТО ДИВГ-046-2012. Терминалы релейной защиты синхронных и асинхронных электродвигателей 6—10 кВ. Расчет уставок. Методические указания. СПб.: НТЦ «Механотроника», 2012.

Статьи и информационные материалы в Интернете

41. Алгоритмы защиты, выполняемые БМРЗ в кодах ANSI // http://bmrz-zakharov.narod.ru/new/_ANSI.htm.
42. Блокирование или блокировка // Материал размещен в «Лексиконе релейщика»: <http://maximarsenev.narod.ru/Slovar/blok.htm>.
43. Блокирование // <http://rza.org.ua/glossary/read/Blokirovanie.html>.
44. Блокировка // <http://rza.org.ua/glossary/read/Blokirovka.html>.

45. Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г. Новый алгоритм защиты электродвигателей от перегрузки // http://olgezaharov.narod.ru/2011/overload_new.htm.
46. Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г. Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Токовая отсечка // <http://bmrz-zakharov.narod.ru/raschet/to.htm> и <http://www.elec.ru/articles/raschet-ustavok-dlya-cifrovyyh-ustroystv-relejno>.
47. Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г. Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Часть 2. Дифференциальная защита электродвигателя // <http://bmrz-zakharov.narod.ru/raschet/DZT.DTO.htm> и <http://www.elec.ru/articles/raschet-ustavok-dlya-cifrovyyh-ustroystv-relejnoj-z>.
48. Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г. Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Часть 3. Алгоритм дифференциальной защиты электродвигателя с торможением // <http://bmrz-zakharov.narod.ru/raschet/DZT.DTO2.htm> и <http://www.elec.ru/articles/raschet-ustavok-dlya-cifrovyyh>.
49. Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г. Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Часть 4. Защита от замыканий на землю // <http://bmrz-zakharov.narod.ru/raschet/ZZ2.htm> и <http://www.elec.ru/articles/raschet-ustavok-dlya-cifrovyyh-ustroystv-relejno/> и <http://www.mnip.ru/analytics/212582>.
50. Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г. Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Часть 5. Защита электродвигателей от перегрузки // <http://www.bmrz-zakharov.narod.ru/raschet/overload.htm>.
51. Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г. Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Часть 6. Защита электродвигателей от перегрузки с помощью алгоритма «тепловая модель электродвигателя» // <http://www.elec.ru/articles/raschet-ustavok-dlya-cifrovyyh-ustro6/> и <http://bmrz-zakharov.narod.ru/raschet/overload2.htm>.
52. Гондуrow С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Захаров О. Г. Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Часть 7. Уставки для алгоритма защиты синхронного двигателя от асинхронного режима // <http://elec.ru/articles/raschet-ustavok-dlya-cifrovyyh-ustroystv-relej>.
53. ДИВГ.648228.001 ДЗ. Методические указания по расчету уставок защит синхронных и асинхронных электродвигателей 6 – 10 кВ // http://rzdoro.narod.ru/mtr_1.files/mur_6_10.pdf.
54. Езерский В. Г. Комбинированная защита от однофазных замыканий на землю // <http://www.energo-info.ru/content/view/3546/108>.

55. **Защита от аварийных режимов работы асинхронных электродвигателей** // <http://www.normalizator.com/manuals/articles/motor-protection>.
56. **Информация об алгоритмах, выполняемых блоками БМРЗ и БМРЗ-100 различных исполнений и модификаций** // Материал размещен на странице: <http://bmrz-zakharov.narod.ru/algoritmy.htm>.
57. **Ионистор** // <http://maximarsenev.narod.ru/ionistor.htm>.
58. **Исследование цифровых устройств защиты электродвигателей серии БМРЗ-Д на физической модели** // <http://www.olgezaharov.narod.ru/BMRZ-D.pdf>.
59. **Коэффициент чувствительности** // Материал размещен в «Лексиконе релейщика» (см. <http://maximarsenev.narod.ru/links.html>) на странице: http://maximarsenev.narod.ru/slovar2/k_ch.htm.
60. **Коды ANSI для релейной защиты** // <https://docs.google.com/leaf?id=0B7WejzPe4ruvOTY0MGExOGQtZmM2My00NjQ0LWE0NzEtZjcxNDU1NzM2ZDE3&sort=name&layout=list&num=50>.
61. **Онлайн-расчеты уставок релейной защиты** // <http://www.online-electric.ru/rza>.
62. **Резервирование при отказе выключателя** // <http://maximarsenev.narod.ru/SUROV.pdf>.
63. **Резервирование при отказе выключателя** // <http://maximarsenev.narod.ru/slovar2/surov2.htm>.
64. **Рекомендации по выбору алгоритмов защит электродвигателей, предусмотренных в блоках БМРЗ и БМРЗ-100** // <http://bmrz-zakharov.narod.ru/Zash.htm>.
65. **Уставки УРОВ по времени** // <http://maximarsenev.narod.ru/Razn/UROV.htm>.
66. **Устройства защиты электродвигателей МРЗС-05Д** // <http://www.rza.org.ua/urza/a-215.html>.
67. **Фазное или линейное** // http://miforelist.narod.ru/lin_faz.htm.
68. **Флегинский Н. М. Расчет уставок релейной защиты линий 6-10 кВ с микропроцессорными защитами с зависимыми характеристиками** // <http://www.rza.org.ua/article/a-92.html>.
69. **Флегинский Н. М. Расчеты токов короткого замыкания с учетом изменения коэффициента трансформации трансформаторов** // <http://www.rza.org.ua/article/a-96.html>.
70. **Чувствительность (релейной защиты)** // Материал размещен в «Лексиконе релейщика» (см. <http://maximarsenev.narod.ru/links.html>) на странице: <http://maximarsenev.narod.ru/slovar2/chuvst.htm>.
71. **Чередование фаз** // <http://maximarsenev.narod.ru/slovar2/Alternation.htm>.

72. Чаронов В. Я., Борисов Л. Ф., Васинеж В. И., Рукавишников А. Устройство для защиты синхронного двигателя от асинхронного режима // Патент на изобретение // http://ntpo.com/patents_electronics/electronics_6/electronics_439.shtml.

Документация

73. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ДА-01-02-12 / Руководство по эксплуатации. ДИВГ.648228.015–001 РЭ. СПб.: НТЦ «Механотроника», 2008.
74. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ДС-00-01-11 / Руководство по эксплуатации. ДИВГ.648228.023 РЭ. СПб.: НТЦ «Механотроника», 2008.
75. Микропроцессорные устройства защиты электродвигателя «Сириус-Д», «Сириус-21-Д» / Руководство по эксплуатации. БПВА.656122.046 РЭ. Зеленоград: «Радиус-Автоматика», 2008.
76. Реле защиты двигателя РДЦ-01-054 / Руководство по эксплуатации ААПЦ.648239.026 РЭ.
78. Реле защиты двигателя РДЦ-06 / Руководство по эксплуатации ААПЦ.648239.013 РЭ. Киев: ПАО «Электротехнический завод», 2010.

Содержание

Часть 1 (Выпуск 12 (168))

Предисловие	3
ГЛАВА ПЕРВАЯ. Цифровые устройства защиты электродвигателей	4
1.1. Сравнительные характеристики цифровых устройств	4
1.2. Испытание блоков БМРЗ на физической модели	22
ГЛАВА ВТОРАЯ. Алгоритм токовой отсечки	27
ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Алгоритмы дифференциальных защит ДЗТ и ДТО	35
ПРИЛОЖЕНИЕ. Исходные данные для расчета уставок	69
Список литературы.	75

Часть 2 (Выпуск 1 (169))

Предисловие	
ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. Алгоритмы защиты от замыканий на землю	
ГЛАВА ПЯТАЯ. Алгоритмы защиты электродвигателей от перегрузки	
ГЛАВА ШЕСТАЯ. Алгоритмы защиты синхронного двигателя от асинхронного режима	
ГЛАВА СЕДЬМАЯ. Алгоритм «Функция опережающего отключения»	
ГЛАВА ВОСЬМАЯ. Алгоритмы защиты от затянутого пуска, блоки- ровки ротора и колебаний нагрузки	
ГЛАВА ДЕВЯТАЯ. Алгоритмы «Защита минимального напряжения», «Защита от несимметричного режима работы» и «Защита от обрыва фазы», «Защита от потери питания»	
ПРИЛОЖЕНИЕ. Исходные данные для расчета уставок	
Список литературы	

Библиотечка электротехника

Приложение к производственно-массовому журналу «Энергетик»

ЗАХАРОВ ОЛЕГ ГЕОРГИЕВИЧ

**Цифровые устройства релейной защиты электродвигателей.
Алгоритмы и уставки
(Часть 1)**

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

115280, Москва, ул. Автозаводская, 14
Тел. (495) 675-19-06, тел./факс 234-74-21

Редакторы: Л. Л. Жданова, Н. В. Ольшанская
Худож.-техн. редактор Т. Ю. Андреева

Сдано в набор 5.11.12. Подписано в печать 20.12.12.

Формат 60×84¹/₁₆. Печать офсетная.

Печ. л. 5,125. Заказ БЭТ/12(168)-2012.

Макет выполнен издательством «Фолиум»: 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Отпечатано типографией издательства «Фолиум»: 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Журнал «Энергетика за рубежом»

Приложение к журналу «Энергетик»

Подписывайтесь на специальное приложение к журналу «Энергетик» — **«Энергетика за рубежом»**. Это приложение выходит **один раз в два месяца**.

Журнал «Энергетика за рубежом» знакомит читателей с важнейшими проблемами современной зарубежной электроэнергетики:

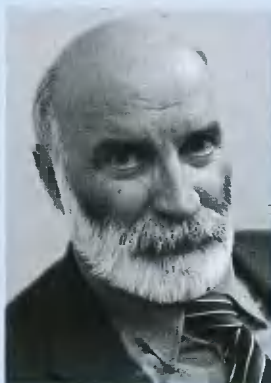
- развитие и надежность энергосистем и энергообъединений;
- особенности и новшества экономических и рыночных отношений в электроэнергетике;
- опыт внедрения прогрессивных технологий в энергетическое производство;
- модернизация и реконструкция (перемаркировка) оборудования электростанций, электрических и тепловых сетей;
- распространение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;
- энергосбережение, рациональное расходование топлива и экологические аспекты энергетики.

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **«ПРЕССА РОССИИ»**. Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.

Подписной индекс журнала «Энергетика за рубежом» — приложения к журналу «Энергетик»

87261

Об авторе



Олег Георгиевич Захаров —

специалист в области электротехники, электромонтажных работ, настройки промышленного и судового электрооборудования.

Автор и соавтор более 120 печатных работ, в том числе учебников и учебных пособий, словарей и изобретений. С работами автора можно ознакомиться на сайте www.olgezaharov.narod.ru. В настоящее время — заместитель начальника управления ООО «НТЦ «Механотроника».

Цифровые устройства РЗА обеспечивают непрерывный контроль и эффективную защиту электродвигателей во всех режимах работы