

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
дополнительного профессионального образования
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ
(ФГАОУ ДПО «ПЭИПК»)**

**КАФЕДРА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ, СЕТЕЙ И СИСТЕМ**

С.А.Гондуров, С.В. Михалев, М.Г. Пирогов, А.Л. Соловьев.

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 кВ ТЕРМИНАЛАМИ БМРЗ

Методика расчёта

**Санкт–Петербург
2013**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
дополнительного профессионального образования
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ
(ФГАОУ ДПО «ПЭИПК»)**

**КАФЕДРА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ, СЕТЕЙ И СИСТЕМ**

С.А.Гондуров, С.В. Михалев, М.Г. Пирогов, А.Л. Соловьев.

**РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
НАПРЯЖЕНИЕМ 6 –10 кВ
ТЕРМИНАЛАМИ БМРЗ**

Методика расчёта

**Санкт–Петербург
2013**

УДК 621.313.333(075.9)
ББК 31.261.2
Р36

Одобрено и рекомендовано к опубликованию Ученым советом института. Протокол №16 от 20 февраля 2013 г.

Научный редактор А.В. Беляев, к.т.н., доцент кафедры РЗА ПЭИПК

Релейная защита электродвигателей напряжением 6 –10 кВ терминалами БМРЗ: методика расчета/ С.А.Гондуров, С.В. Михалев, М.Г. Пирогов, А.Л. Соловьев. – СПб.: ПЭИПК, 2013, 60 с.

В книге приведены методики для выбора параметров срабатывания (уставок) микропроцессорных защит электрических двигателей терминалами БМРЗ, даны основные указания по расчету и выбору уставок релейной защиты электродвигателей высокого напряжения, примеры расчетов защит электродвигателей.

Издание предназначено для специалистов и проектных организаций, работающих в области релейной защиты и системной автоматики электрических двигателей. Данная работа будет полезна студентам высших и средних специальных учебных заведений электроэнергетического профиля, занимающихся изучением и проектированием устройств релейной защиты.

УДК 621.313.333(075.9)
ББК 31.261.2

© ПЭИПК, 2013

Введение

Электрические двигатели являются преобразователями электрической энергии в механическую и составляют основу электропривода. Электротехническая промышленность выпускает широкую номенклатуру асинхронных и синхронных электрических машин. Современные производственные процессы невозможно представить без крупных электродвигателей. На долю электродвигателей напряжением выше 1 кВ сегодня приходится более 20% вырабатываемой в мире электроэнергии. На многих производствах, где нет частых пусков, больше начинают применять крупные синхронные электродвигатели. В ОАО «Газпром» уже эксплуатируются синхронные электродвигатели с единичной мощностью 25 МВт. Синхронные двигатели по сравнению с асинхронными могут работать без потребления реактивной мощности, а при работе с перевозбуждением отдают реактивную мощность в энергосистему. При проектировании сложных объектов с крупной двигательной нагрузкой применяют одновременно синхронные и асинхронные электродвигатели. Синхронные электродвигатели вырабатывают реактивную мощность, а асинхронные её потребляют. Для приводов воздуходувов доменного производства применяют СД мощностью 31,5 МВт, и сегодня есть тенденция к увеличению единичной мощности синхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ. Увеличение единичных мощностей энергоблоков современных тепловых электростанций привело к росту мощностей всех электродвигателей системы собственных нужд. На мощных электрических станциях уже эксплуатируются крупные асинхронные электродвигатели мощностью до 8 МВт. Электродвигатели – это сложные и дорогостоящие устройства, от грамотной эксплуатации которых зависит ресурс их работы. Возникновение аварийных ситуаций приводит к выходу оборудования из строя и большим ущербам. Задача релейной защиты – быстрое обнаружение и отключение повреждений, минимизация ущерба, а при работе электродвигателя в ненормальных режимах работы – предотвращение аварий и увеличение срока службы электродвигателей. Для этого необходимо выбрать оптимальные характеристики и параметры срабатывания (уставки) защит. Выбрать оптимальную настройку защиты можно, только имея полную информацию о защищаемом двигателе: его ответственности в технологическом процессе, характере нагрузки, возможности обеспечения самозапуска, условиях эксплуатации.

Цель этой работы – помощь релейщикам в выборе оптимального варианта построения защит асинхронных и синхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ. Работа будет полезна как специалистам служб релейной защиты, занимающихся проектированием объектов с крупными электрическими двигателями, так и специалистам служб эксплуатации электродвигателей напряжением выше 1 кВ.

В работе приведены методические указания по расчету уставок защит синхронных и асинхронных электродвигателей. Методические указания составлены в соответствии с требованиями ПУЭ, учётом особенностей построения и функционирования цифровых устройств релейной защиты БМРЗ и опыта эксплуатации этих устройств. НТЦ «Механотроника» в 1997 году впервые в России выпустил цифровой терминал – блок микропроцессорной релейной защиты БМРЗ. Сегодня это динамично развивающееся предприятие, производящее релейную защиту и автоматику для нефтяников и газовиков, электрических станций и подстанций с оборудованием на напряжение 0,4–220 кВ, в том числе и цифровые защиты электродвигателей напряжением выше 1 кВ. При разработке методических указаний учитывалась и практика, существующая в отечественной электроэнергетике и релестроении.

Приведены примеры расчета уставок асинхронных и синхронных двигателей, синхронных двигателей с прямым пуском, с реакторным пуском, двухскоростных двигателей, блока «трансформатор–электродвигатель».

Авторы выражают благодарность научному редактору А.В. Беляеву и А.М. Александрову – доцентам кафедры РЗА ПЭИПК за ценные замечания и рекомендации.

1. Обозначения и сокращения

В работе приняты следующие обозначения и сокращения:

АВР – автоматический ввод резерва
АД – асинхронный двигатель
АПВ – автоматическое повторное включение
ДЗТ – дифференциальная защита с торможением
ДТО – дифференциальная токовая отсечка
ЗАР – защита от асинхронного режима
ЗКН – защита от колебаний нагрузки
ЗМН – защита минимального напряжения
ЗНР – защита от неполнофазного режима
ЗПП – защита от потери питания
КЗ – короткое замыкание
КПД – коэффициент полезного действия
ЛЗШ – логическая защита шин
МинТЗ – минимальная токовая защита
МУ – методические указания
ОЗЗ – однофазное замыкание на землю
ОКЗ – отношение короткого замыкания
ПУЭ – Правила устройства электроустановок
РЭ – руководство по эксплуатации
СД – синхронный двигатель
СНОЗЗ – селектор направления ОЗЗ
ТН – трансформатор напряжения
ТО – токовая отсечка
ТТ – трансформатор тока
ТТНП – трансформатор тока нулевой последовательности
УПП – устройство плавного пуска
УРОВ – устройство резервирования при отказе выключателя
ФОО – функция опережающего отключения
ЦОС – цифровая обработка сигналов
ЭДС – электродвижущая сила

2. Расчет защит от междофазных коротких замыканий в электродвигателе

2.1. Общие положения

Для защиты электродвигателей от междофазных замыканий применяется [1]:

- токовая отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах, для электродвигателей мощностью 2 МВт и более, имеющих действующую на отключение защиту от однофазных замыканий на землю, а также для электродвигателей мощностью менее 2 МВт не удовлетворяет требованиям чувствительности или когда двухрелейная отсечка оказывается целесообразной по исполнению комплектной защиты. При отсутствии защиты от однофазных замыканий на землю токовая отсечка электродвигателей мощностью 2 МВт и более должна выполняться трехрелейной с тремя трансформаторами тока. Допускается защита в двухфазном исполнении с дополнением защиты от двойных замыканий на землю, выполненная с помощью трансформатора тока нулевой последовательности и токового реле;

- продольная дифференциальная токовая защита – для электродвигателей мощностью 5 МВт и более, а также менее 5 МВт, если установка токовых отсечек не обеспечивает выполнения требований чувствительности; продольная дифференциальная защита электродвигателей при наличии защиты от замыканий на землю должна иметь двухфазное исполнение, а при отсутствии на двигателе защиты от замыкания на землю – трехфазное, с тремя трансформаторами тока. Допускается защита в двухфазном исполнении с дополнением защиты от двойных замыканий на землю, выполненной с помощью трансформатора тока нулевой последовательности и токового реле. Для электродвигателей мощностью 5 МВт и более, выполненных без шести выводов обмотки статора, должна предусматриваться токовая отсечка.

Чувствительность защит от междофазных замыканий должна проверяться при КЗ на вводах питания электродвигателя (в коробке подключения машины). Для обеспечения надёжной работы коэффициент чувствительности защит от междофазных замыканий должен быть не менее 2,0 [1].

2.2. Расчет максимальной токовой отсечки (ТО)

Для защиты электродвигателей мощностью до 5 МВт от междофазных замыканий должна применяться токовая отсечка (ТО), работающая без выдержки времени.

При расчете токовой отсечки следует учитывать, что в момент включения асинхронного электродвигателя кроме периодической составляющей пускового тока кратковременно появляется апериодическая составляющая, обусловленная переходным процессом и током намагничивания. Это приводит к увеличению амплитуды пускового тока в 1,3–1,8 раз (см. рис. 2.1). Считается, что процесс пуска машины завершен, когда пусковой ток станет ниже значения $1,25 I_{\text{ном. дв.}}$.

В случае расчета уставок для синхронного двигателя следует учитывать, что пуск машины происходит в асинхронном режиме. Когда частота вращения двигателя достигает значения, близкого к синхронному, – выполняют переключение обмотки возбуждения с резистора на напряжение возбуждения и двигатель втягивается в синхронизм.

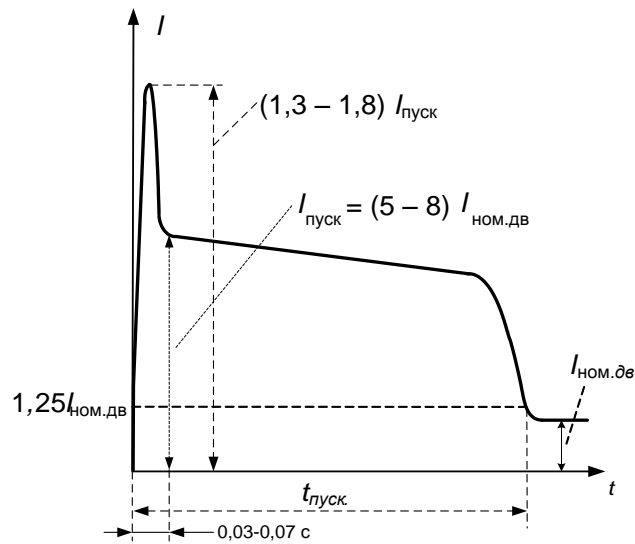


Рис. 2.1. Изменение тока асинхронного электродвигателя при прямом пуске

В каталогах приводят значение кратности периодической составляющей пускового тока электродвигателя $k_{\text{дв.пуск.кат}}$ по отношению к его номинальному току при питании двигателя от сети бесконечной мощности. При расчете значения пускового тока электродвигателя следует учитывать внутреннее сопротивление питающей сети. В простейшем случае это можно сделать следующим образом.

Если известно значение тока трехфазного КЗ на шинах питания двигателя $I_{\text{к.макс}}^{(3)}$, вычисленное при максимальном режиме работы сети с учетом режима подпитки от других электродвигателей, тогда сопротивление питающей системы будет

$$x_{\text{с.макс}} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ш.макс}}^{(3)}}, \quad (2.1)$$

где $U_{\text{ср}}$ — среднее напряжение шин, от которых питается двигатель. Обозначение «с.макс» здесь относится к режиму работы, а не к численному значению.

Пусковое сопротивление электродвигателя

$$x_{\text{пуск,дв}} = \frac{U_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{пуск,дв.кат}}}, \quad (2.2)$$

где $I_{\text{пуск,дв.кат}}$ — каталожное значение пускового тока двигателя (периодическая составляющая).

$$I_{\text{пуск,дв.кат}} = k_{\text{пуск,дв.кат}} \cdot I_{\text{ном.дв}}. \quad (2.3)$$

В дальнейших расчетах можно использовать полученное каталожное значение пускового тока. Если при этом защита не удовлетворяет требованиям к чувствительности, это значение можно уточнить, приняв во внимание сопротивление сети, приведенное к шинам питания двигателя.

Пусковой ток двигателя с учетом сопротивления питающей системы

$$I_{\text{пуск,дв}} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \cdot (x_{\text{пуск,дв}} + x_{\text{с.макс}})}. \quad (2.4)$$

При реакторном пуске пусковой ток с учетом сопротивления питающей системы определяется по выражению

$$I_{\text{пуск,дв}} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \cdot (x_{\text{пуск,дв}} + x_{\text{р}} + x_{\text{с.макс}})}, \quad (2.5)$$

где x_p – сопротивление реактора в цепи электродвигателя.

Несрабатывание отсечки при пуске электродвигателя обеспечивается выбором тока срабатывания по выражению

$$I_{ТО} \geq 2,5 I_{\text{пуск.дв.}} \quad (2.6)$$

В связи с тем, что чувствительность такой защиты получается низкой, рекомендуется дополнительно вводить вторую ступень МТЗ с независимой характеристикой и током срабатывания

$$I_{\text{МТЗ}} \geq 1,5 I_{\text{пуск.дв.}} \quad (2.7)$$

Выдержка времени второй ступени МТЗ для отстройки от броска пускового тока двигателя выбирается равной

$$t_{\text{МТЗ}} = 0,1 \text{с} \geq t_{\text{бр.пуск.ток}} \quad (2.8)$$

Применение второй ступени МТЗ позволяет существенно повысить чувствительность защиты, однако расчет коэффициента чувствительности в соответствии с требованиями ПУЭ [1] должен осуществляться по параметрам срабатывания ТО.

Определяем значение тока двухфазного КЗ на выводах электродвигателя и коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ в минимальном режиме работы системы (когда ток двухфазного КЗ будет иметь наименьшее значение) по формулам:

$$I_{\text{к}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{к.мин}}^{(3)} \quad (2.9)$$

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{с.о}}} \geq 2, \quad (2.10)$$

где $I_{\text{к}}^{(3)}$ – значение тока трехфазного короткого замыкания на вводах электродвигателя в минимальном режиме питающей сети.

Далее следует оценить погрешность работы трансформаторов тока. Эта проверка выполняется с использованием кривых предельной кратности для установленных ТТ, либо с использованием реальных характеристик намагничивания этих ТТ по методике [2,6].

Расчет уставок ТО для многоскоростных двигателей осуществляется аналогично односкоростным для каждой частоты вращения двигателя отдельно.

2.3. Дифференциальная защита электродвигателя

Для электродвигателей мощностью 5 МВт и более применяется продольная дифференциальная защита.

Основным элементом защиты электродвигателя является дифференциальная защита с торможением (ДЗТ), вспомогательным элементом является дифференциальная токовая отсечка (ДТО), которая должна всегда применяться с ДЗТ.

Защита работает без выдержки времени.

Характеристика дифференциальной защиты электродвигателя с торможением приведена на рис. 2.2, схема подключения трансформаторов тока – на рис. 2.3.

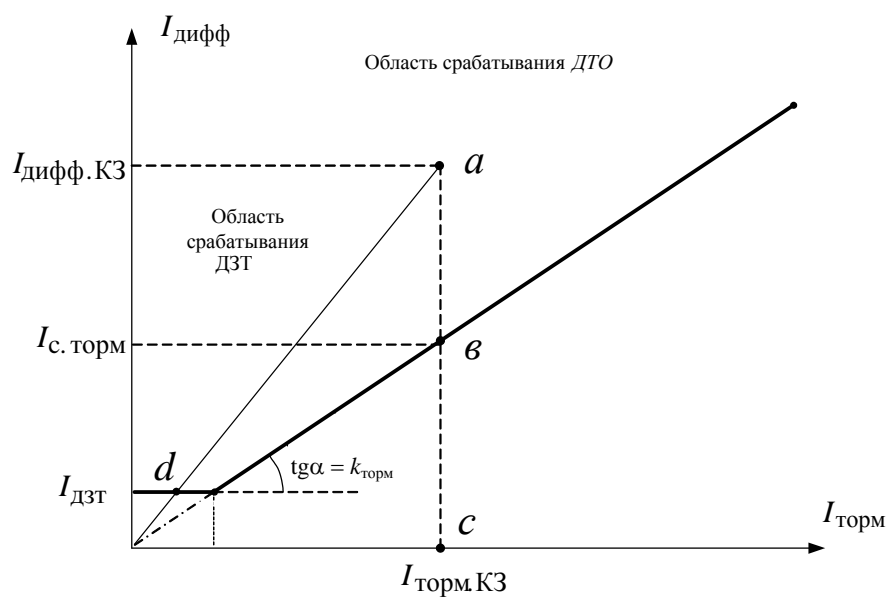


Рис. 2.2. Характеристика дифференциальной защиты электродвигателя

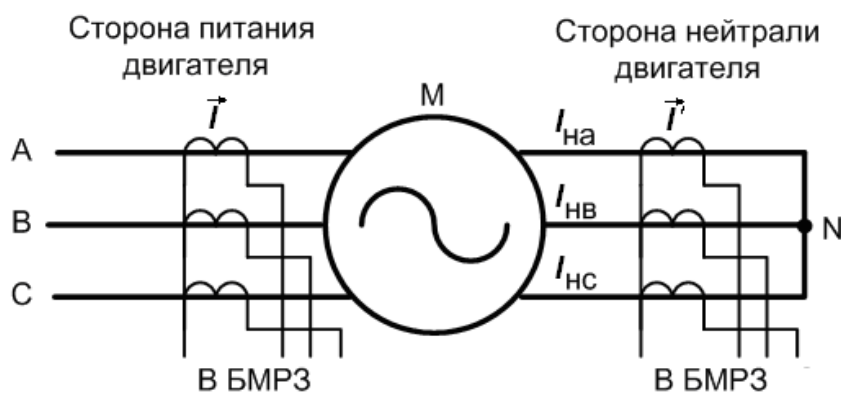


Рис. 2.3. Схема подключения дифзащиты

Дифференциальный $\vec{I}_{\text{дифф}}$ и тормозной $\vec{I}_{\text{торм}}$ токи вычисляются в терминале по выражениям:

$$\vec{I}_{\text{дифф}} = |\vec{I} - \vec{I}'|, \quad (2.11)$$

$$\vec{I}_{\text{торм}} = \frac{|\vec{I} + \vec{I}'|}{2}. \quad (2.12)$$

В терминале предусмотрены дифференциальная защита с торможением и дифференциальная отсечка (без торможения). Уставки защиты в терминале выставляются во вторичных токах.

Расчет дифференциальной защиты с торможением. Отстройка от токов небаланса выполняется с помощью тормозной характеристики. Поэтому расчет сводится к определению уставки по току, наклону тормозной характеристики, проверке чувствительности защиты и пригодности применяемых трансформаторов тока.

Существует два варианта выполнения дифференциальной защиты электродвигателей:

– *дифференциальная защита с током срабатывания меньше номинального тока защищаемого электродвигателя.* Такой способ выполнения защиты применяется для минимизации объема повреждений в электродвигателях при внутренних междуфазных коротких замыканиях в статорной обмотке машины и допускает неправильное действие защиты при обрыве и неисправности токовых цепей или при неисправности одного из трансформаторов тока дифференциальной защиты электродвигателя;

– *дифференциальная защита с током срабатывания больше номинального тока защищаемого электродвигателя.* Такой способ выполнения защиты обеспечивает правильную работу защиты при обрыве и неисправности токовых цепей или при неисправности одного из трансформаторов тока дифференциальной защиты электродвигателя;

Таким образом, ток срабатывания дифференциальной защиты для электродвигателей неподверженных технологическим перегрузкам может быть выбран из диапазона:

$$I_{\text{ДЗТ}} = (0,3 \div 1,2) I_{\text{ном.дв.}} \quad (2.13)$$

Для особо ответственных электродвигателей, работающих с возможным режимом больших технологических перегрузок на объектах без дежурного персонала:

$$I_{\text{ДЗТ}} = (1,6 \div 1,8) I_{\text{ном.дв.}}$$

Номинальный ток двигателя $I_{\text{ном. дв.}}$, А, определяем по формуле

$$I_{\text{ном.дв}} = \frac{P_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.дв}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi}, \quad (2.14)$$

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.

При выборе уставки $I_{\text{с.ДЗТ}}$ больше номинального тока двигателя для сигнализации повреждения измерительных цепей следует применять сигнализацию небаланса с уставкой $K_{\text{НБ}} = 0,4 \div 0,6$. Срабатывание сигнализации небаланса происходит при превышении дифференциальным током уставки $K_{\text{НБ}} \cdot I_{\text{с.ДЗТ}}$. Для уменьшения тока небаланса защиты рекомендуется применять ТТ со стороны

питания и со стороны нейтрали одинакового типа.

Выбираем наклон тормозной характеристики. Учитывая, что наклон тормозной характеристики равен относительному току срабатывания дифференциальной защиты при данном тормозном токе, имеем

$$\frac{I_{\text{дифф}}}{I_{\text{торм}}} = \frac{k_n \cdot (k_{\text{пер}} \cdot k_{\text{одн}} \cdot \varepsilon + 2 \cdot f + \delta) \cdot I_{\text{торм}}}{I_{\text{торм}}} = k_n \cdot (k_{\text{пер}} \cdot k_{\text{одн}} \cdot \varepsilon + 2 \cdot f + \delta), \quad (2.15)$$

где k_n – коэффициент надежности, принимается равным 1,1 – 1,2; $k_{\text{пер}}$ – коэффициент, учитывающий переходный режим ТТ; $k_{\text{одн}}$ – коэффициент однотипности ТТ, образующих дифференциальную схему, принимается равным 0,5, если ТТ имеют одинаковую конструкцию и коэффициенты трансформации и примерно одинаковые условия работы и вторичную нагрузку, и равным 1 в остальных случаях (для дифзащиты двигателей, как правило, $k_{\text{одн}} = 1$ вследствие разности длин проводников вторичных токовых цепей); ε – погрешность ТТ при наибольшем токе внешнего КЗ, принимается равной 0,1; f – аппаратная погрешность терминала, принимается для каждого токового входа равной 0,025; δ – технологический запас, обусловленный наличием дополнительной погрешности измерения тока терминалом, принимается равным 0,025.

Значение $k_{\text{пер}}$ принимают равным 2,5 – 3,5 (в большинстве случаев рекомендуется принимать 2,5). Этот переходный процесс обусловлен тем, что после отключения внешних КЗ начинается процесс самозапуска ответственных двигателей. В токе самозапуска содержится большая апериодическая составляющая с токами низкой частоты или при подключении двигателя к напряжению сети с еще не успевшей затухнуть ЭДС двигателя – эти напряжения могут находиться в противофазе. При этом ТТ могут насыщаться и их погрешность возрастает.

Значение k_n рекомендуется принимать равным 1,2, чтобы учесть возможное отличие характеристик ТТ от расчетных в худшую сторону.

Округляем полученное значение коэффициента торможения защиты в большую сторону (до дискретности ввода уставок в терминал).

Далее выполняем проверку чувствительности защиты. Находим ток двухфазного КЗ от энергосистемы в коробке подключения электродвигателя при минимальной мощности энергосистемы $I_k^{(2)} = 0,867 I_k^{(3)}$ (ток подпитки от электродвигателей не учитываем). Коэффициент чувствительности защиты выполняется по выражению

$$k_q^{(2)} = \frac{I_k^{(2)}}{I_{\text{ДЗТ}}}. \quad (2.16)$$

Проверка точности работы ТТ выполняется с использованием кривых предельной кратности для установленных ТТ либо с использованием реальных характеристик намагничивания этих ТТ по методикам [2, 6].

При защите двигателя терминалом БМРЗ–УЗД имеется возможность применения ДЗТ с очувствлением (авторы алгоритма М.Г. Пирогов, С.В. Михалев [16]). Для работы этой функции необходим ввод двух уставок – $I_{\text{ДЗТ ГРУБ}}$ и $I_{\text{ДЗТ ЧУВСТ}}$. Если функция очувствления не используется, в качестве уставки $I_{\text{ДЗТ}}$ принимается $I_{\text{ДЗТ ГРУБ}}$.

При использовании функции очувствления ДЗТ, уставка $I_{\text{ДЗТ ГРУБ}}$ выбирается больше номинального тока двигателя, а уставка $I_{\text{ДЗТ ЧУВСТ}}$ меньше номинального тока двигателя. Защита постоянно работает по грубым уставкам, перевод на работу по чувствительным уставкам осуществляется при превышении аварийной составляющей любого из фазных токов стороны питания уставки $3,5 \cdot I_{\text{ДЗТ ГРУБ}}$. Характеристика

работы ДЗТ с очувствлением приведена на рис. 2.4.



Рис. 2. 4. Характеристика работы ДЗТ электродвигателя с очувствлением

Использование ДЗТ с очувствлением позволяет:

- а) предотвратить отключение электродвигателя при обрывах или различных видах замыканий в измерительных цепях (одного, двух или нескольких проводов);
- б) предотвратить отключение электродвигателя при повреждении одного или нескольких измерительных трансформаторов тока;
- в) обеспечить высокую чувствительность защиты.

Расчет дифференциальной токовой отсечки. Поскольку при работе дифференциальной токовой отсечки (ДТО) торможение не применяется, то уставку срабатывания ДТО принимается из условия несрабатывания при максимальном токе небаланса.

Для асинхронного электродвигателя максимальный ток небаланса возникает при пуске двигателя, для синхронного – при внешнем «металлическом» КЗ.

Для асинхронного электродвигателя ток небаланса дифзащиты рассчитывается из условия насыщения ТТ одного плеча дифзащиты при нормальной работе другого плеча:

$$I_{нб.макс} = k_{пуск} \cdot k_{нб} \cdot I_{ном.дв}, \quad (2.17)$$

где $k_{нб}$ – коэффициент, учитывающий неполное насыщение одного из ТТ, принимается равным 0,7.

Ток срабатывания дифференциальной отсечки:

$$I_{ДТО} = k_n \cdot I_{нб.макс}, \quad (2.18)$$

где k_n – коэффициент надежности, принимается равным 1,2, учитывая, что влияние апериодической составляющей переходного процесса ослабляется с помощью программного обеспечения терминала.

Для синхронного электродвигателя максимальный ток подпитки при внешнем КЗ (симметричная составляющая):

$$I_{подп} = 1,1 \cdot I_{пуск}. \quad (2.19)$$

Определяем ток небаланса дифзащиты СД при этом значении тока:

$$I_{нб.макс} = 1,1 \cdot k_{нб} \cdot k_{пуск} \cdot I_{ном.дв}. \quad (2.20)$$

Ток срабатывания дифференциальной отсечки для этого случая также

находится по выражению (2.18).

Проверяем чувствительность защиты. Находим ток двухфазного КЗ от энергосистемы в коробке подключения электродвигателя при минимальной мощности энергосистемы $I_{\text{к}}^{(2)} = 0,867 I_{\text{к}}^{(3)}$. Коэффициент чувствительности находится по выражению

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{ДТО}}} \geq 2. \quad (2.21)$$

Оценка погрешности работы ТТ выполняется любым из известных методов, например, с использованием кривых предельной кратности для установленных ТТ либо с использованием реальных характеристик намагничивания этих ТТ по методике [6].

Защиты ДЗТ и ДТО работают без выдержки времени.

Расчет уставок дифференциальной токовой отсечки для многоскоростных двигателей осуществляется аналогично односкоростным для каждой частоты вращения двигателя отдельно.

2.4. Примеры расчетов защит двигателя от междофазных КЗ

Пример 2.1. Выполняем защиту от междофазных замыканий асинхронного электродвигателя серии А4:

Исходные данные для расчета:

Пуск двигателя прямой от напряжения питающей сети.

Двигатель участвует в самозапуске.

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{\text{ном.дв}}$ 1000 кВт

коэффициент мощности, $\cos \varphi$ 0,89

номинальное напряжение, $U_{\text{ном.дв}}$ 6 кВ

КПД, η 0,955

кратность пускового тока, $k_{\text{пуск}}$ 5,7

значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД

в минимальном режиме работы системы, $I_{\text{ш.мин}}^{(3)}$ 3,5 кА

значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД

в максимальном режиме работы системы, $I_{\text{ш.макс}}^{(3)}$ 3,8 кА

среднее напряжение на секции шин питания двигателя $U_{\text{ср}}$ 6,05 кВ

максимальное сопротивление токовых цепей со стороны:

– питания электродвигателя (по проекту), не более 0,5 Ом

– нейтрали электродвигателя (по проекту), не более 1,0 Ом

Для защиты двигателя используется БМРЗ–УЗД. Диапазон регулирования уставок токовой отсечки и ДТО от 1,00 до 65,00 А (вторичных). Диапазон регулирования уставок ДЗТ от 0,10 до 10,00 А, коэффициента торможения – от 0,20 до 0,70.

Установлены ТТ типа ТЛМ10–5–82 с сердечником P и коэффициентом трансформации $k_{\text{ТТ}} = 150/5$.

Определяем значение номинального тока электродвигателя по формуле (2.14):

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

Определяем каталожное значение пускового тока электродвигателя по формуле

(2.3):

$$I_{\text{пуск.дв.кат}} = 5,7 \cdot 113,2 = 645 \text{ А.}$$

Выбираем ток срабатывания ТО по формуле (2.6):

$$I_{\text{ТО}} = 2,5 \cdot 645 = 1612 \text{ А,}$$

или $\frac{1612}{30} \approx 53,8 \text{ А}$ во вторичных значениях – полученное значение находится в пределах диапазона задания уставки.

Определяем значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя $I_{\text{к}}^{(2)}$ и коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_{\text{ч}}^{(2)}$ по формулам (2.9) и (2.10):

$$I_{\text{к}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{ш.мин}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 3500 \approx 3000 \text{ А,}$$

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{с.о}}} = \frac{3000}{1612} \approx 1,86.$$

Коэффициент чувствительности ТО получился меньше двух, проведем уточнение пускового тока электродвигателя по формулам (2.1), (2.2), (2.4):

$$x_{\text{с.макс}} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ш.макс}}^{(3)}} = \frac{6\,050 \text{ В}}{\sqrt{3} \cdot 3\,800 \text{ А}} \approx 0,92 \text{ Ом,}$$

$$x_{\text{пуск.дв}} = \frac{U_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{пуск.дв.кат}}} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 645} \approx 5,37 \text{ Ом,}$$

$$I_{\text{пуск.дв}} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \cdot (x_{\text{пуск.дв}} + x_{\text{с.макс}})} = \frac{6050}{\sqrt{3} \cdot (5,37 + 0,92)} \approx 555,3 \text{ А.}$$

Выбираем ток срабатывания ТО по формуле (2.6):

$$I_{\text{ТО}} \geq 2,5 \cdot 555,3 = 1388 \text{ А,}$$

Определяем значение коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_{\text{ч}}^{(2)}$ по формуле (2.10):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{с.о}}} = \frac{3000}{1388} \approx 2,16.$$

Коэффициент чувствительности ТО получился больше двух, поэтому применять дифференциальную защиту не требуется.

Выполняем оценку максимальной погрешности работы ТТ. Трансформатор тока ТЛМ10–5–82 имеет погрешность не более 10% при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 150 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом) до 17 (до 2250 А) [4]. Расчетный ток для проверки точности работы ТТ составляет $1,1 \cdot 1388 = 1420 \text{ А}$, что меньше допустимого 2250 А. Трансформаторы тока обеспечивают необходимую точность, и они пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки.

Окончательно принимаем $I_{\text{ТО}} = 1\,388 \text{ А}$ или $\frac{1388}{30} \approx 46,27 \text{ А}$ во вторичных значениях.

В связи с тем, что коэффициент чувствительности ТО получился небольшим, применяем дополнительно МТЗ с уставками, рассчитанными по (2.7) и (2.8):

$$I_{\text{МТЗ}} = 1,5 \cdot I_{\text{пуск.дв}} = 1,5 \cdot 555,3 = 833 \text{ А,}$$

$$t_{\text{МТЗ}} = 0,1 \text{ с.}$$

В учебных целях выполним расчет дифзащиты для данного примера.

Принимаем, что со стороны нейтрали двигателя установлены такие же ТТ, как со стороны питания.

Выбираем ток срабатывания ДЗТ по выражению (2.13):

$$I_{\text{ДЗТ}} = 1,2 \cdot I_{\text{ном.дв}} \approx 140 \text{ А,}$$

или $\frac{140}{30} = 4,67 \text{ А}$ вторичных – в пределах диапазона задания уставки.

Определяем коэффициент торможения по (2.15):

$$\frac{I_{\text{дифф}}}{I_{\text{торм}}} \geq k_{\text{н}} \cdot (k_{\text{пер}} \cdot k_{\text{одн}} \cdot \varepsilon + 2 \cdot f + \delta) = 1,2 \cdot (2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,025 + 0,025) = 0,39.$$

Проверяем чувствительность защиты.

Находим ток двухфазного КЗ от энергосистемы в коробке подключения электродвигателя при минимальной мощности энергосистемы $I_{\text{к}}^{(2)} = 0,867 \cdot 3,5 \approx 3 \text{ кА}$.

Коэффициент чувствительности ДЗТ определяется по выражению (2.16):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{3000}{140} = 21.$$

Определяем значение уставки срабатывания дифференциальной токовой отсечки. Ток небаланса дифзащиты, соответствующий пусковому току двигателя, по выражению (2.18) равен

$$I_{\text{нб.макс}} = k_{\text{пуск}} \cdot k_{\text{нб}} \cdot I_{\text{ном.дв}} = 5,7 \cdot 0,7 \cdot 113,2 = 452 \text{ А.}$$

Ток срабатывания дифференциальной отсечки по выражению (2.17):

$$I_{\text{ДТО}} = k_{\text{н}} \cdot I_{\text{нб.макс}} = 1,2 \cdot 452 = 545 \text{ А,}$$

или $\frac{545}{30} = 18,17 \text{ А}$ вторичных – в пределах диапазона задания уставки.

Проверяем чувствительность защиты по выражению (2.21):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{ДТО}}} = \frac{3000}{545} = 5,5$$

Защиты ДЗТ и ДТО работают без выдержки времени.

По результатам расчета строим характеристику работы защиты (рис. 2.5).

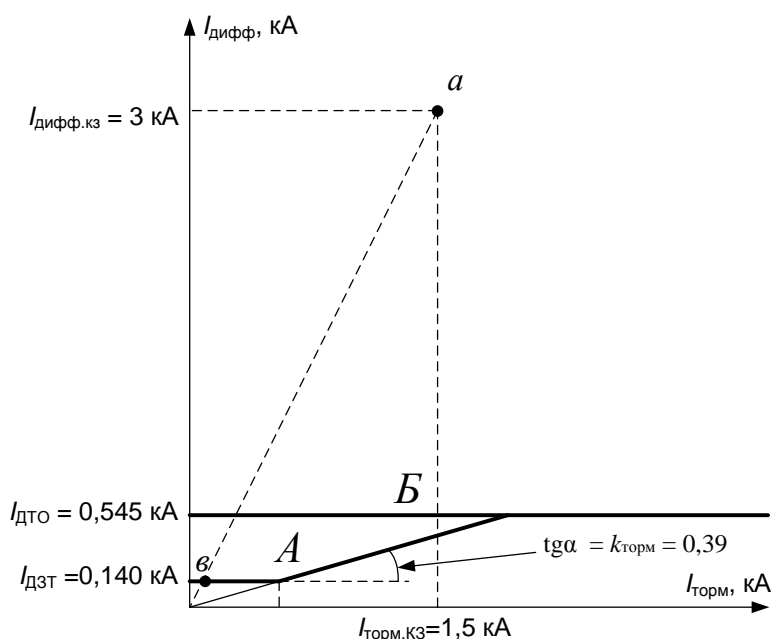


Рис. 2.5. Характеристика работы дифференциальной защиты двигателя серии А4 мощностью 1000 кВт:
А – область срабатывания ДЗТ, Б – область срабатывания ДТО

В терминале БМРЗ–УЗД имеется возможность использовать функцию очувствления ДЗТ для повышения чувствительности защиты с исключением излишнего срабатывания при неисправности токовых цепей [16]:

В качестве уставки $I_{\text{ДЗТ ГРУБ}}$ выбираем значение $I_{\text{ДЗТ}} \approx 140 \text{ А}$.

Значение уставки $I_{\text{ДЗТ ЧУВСТ}}$ выбираем меньше номинального тока двигателя в соответствии с (2.13):

$$I_{\text{ДЗТ ЧУВСТ}} = 0,3 \cdot I_{\text{НОМ.ДВ}} \approx 34 \text{ А}.$$

По результатам расчета, строим характеристику работы защиты, приведенную на рис. 2.6.



Рис. 2.6. Характеристика дифференциальной защиты двигателя серии А4 мощностью 1000 кВт с использованием ДЗТ с очувствлением

Пример 2.2. Требуется выполнить защиту от междуфазных замыканий электродвигателя для асинхронного электродвигателя ДАЗО–2000–6:

Исходные данные для расчета:

Пуск двигателя прямой от напряжения питающей сети.

Двигатель в самозапуске не участвует

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{\text{ном.дв}}$ 2000 кВт

коэффициент мощности, $\cos \varphi$ 0,9

напряжение, $U_{\text{ном.дв}}$ 6 кВ

КПД, η 0,961

кратность пускового тока, $k_{\text{пуск}}$ 7

значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД:

– в минимальном режиме работы системы, $I_{\text{ш.мин}}^{(3)}$ 5 кА

– в максимальном режиме работы системы, $I_{\text{ш.макс}}^{(3)}$ 5,5 кА

среднее напряжение на секции шин питания двигателя $U_{\text{ср}}$ 6,04 кВ

максимальное сопротивление токовых цепей со стороны:

– питания электродвигателя (по проекту), не более 0,5 Ом

– нейтрали электродвигателя (по проекту), не более 1,0 Ом

Для защиты двигателя используется БМРЗ–УЗД. Диапазон регулирования уставок токовой отсечки и ДТО от 1,00 до 65,00 А (вторичных). Диапазон регулирования уставок ДЗТ от 0,10 до 10,00 А, коэффициента торможения – от 0,20 до 0,70.

Установлены ТТ типа ТЛМ10–5–82, сердечник типа Р, коэффициент трансформации $k_{\text{ТТ}} = 300/5$.

Определяем значение номинального тока электродвигателя $I_{\text{ном.дв}}$ по формуле (2.14):

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

Определяем пусковой ток электродвигателя по каталожному значению $k_{\text{пуск}}$ по формуле (2.3):

$$I_{\text{пуск.дв.кат}} = k_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{ном.дв}} \approx 7 \cdot 222,5 \text{ А}.$$

Выбираем ток срабатывания ТО по формуле (2.6):

$$I_{\text{ТО}} \geq 2,5 \cdot 222,5 = 556,25 \text{ А},$$

или $\frac{3895}{60} \approx 64,9 \text{ А}$ во вторичных значениях – полученное значение находится в пределах диапазона задания уставки.

Определяем значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя $I_{\text{КЗ}}^{(2)}$ и коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_{\text{ч}}^{(2)}$ по формулам (2.9), (2.10):

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

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{кз}}^{(2)}}{I_{\text{ТО}}} = \frac{4\,330}{3\,895} \approx 1,11$$

Коэффициент чувствительности ТО получился меньше двух, проведем уточнение пускового тока электродвигателя по формулам (2.1), (2.2), (2.4):

$$x_{\text{с.макс}} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ш.макс}}^{(3)}} = \frac{6\,040 \text{ В}}{\sqrt{3} \cdot 5\,500 \text{ А}} \approx 0,319 \text{ Ом},$$

$$x_{\text{пуск.дв}} = \frac{U_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{пуск.дв.кат}}} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 1558} \approx 2,22 \text{ Ом},$$

$$I_{\text{пуск.дв}} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \cdot (x_{\text{пуск.дв}} + x_{\text{с.макс}})} = \frac{6050}{\sqrt{3} \cdot (2,22 + 0,319)} \approx 1364 \text{ А}.$$

Выбираем ток срабатывания ТО по формуле (2.6):

$$I_{\text{ТО}} \geq 2,5 \cdot 1364 = 3410 \text{ А}.$$

Определяем значение коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_{\text{ч}}^{(2)}$ по формуле (2.10):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{ТО}}} = \frac{4330}{3410} \approx 1,26.$$

Коэффициент чувствительности ТО оказался меньше двух, поэтому для защиты этого двигателя от междуфазных замыканий необходимо применить дифференциальную защиту.

Расчет дифференциальной защиты

Выбираем трансформаторы тока типа ТЛМ10–5–82.

Определяем значение уставки $I_{\text{ДЗТ}}$ по формуле (2.13):

$$I_{\text{ДЗТ}} = 0,3 I_{\text{ном.дв}} = 0,3 \cdot 222,5 = 66,75 \text{ А}.$$

или $\frac{66,75}{60} = 1,11 \text{ А}$ вторичных. Уставка находится в пределах диапазона задания уставок терминала.

Определяем коэффициент торможения по (2.15):

$$\frac{I_{\text{дифф}}}{I_{\text{торм}}} \geq k_{\text{н}} \cdot (k_{\text{пер}} \cdot k_{\text{одн}} \cdot \varepsilon + 2 \cdot f + \delta) = 1,2 \cdot (2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,025 + 0,025) = 0,39.$$

Проверяем чувствительность защиты.

Коэффициент чувствительности ДЗТ определяется по выражению (2.16):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{4330}{66,75} \approx 64.$$

Определяем значение уставки срабатывания дифференциальной токовой отсечки. Ток небаланса дифзащиты соответствующий пусковому току двигателя по выражению (2.17) равен

$$I_{\text{нб.макс}} = k_{\text{пуск}} \cdot k_{\text{нб}} \cdot I_{\text{ном.дв}} = 7 \cdot 0,7 \cdot 222,5 = 1\,090 \text{ А}.$$

Ток срабатывания дифференциальной отсечки определяем по выражению (2.18):

$$I_{\text{ДТО}} = k_{\text{н}} \cdot I_{\text{ном.дв}} = 1,2 \cdot 1\,090 = 1\,308 \text{ А},$$

или $\frac{1308}{60} = 21,80$ А вторичных. Уставка находится в пределах диапазона уставок терминала.

Проверяем чувствительность защиты по выражению (2.21):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{дто}}} = \frac{4330}{1308} = 3,31.$$

Защиты ДЗТ и ДТО работают без выдержки времени.

По результатам расчета строим характеристику работы защиты (рис. 2.7).

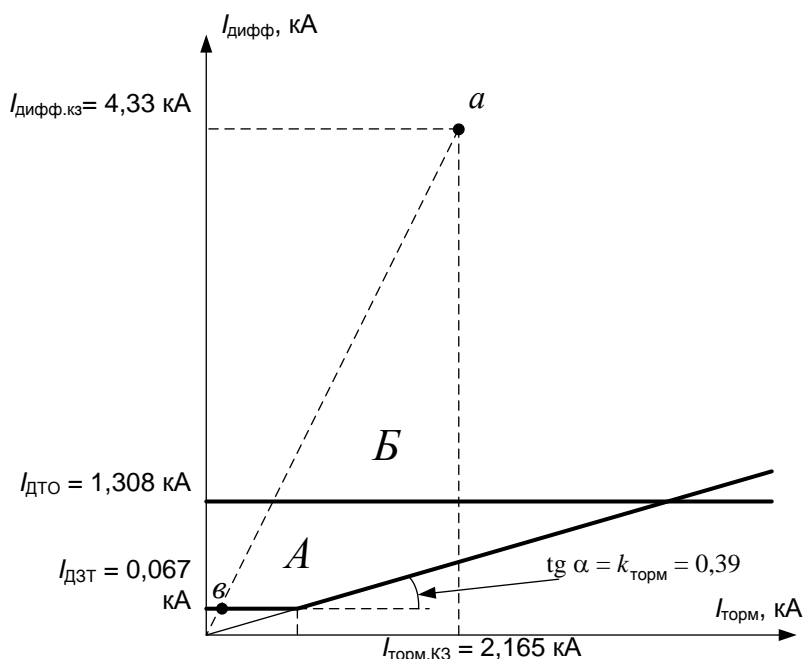


Рис. 2.7. Характеристика работы дифференциальной защиты двигателя серии ДАЗО мощностью 2000 кВт: А – область срабатывания ДЗТ, Б – область срабатывания ДТО

Пример 2.3. Выполняем защиту от межфазных коротких замыканий синхронного электродвигателя СДНЗ:

Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{\text{ном.дв}}$ 6300 кВт

коэффициент мощности, $\cos \varphi$ (см. ГОСТ Р 52776–2007) 0,9

номинальное напряжение, $U_{\text{ном.дв}}$ 10 кВ

КПД, η 0,964

кратность пускового тока, $k_{\text{пуск}}$ 6

значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД:

– в минимальном режиме сети, $I_{\text{ш.мин}}^{(3)}$ 10 кА

максимальное сопротивление токовых цепей со стороны:

– питания электродвигателя (по проекту), не более 0,5 Ом

– нейтрали электродвигателя (по проекту), не более 1,0 Ом

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

Двигатель в процессе самозапуска не участвует.

Для защиты двигателя используется БМРЗ–УЗД. Диапазон регулирования

уставок токовой отсечки и ДТО от 1,00 до 65,00 А (вторичных). Диапазон регулирования уставок ДЗТ от 0,10 до 10,00 А, коэффициента торможения – от 0,20 до 0,70.

Мощность двигателя более 5 МВт и для защиты этого двигателя от междуфазных замыканий требуется применение дифференциальной защиты [1]. Для выполнения дифференциальной защиты применяем однотипные ТТ типа ТЛМ10–5–82 с сердечником типа Р и коэффициентом трансформации $k_{\text{ТТ}} = 500/5$.

Определяем значение номинального тока электродвигателя по формуле (2.14):

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

Определяем значение пускового тока электродвигателя по каталожному значению $k_{\text{пуск}}$ (2.3):

$$I_{\text{пуск.дв.кат}} = k_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{ном.дв}} = 6 \cdot 419 \approx 2514 \text{ А.}$$

Определяем значение уставки $I_{\text{ДЗТ}}$ по формуле (2.13):

$$I_{\text{ДЗТ}} = 1,2 I_{\text{ном.дв}} = 1,2 \cdot 419 \approx 503 \text{ А,}$$

или $\frac{503}{100} = 5,03 \text{ А}$ вторичных. Уставка находится в пределах диапазона уставок терминала.

Определяем коэффициент торможения по формуле (2.15):

$$\frac{I_{\text{дифф}}}{I_{\text{торм}}} \geq k_{\text{н}} \cdot (k_{\text{пер}} \cdot k_{\text{одн}} \cdot \varepsilon + 2 \cdot f + \delta) = 1,2 \cdot (2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,025 + 0,025) = 0,39.$$

Проверяем чувствительность защиты.

Коэффициент чувствительности ДЗТ определяется по выражениям (2.9) (2.16):

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{ш.мин}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10\,000 \text{ А} \approx 8660 \text{ А,}$$

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{8660}{503} \approx 17,2.$$

Определяем значение уставки срабатывания дифференциальной токовой отсечки. Ток небаланса дифференциальной защиты, соответствующий пусковому току двигателя по выражению (2.18) равен

$$I_{\text{нб.макс}} = 1,1 \cdot k_{\text{пуск}} \cdot k_{\text{нб}} \cdot I_{\text{ном.дв}} = 1,1 \cdot 6 \cdot 0,7 \cdot 419 \approx 1936 \text{ А.}$$

Ток срабатывания дифференциальной отсечки находим по выражению (2.18):

$$I_{\text{ДТО}} = k_{\text{н}} \cdot I_{\text{нб.макс}} = 1,2 \cdot 1936 \approx 2323 \text{ А,}$$

или $\frac{2112}{100} = 21,12 \text{ А}$ вторичных. Уставка находится в пределах диапазона уставок терминала.

Проверяем чувствительность защиты по выражению (2.21):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{ДТО}}} = \frac{8660}{2323} = 3,73.$$

Защиты ДЗТ и ДТО работают без выдержки времени.

По результатам расчета строим характеристику работы защиты (рис. 2.8).

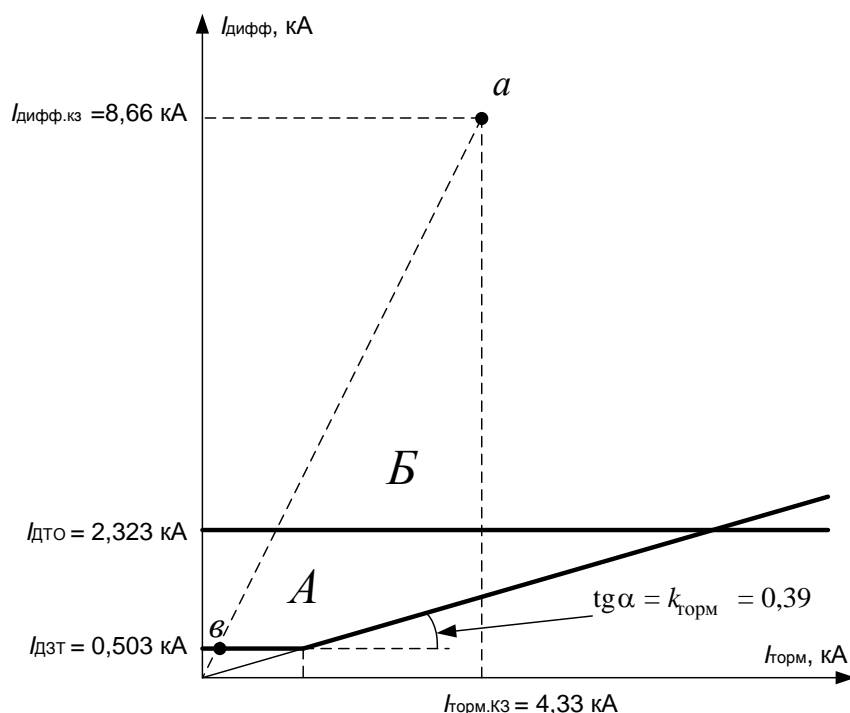


Рис. 2.8. Характеристика работы дифференциальной защиты двигателя серии СДНЗ мощностью 6300 кВт: А – область срабатывания ДЗТ, Б – область срабатывания ДТО

Пример 2.4. Расчет защиты от междуфазных замыканий синхронного электродвигателя СТД–3200–2 с токоограничивающим бетонным реактором типа БР–10–1000–0,35.

Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{\text{ном.дв}}$	3200 кВт
коэффициент мощности, $\cos \varphi$ (см. ГОСТ Р 52776–2007)	0,9
номинальное напряжение, $U_{\text{ном.дв}}$	10 кВ
КПД, η	0,972
кратность пускового тока, $k_{\text{пуск}}$	6,63
значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД:	
– в минимальном режиме сети, $I_{\text{ш.мин}}^{(3)}$	5,0 кА
– в максимальном режиме сети, $I_{\text{ш.макс}}^{(3)}$	5,5 кА
среднее напряжение на секции шин питания двигателя $U_{\text{ср}}$	10,03 кВ
максимальное сопротивление токовых цепей со стороны:	
– питания электродвигателя (по проекту), не более	0,5 Ом
– нейтрали электродвигателя (по проекту), не более	1,0 Ом
длительно допустимый ток реактора	1000 А
номинальное индуктивное сопротивление реактора	0,35 Ом

Пуск двигателя: реакторный, после завершения пуска двигатель продолжает работать через реактор.

Двигатель в самозапуске не участвует.

Для защиты двигателя применяем терминал БМРЗ–УЗД. Диапазон регулирования уставок токовой отсечки и ДТО от 1,00 до 65,00 А (вторичных). Диапазон регулирования уставок ДЗТ от 0,10 до 10,00 А, коэффициента торможения – от 0,20 до 0,70.

Применяем трансформаторы тока ТЛМ10–5–82 с сердечником типа Р и коэффициентом трансформации $k_{\text{ТТ}} = 300/5$.

Определяем значение номинального тока электродвигателя по формуле (2.14):

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

Определяем значение пускового тока электродвигателя по формуле (2.3):

$$I_{\text{пуск.дв.кат}} = k_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{ном.дв}} = 6,63 \cdot 211 \approx 1399 \text{ А.}$$

Определяем сопротивление питающей системы в максимальном режиме её работы по (2.1):

$$x_{\text{с.макс}} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ш.макс}}^{(3)}} = \frac{10,03}{\sqrt{3} \cdot 5,5} \approx 1,053 \text{ Ом.}$$

Пусковое сопротивление электродвигателя определяем по формуле (2.2):

$$x_{\text{пуск.дв}} = \frac{U_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{пуск.дв.кат}}} = \frac{10\,000}{\sqrt{3} \cdot 1399} \approx 4,13 \text{ Ом.}$$

Пусковой ток электродвигателя с учетом сопротивления питающей сети и токоограничивающего реактора определяем по выражению (2.5):

$$I_{\text{пуск.дв}} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \cdot (x_{\text{пуск.дв}} + x_{\text{р}} + x_{\text{с.макс}})} = \frac{10\,030}{\sqrt{3} \cdot (4,13 + 0,35 + 1,053)} \approx 1047 \text{ А.}$$

Выбираем ток срабатывания ТО по формуле (2.8):

$$I_{\text{ТО}} \geq 2,5 \cdot 1047 \approx 2618 \text{ А,}$$

или $\frac{2618}{60} \approx 43,63 \text{ А}$ во вторичных значениях. Уставка находится в пределах диапазона уставок терминала.

Определяем значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя $I_{\text{КЗ}}^{(2)}$ и коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_{\text{ч}}^{(2)}$ по формулам (2.9), (2.10):

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

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{КЗ}}^{(2)}}{I_{\text{ТО}}} = \frac{4330}{2618} \approx 1,65.$$

Коэффициент чувствительности ТО оказался меньше двух, поэтому для защиты этого двигателя от междуфазных замыканий необходимо применить дифференциальную защиту [1].

Расчет дифференциальной защиты

Выбираем для дифференциальной защиты однотипные ТТ типа ТЛМ10–5–82.

Определяем значение уставки $I_{\text{ДЗТ}}$ по формуле (2.13):

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

или $\frac{63,3}{60} = 1,055 \text{ А}$ вторичных. Уставка находится в пределах диапазона уставок терминала.

Определяем коэффициент торможения по формуле (2.15):

$$\frac{I_{\text{дифф}}}{I_{\text{торм}}} \geq k_n \cdot (k_{\text{пер}} \cdot k_{\text{одн}} \cdot \varepsilon + 2 \cdot f + \delta) = 1,2 \cdot (2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,025 + 0,025) = 0,39.$$

Проверяем чувствительность защиты. Коэффициент чувствительности ДЗТ определяем по выражению (2.16):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{4330}{63,3} \approx 68,4.$$

Определяем значение уставки срабатывания дифференциальной токовой отсечки. Ток небаланса дифференциальной защиты, соответствующий пусковому току двигателя равен (2.22)

$$I_{\text{нб.макс}} = 1,1 \cdot k_{\text{пуск}} \cdot k_{\text{нб}} \cdot I_{\text{ном.дв}} = 1,1 \cdot 6,63 \cdot 0,7 \cdot 211 \approx 1077 \text{ А.}$$

Ток срабатывания дифференциальной отсечки находим по выражению (2.18):

$$I_{\text{ДТО}} = k_n \cdot I_{\text{нб.макс}} = 1,2 \cdot 1077 \approx 1293 \text{ А,}$$

или $\frac{1293}{60} = 25,86 \text{ А}$ вторичных. Уставка находится в пределах диапазона уставок терминала.

Проверяем чувствительность защиты по выражению (2.21):

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{ДТО}}} = \frac{4330}{1293} = 3,35.$$

Защиты ДЗТ и ДТО работают без выдержки времени.

По результатам расчета строим характеристику работы защиты (рис. 2.9).

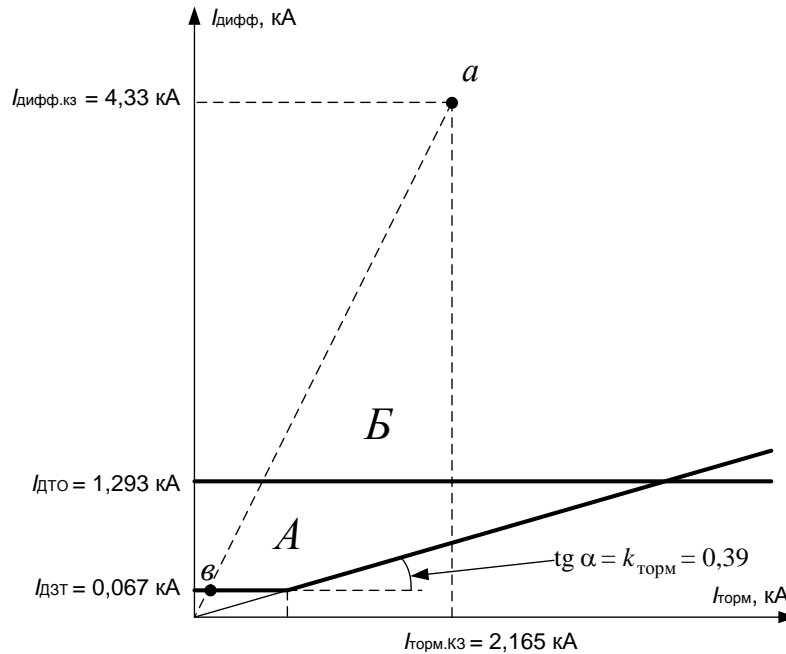


Рис. 2.9. Характеристика работы дифференциальной защиты двигателя СТД-3200: А – область срабатывания ДЗТ, Б – область срабатывания ДТО

Пример 2.5. Расчет защиты от междуфазных замыканий двухскоростного асинхронного электродвигателя АДО–1600/1000–10/12.

Пуск двигателя прямой, с низшей частоты вращения.

Двигатель участвует в процессе самозапуска, который может происходить как при работе на низшей, так и на высшей частоте вращения.

Исходные данные для расчета:

напряжение, $U_{\text{ном.дв}}$ 6 кВ

значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД:

– в минимальном режиме сети, $I_{\text{ш.мин}}^{(3)}$ 8 кА

максимальное сопротивление токовых цепей со стороны

питания АД (по проекту), не более 0,5 Ом

Данные различные для различных частот вращения приведены в табл. 1.

Таблица 2.1

Характеристики двухскоростного электродвигателя типа АДО–1600/1000–10/12

Характеристики электродвигателя	Частота вращения	
	низшая	высшая
Номинальная мощность на валу, кВт	$P_{\text{ном.дв.1}} = 1000$	$P_{\text{ном.дв.2}} = 1600$
Коэффициент мощности	$\cos \varphi_1 = 0,53$	$\cos \varphi_2 = 0,8$
КПД	$\eta_1 = 0,92$	$\eta_2 = 0,95$
Кратность пускового тока	$k_{\text{пуск1}} = 6,7$	$k_{\text{пуск2}} = 6,5$

Для защиты двигателя используется терминал БМРЗ–ДВА. Диапазон регулирования уставок токовой отсечки во вторичных токах от 1,00 до 65,00 А.

Для защиты используются трансформаторы тока ТЛМ10–5–82 с сердечником типа Р и коэффициентом трансформации $k_{\text{тр1}} = k_{\text{тр2}} = 300/5$ для статорных обмоток низшей и высшей частот вращения двигателя.

Расчет защиты от междуфазных замыканий для 1–й статорной обмотки электродвигателя

Номинальный ток электродвигателя для низшей частоты вращения $I_{\text{ном.дв1}}$ находим по формуле (2.14):

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

Определяем значение пускового тока электродвигателя для низшей частоты вращения по формуле (2.3):

$$I_{\text{пуск.дв.кат1}} = k_{\text{пуск1}} \cdot I_{\text{ном.дв1}} = 6,7 \cdot 197,3 \approx 1322 \text{ А.}$$

Выбираем ток срабатывания ТО по формуле (2.8):

$$I_{\text{ТО1}} \geq 2,5 \cdot 1322 \approx 3305 \text{ А,}$$

или $\frac{3305}{60} \approx 55,1$ А во вторичных значениях. Уставка находится в пределах диапазона уставок терминала.

Определяем значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя $I_{\text{кз}}^{(2)}$ и коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_{\text{ч1}}^{(2)}$ по формулам (2.9), (2.10):

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

$$k_{\text{ч1}}^{(2)} = \frac{I_{\text{кз}}^{(2)}}{I_{\text{ТО1}}} = \frac{6928}{3305} \approx 2,1.$$

Коэффициент чувствительности ТО имеет значение больше 2 [1].

Принимаем $I_{\text{ТО1}} = 3305$ А, или $\frac{3305}{60} \approx 55,1$ А во вторичных значениях.

Выполняем проверку ТТ. При пусковых токах двигателя погрешность трансформатора тока ТЛМ10–5–82 не превышает 10%.

Настройка параметров срабатывания второй ступени МТЗ с независимой характеристикой выполняется с уставками, рассчитанными по (2.7) и (2.8):

$$I_{\text{МТЗ1}} = 1,5 \cdot I_{\text{пуск.дв.кат1}} = 1,5 \cdot 1322 = 1983 \text{ А}.$$

$$t_{\text{МТЗ1}} = 0,1 \text{ с}.$$

Расчет защиты от межфазных замыканий для 2–й статорной обмотки электродвигателя

Номинальный ток электродвигателя для высшей частоты вращения $I_{\text{ном.дв2}}$ находим по формуле (2.14):

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

Определяем значение пускового тока электродвигателя для высшей частоты вращения по формуле (2.3):

$$I_{\text{пуск.дв.кат2}} = k_{\text{пуск2}} \cdot I_{\text{ном.дв2}} = 6,5 \cdot 202,6 \approx 1317 \text{ А}.$$

Выбираем ток срабатывания ТО по формуле (2.8):

$$I_{\text{ТО2}} \geq 2,5 \cdot 1317 \approx 3293 \text{ А},$$

или $\frac{3293}{60} \approx 54,9$ А во вторичных значениях. Уставка находится в пределах диапазона уставок терминала.

Определяем значение коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_{\text{ч1}}^{(2)}$ по формуле (2.10):

$$k_{\text{ч1}}^{(2)} = \frac{I_{\text{кз}}^{(2)}}{I_{\text{ТО1}}} = \frac{6928}{3293} \approx 2,1.$$

Коэффициент чувствительности ТО оказался больше двух.

Выполняем проверку ТТ. При пусковых токах двигателя погрешность трансформатора тока ТЛМ10–5–82 не превышает значения 10%.

Окончательно принимаем $I_{\text{ТО1}} = 3293$ А, или $\frac{3293}{60} \approx 54,9$ А во вторичных значениях. ТО работает без выдержки времени.

Настройка параметров срабатывания второй ступени МТЗ с независимой характеристикой выполняется с уставками, рассчитанными по формулам (2.7) и (2.8):

$$I_{\text{MT32}} = 1,5 \cdot I_{\text{пуск.дв.кат2}} = 1,5 \cdot 1317 = 1976 \text{ А.}$$

$$t_{\text{MT32}} = 0,1 \text{ с.}$$

3. Расчеты защит от замыканий на землю в статорной обмотке двигателя

3.1. Общие положения

Защита электродвигателей мощностью до 2 МВт от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) с действием на отключение выполняется при токах замыкания на землю 10 А и более. Защита электродвигателей мощностью более 2 МВт с действием на отключение должна предусматриваться при токах ОЗЗ 5 А и более [1].

Для повышения чувствительности защита от ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью защита выполняется с выдержкой времени 0,1 с. Для быстрого отключения электродвигателя при двойных замыканиях на землю применяется вторая ступень защиты с первичным током срабатывания 50–100 А, работающая без выдержки времени [1].

Защита действует на отключение электродвигателя, а у синхронных электродвигателей также на устройство автоматического гашения поля (АГП), если оно предусмотрено [1].

Защита от замыканий на землю в терминалах БМРЗ выполняется двухступенчатой:

- первая ступень выполняет функцию защиты от однофазных замыканий на землю;
- вторая ступень выполняет функцию защиты от двойных замыканий на землю.

3.2. Расчет защиты электродвигателя от однофазных замыканий на землю

При реализации защиты от ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью настройка защиты выполняется отстройкой её тока срабатывания от собственного емкостного тока защищаемого присоединения. В зависимости от значения суммарного тока ОЗЗ может выполняться с действием на сигнализацию или отключение поврежденного электродвигателя [1]. Принцип работы защиты поясняет рис. 3.1.

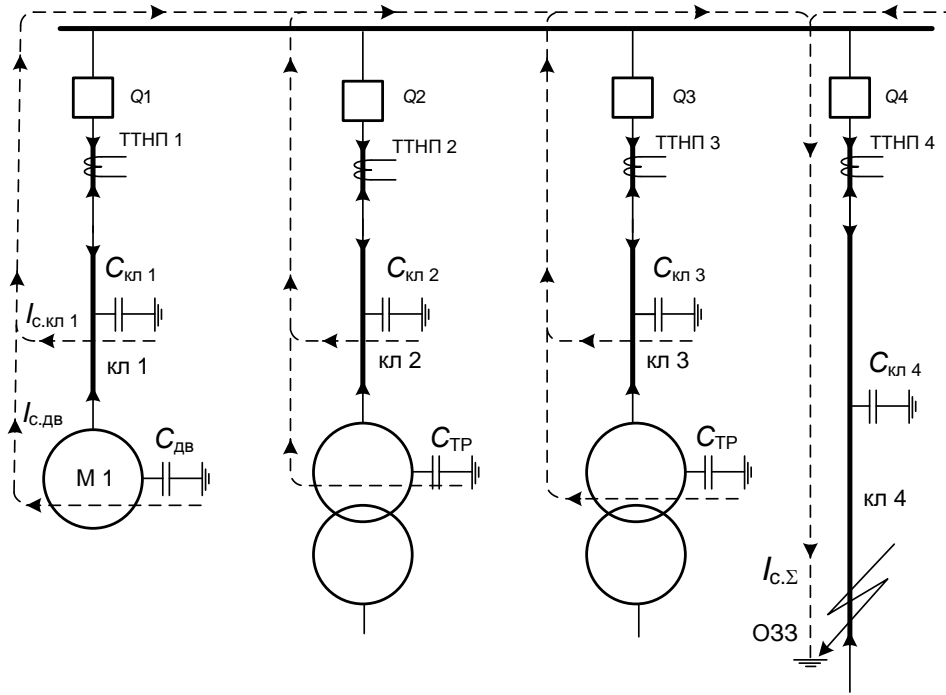


Рис. 3.1. ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью

При ОЗЗ весь суммарный емкостной ток двух неповрежденных фаз этой сети будет протекать в точку ОЗЗ, то есть через все присоединения сети, где нет ОЗЗ, будет протекать свой собственный емкостной ток в направлении места ОЗЗ, от значений которых и выполняется отстройка защит этих присоединений.

Ток срабатывания защиты электродвигателя от ОЗЗ определяется из формулы:

$$I_{с.з} = \frac{k_n \cdot k_{бр}}{k_b} \cdot (I_{емк.дв} + I_{емк.к.л}), \quad (3.1)$$

где k_b – коэффициент возврата (0,95 для терминалов БМРЗ, если защита работает без выдержки времени принимается равным 1), k_n – коэффициент надежности, принимается равным 1,2; $I_{емк.дв}$ – емкостной ток защищаемого электродвигателя, $I_{емк.к.л}$ – емкостной ток кабельной линии, соединяющий электродвигатель с ячейкой, $k_{бр}$ – коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока в момент возникновения ОЗЗ,

– $k_{бр} = 2$ при времени срабатывания защиты от ОЗЗ 0,1 с,

– $k_{бр} = 2,5$ при выполнении защиты от ОЗЗ без выдержки времени.

При отсутствии паспортных данных на двигатель емкостной ток двигателя напряжением выше 1 кВ $I_{емк.дв}$, А, можно определить по следующим формулам [7]:

$$\text{– для двигателей напряжением 6 кВ: } I_{емк.дв} \approx 0,017 \cdot S_{ном.дв}, \quad (3.2)$$

$$\text{– для двигателей напряжением 10 кВ: } I_{емк.дв} \approx 0,03 \cdot S_{ном.дв}, \quad (3.3)$$

где $S_{ном.дв}$, МВА – полная мощность электродвигателя, которая рассчитывается по формуле:

$$S_{ном.дв} = \frac{P_{ном.дв}}{\cos \varphi \cdot \eta}, \quad (3.4)$$

где $P_{ном.дв}$ – номинальная мощность на валу электродвигателя, МВт.

Более точный расчет собственного емкостного тока электродвигателя выполняется по выражению [8]:

$$I_{\text{емк.дв}} = 2\pi \cdot f_{\text{ном}} \cdot \sqrt{3} \cdot C_{\text{дв}} \cdot U_{\text{ном.дв}}, \quad (3.5)$$

где $C_{\text{дв}}$ – электрическая емкость фазы статора двигателя, Ф; $U_{\text{ном.дв}}$ – номинальное напряжение двигателя, В; $f_{\text{ном}}$ – номинальное значение частоты питающей сети, Гц.

Емкость фазы статора принимается по данным завода–изготовителя, для некоторых двигателей она приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Значения электрической емкости статорной обмотки на землю [5]

Тип двигателя	Мощность двигателя, кВт	Емкость статорной обмотки на три фазы, мкФ, для двигателей напряжением 10 кВ	Емкость статорной обмотки на три фазы, мкФ, для двигателей напряжением 6 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 – 12500 – 2	12500	0,15	0,22

При отсутствии данных можно пользоваться следующими приближенными формулами:

– для неявнополюсных синхронных двигателей и асинхронных двигателей – $C_{\text{дв}}$, Ф, для одной фазы определяется по формуле [8]:

$$C_{\text{дв}} \approx \frac{0,0187 \cdot S_{\text{ном.дв}} \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{U_{\text{ном.дв}} \cdot (1 + 0,08 \cdot U_{\text{ном.дв}})}}, \quad (3.6)$$

где $S_{\text{ном.дв}}$ – полная мощность электродвигателя, МВ·А; $U_{\text{ном.дв}}$ – номинальное межфазное напряжение двигателя, кВ.

– для явнополюсных двигателей $C_{\text{дв}}$, Ф, определяется по формуле [8]:

$$C_{\text{дв}} \approx \frac{404 \sqrt{S_{\text{ном.дв}}^3} \cdot 10^{-6}}{3 \cdot (U_{\text{ном.дв}} + 3600) \cdot \sqrt[3]{n_{\text{ном}}}}, \quad (3.7)$$

где $S_{\text{ном.дв}}$ – полная мощность электродвигателя, кВт·А; $U_{\text{ном.дв}}$ – номинальное межфазное напряжение двигателя, В; $n_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения ротора, об/мин.

Значение удельного емкостного тока кабельной линии $I_{\text{с.кл}}$ с бумажной изоляцией определяется из табл. 3.2.

Таблица 3.2

Значение удельного емкостного тока кабельной линии $I_{\text{с.кл}}$ с бумажной изоляцией [7]

Сечение жил кабеля мм ²	Удельный емкостной ток $I_{\text{с}}$, А/км, при напряжении сети	
	6 кВ	10 кВ
1	2	3
16	0,40	0,55
25	0,50	0,65
35	0,58	0,72

1	2	3
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

При отсутствии данных на параметры кабельной линии емкостной ток кабельной линии с бумажной изоляцией $I_{\text{емк.кл}}$, А, можно определить по приближенной формуле [7]:

$$I_{\text{емк.кл}} \approx \frac{U_{\text{ном.кл}} \cdot l}{10}, \quad (3.8)$$

где $U_{\text{ном.кл}}$ – номинальное линейное напряжение кабельной линии, кВ; l – длина кабельной линии, км.

Для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена точное значение удельного емкостного тока необходимо запросить у завода изготовителя на данную партию кабельной продукции.

В сетях с резистивным заземлением нейтрали суммарное значение тока ОЗЗ $I_{\text{ОЗЗ}\Sigma}^{(1)}$, А, определяется по формуле

$$I_{\text{ОЗЗ}\Sigma}^{(1)} = \sqrt{I_{\text{с}\Sigma}^2 + I_R^2}, \quad (3.9)$$

где $I_{\text{с}\Sigma}$ – суммарное значение емкостного тока сети; I_R – активный ток, протекающий через резистор резистивного заземления нейтрали.

Для машин небольшой мощности и коротких кабельных линиях подключения электродвигателя расчетное значение параметра срабатывания защиты может оказаться меньше минимального тока срабатывания терминала. В этом случае ток срабатывания защиты принимают равным значению минимального тока срабатывания реле.

Проверка чувствительности защиты при ОЗЗ выполняется по выражению

$$k_q^{(1)} = \frac{I_{\text{ОЗЗ}\Sigma}^{(1)}}{I_{\text{с.з}}} \geq 1,5 \dots 2, \quad (3.10)$$

где $I_{\text{ОЗЗ}\Sigma}^{(1)}$ – суммарное значение емкостного тока сети при ОЗЗ (без учета емкостного тока защищаемого присоединения), А.

Значение коэффициента чувствительности защиты от ОЗЗ должно быть больше или равно 1,5 [1].

В некоторых сетях с изолированной нейтралью токи ОЗЗ малы и чувствительность защиты может оказаться недостаточной. Для повышения чувствительности защит в сетях с изолированной и частичнокомпенсированной нейтралью можно применять следующие мероприятия:

- выполнить защиту с выдержкой времени 0,1 – 0,5 с при введенной защите от двойных замыканий на землю, работающей без выдержки времени,
- применить направленную токовую защиту от ОЗЗ.

В этом случае ток срабатывания защиты может быть уменьшен, если принять в выражении $k_{\text{бр}} = 1$. Это позволит в два раза повысить чувствительность защиты.

Коэффициенты трансформации трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП) приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Коэффициенты трансформации трансформатора тока нулевой последовательности

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

Трансформаторы типа ТЗР при дуговых ОЗЗ трансформируют составляющую промышленной частоты значительно хуже, чем литые ТТ (ТЗЛМ, ТЗЛ), что может вызвать загробление защиты и ее отказ. Поэтому применение трансформаторов типа ТЗР не рекомендуется [7].

Для реализации защиты от однофазных замыканий на землю двухскоростных двигателей рекомендуется применять отдельные трансформаторы тока нулевой последовательности на каждую статорную обмотку (скорость) двигателя. В БМРЗ–ДВА для этого предусмотрены два входа для подключения ТТ нулевой последовательности. Для двухскоростного двигателя расчет защиты от ОЗЗ выполняется отдельно для каждой скорости двигателя.

3.3. Расчет защиты электродвигателя от двойных замыканий на землю

Защита необходима в случае выполнения защиты от однофазных замыканий на землю с действием на сигнализацию или если защита от ООЗ работает с выдержкой времени 0,1 – 0,5 с. Защиту можно не применять, если для защиты двигателя от междофазного КЗ применяется ТО или продольная дифференциальная защита выполненная в трехфазном исполнении [1]. При использовании для защиты электродвигателя терминалов (в том числе и БМРЗ), имеющих в своём составе защиту от двойных замыканий на землю, эту защиту целесообразно ввести.

Ток срабатывания защиты от двойных замыканий на землю принимается без расчетов 100 А (первичных). Защита выполняется без выдержки времени.

3.4. Расчет направленной токовой защиты двигателя от однофазных замыканий на землю

Направленная токовая защита от ОЗЗ может применяться в сетях с изолированным или резистивным заземлением нейтрали для обеспечения необходимой чувствительности защиты в случаях, когда ток срабатывания защиты от однофазных замыканий на землю равен или больше суммарного значения тока ОЗЗ сети $I_{\text{ОЗЗ}\Sigma}^{(1)}$.

Для обеспечения коэффициента чувствительности не менее 1,5 значение тока срабатывания защиты должно удовлетворять условию:

$$I_{\text{с.з.}} < \frac{I_{\text{ОЗЗ}\Sigma}^{(1)}}{1,5}. \quad (3.11)$$

Характеристика направленной защиты от ОЗЗ для сети с изолированной нейтралью приведена на рис. 3.2.

В блоках БМРЗ предусмотрена возможность изменения значения угла $\varphi_{\text{мч}}$. Для сети с изолированной нейтралью рекомендуется устанавливать угол $\varphi_{\text{мч}}$, равным + 54°. Это обусловлено тем, что емкостной ток сети на поврежденном присоединении

будет отставать от напряжения $3U_0$ на 90° (при принятом положительном направлении от шин). При этом возможные угловые погрешности ТНП компенсируются смещением характеристики на указанный угол.

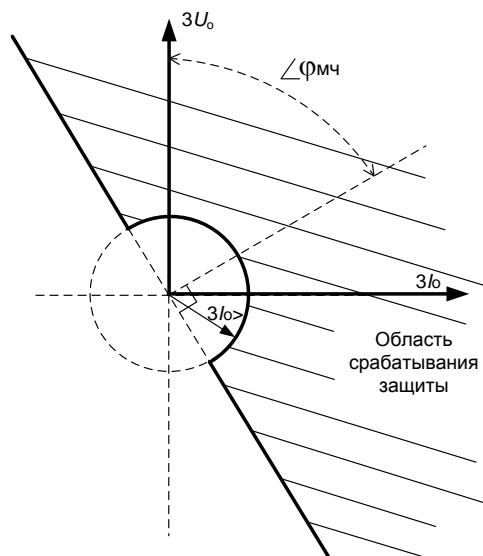


Рис. 3.2. Характеристики направленной защиты от ОЗЗ сети с изолированной нейтралью

Для сети с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор, рекомендуется устанавливать угол $\varphi_{мч}$, равным $+135^\circ$ (рис. 3.3).

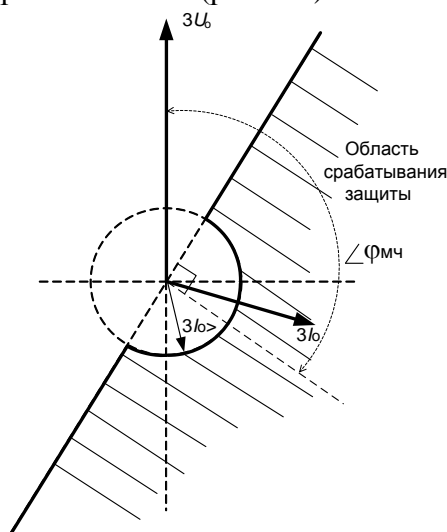


Рис. 3.3. Характеристики направленной защиты от ОЗЗ сети, заземленной через высокоомный резистор

В блоках БМРЗ, выпущенных ранее 2012 года, характеристика направления мощности нулевой последовательности может отличаться от приведенной. В таком случае следует руководствоваться характеристикой, приведенной в руководстве по эксплуатации на конкретный блок.

Расчет угла между вектором тока $3I_0$ и вектором напряжения $3U_0$ при ОЗЗ выполняется по формуле

$$\varphi_{I_0-U_0} = 90^\circ + \arcsin\left(\frac{I_{\text{акт}}}{\sqrt{I_{\text{емк}}^2 + I_{\text{акт}}^2}}\right), \quad (3.12)$$

где $I_{\text{акт}}$ – активная составляющая тока ОЗЗ, А; $I_{\text{емк}}$ – ёмкостная составляющая тока ОЗЗ, А.

При применении направленной защиты от ОЗЗ обязательно вводится в работу защита от двойных замыканий на землю, поскольку при двойных замыканиях на землю вектор тока может оказаться вне зоны действия направленной защиты.

3.5. Неселективная сигнализация замыканий на землю и функция селектора направления ОЗЗ (СНОЗЗ)

На всех подстанциях применяют групповое устройство контроля изоляции сети с действием на сигнализацию, выполненное с использованием открытого треугольника трансформатора напряжения секции и подключенного к нему реле напряжения нулевой последовательности $3U_0$. Эта функция реализована в термине трансформатора напряжения секции. Напряжение срабатывания этого реле принимают из условия отстройки от напряжения небаланса $U_{\text{нб}}$ трансформатора напряжения $3U_0$ в нормальном режиме работы:

$$U_{\text{с.з}} > k_{\text{отс}} \cdot U_{\text{нб}}, \quad (3.13)$$

где $k_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, принимается равным двум.

Обычно значение $U_{\text{с.з}}$ выбирается из диапазона 7–15 В (во вторичных значениях).

При небольших значениях токов ОЗЗ, когда селективную защиту от ОЗЗ выполнить невозможно, а также в случаях, когда допускается действие защит ОЗЗ только на сигнал, это устройство является основным средством обнаружения ОЗЗ в сети. После срабатывания защиты на сигнал обслуживающий персонал немедленно приступает к выявлению присоединения с ОЗЗ.

Для уменьшения количества операций отключения в термине защиты двигателя предусмотрена функция селектора направления ОЗЗ (СНОЗЗ), которая сразу укажет присоединение с ОЗЗ. При выявлении замыкания на своем присоединении алгоритм СНОЗЗ выдает сигнал на светодиод номер 16 на лицевой панели. Сигнал фиксируется, сброс сигнала осуществляется квитированием.

Работа СНОЗЗ осуществляется на основе измерения напряжения нулевой последовательности и направления производной мощности нулевой последовательности на начальном участке переходного процесса. Для правильной работы СНОЗЗ необходимо задать уставку по уровню аварийной составляющей напряжения нулевой последовательности $3U_0 >$ (ориентировочно 10 В) и уставку по углу максимальной чувствительности для реле направления мощности нулевой последовательности $\varphi_{\text{м.ч}}$ при ОЗЗ.

3.6. Примеры расчета защит от замыканий на землю

Пример 3.1. Расчет защиты от замыканий на землю асинхронного электродвигателя серии А4, работающего в сети с изолированной нейтралью.

Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{\text{ном.дв}}$ 630 кВт
коэффициент мощности, $\cos \varphi$ 0,88

номинальное напряжение, $U_{\text{ном.дв}}$ 6 кВ
 КПД, η 0,952
 кратность пускового тока, $k_{\text{пуск}}$ 5,5

значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД, $I_{\text{ш}}^{(3)}$ 5,5 кА

Электродвигатель подключен кабелем с бумажной изоляцией и медными жилами сечением 185 мм². Длина кабеля – 40 м.

Суммарное значение тока ОЗЗ на частоте 50 Гц сети, в которой работает этот АД, на вводах питания двигателя, составляет $I_{\text{ОЗЗ}\Sigma}^{(1)} = 1,4$ А.

В схеме защиты применен ТТНП типа ТЗР.

Определяем полную мощность двигателя (3.4):

$$S_{\text{ном.дв}} = \frac{P_{\text{ном.дв}}}{\cos \varphi \cdot \eta} = \frac{0,63}{0,88 \cdot 0,952} = 0,752 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Определяем значение емкостного тока двигателя $I_{\text{емк.дв}}$ (3.2):

$$I_{\text{емк.дв}} \approx 0,017 \cdot S_{\text{ном.дв}} = 0,017 \cdot 0,752 = 0,0128 \text{ А}.$$

В учебных целях определим значение емкостного тока двигателя вторым способом.

Значение электрической ёмкости электродвигателя $C_{\text{дв}}$ для одной фазы (3.6):

$$C_{\text{дв}} \approx \frac{0,0187 \cdot S_{\text{ном.дв}} \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{U_{\text{ном.дв}}} \cdot (1 + 0,08 \cdot U_{\text{ном.дв}})} = \frac{0,0187 \cdot 0,752 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{6} \cdot (1 + 0,08 \cdot 6)} = 3,93 \cdot 10^{-9} \text{ Ф},$$

значение емкостного тока двигателя $I_{\text{емк.дв}}$ (3.5):

$$I_{\text{емк.дв}} = 2\pi \cdot f_{\text{ном}} \cdot \sqrt{3} \cdot C_{\text{дв}} \cdot U_{\text{ном.дв}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1,73 \cdot 3,93 \cdot 10^{-9} \cdot 6000 = 0,0128 \text{ А}.$$

Результаты расчетов емкостного тока электродвигателя обоими способами получились одинаковы.

По табл. 3.2 определяем значение емкостного тока кабельной линии:

$$I_{\text{емк.кл}} \approx 1,25 \cdot \frac{40}{1000} = 0,05 \text{ А}.$$

Определяем ток срабатывания защиты от ОЗЗ (3.1):

$$I_{\text{с.з}} = \frac{k_{\text{н}} \cdot k_{\text{бр}}}{k_{\text{г}}} \cdot (I_{\text{емк.дв}} + I_{\text{емк.кл}}) = \frac{1,2 \cdot 2}{0,95} \cdot (0,0128 + 0,05) \approx 0,15 \text{ А}.$$

Определяем вторичное значение тока срабатывания защиты $3I_{\text{0 втор}}$ с учетом коэффициента трансформации трансформатора тока нулевой последовательности типа ТЗР:

$$3I_{\text{с.з.втор}} \geq \frac{3I_0}{k_{\text{тт}}} = \frac{0,15}{18} \approx 0,009 \text{ А}.$$

Терминал не может надежно работать с уставкой по вторичному току 9 мА по условию электромагнитной совместимости. Увеличим первичный ток срабатывания защиты от ОЗЗ до значения 0,5 А. В этом случае вторичный ток срабатывания защиты составит: $0,5/18 = 0,028 \text{ А}$.

Определяем коэффициент чувствительности защиты при ОЗЗ (3.10):

$$k_{\text{ч}}^{(1)} = \frac{1,4}{0,5} = 2,8.$$

Полученное значение коэффициента чувствительности соответствует требова-

ниям [1].

Принимаем выдержку времени срабатывания первой ступени защиты от замыканий на землю 0,1 с.

Принимаем уставку срабатывания защиты от двойных замыканий на землю, равной 100 А. Защита от двойных замыканий на землю работает без выдержки времени.

Пример 3.2. Расчет защиты от замыканий на землю синхронного электродвигателя типа СТД–6300–2, работающего в сети с изолированной нейтралью:

Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{\text{ном.дв}}$ 6300 кВт

коэффициент мощности, $\cos \varphi$ (см. ГОСТ Р 52776–2007) 0,9

номинальное напряжение, $U_{\text{ном.дв}}$ 10 кВ

КПД, η 0,975

кратность пускового тока, $k_{\text{пуск}}$ 6,28

Электродвигатель подключен тремя трехфазными кабелями с бумажной изоляцией. Сечение медных жил – 185 мм². Длина кабеля – 100 м.

Суммарное значение тока ОЗЗ на частоте 50 Гц на вводах питания двигателя, составляет $I_{\text{ОЗЗ}\Sigma}^{(1)} = 0,5$ А.

Выполняем защиту от ОЗЗ с выдержкой времени 0,1 с для отстройки от переходных процессов, связанных с перезарядом емкостей сети.

Значение емкости статорной обмотки этого двигателя выбираем из табл. 3.1. Выполняем расчет значения емкостного тока этого электродвигателя (3.5):

$$I_{\text{емк.дв}} = 2\pi \cdot f_{\text{ном}} \cdot \sqrt{3} \cdot C_{\text{дв}} \cdot U_{\text{ном.дв}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1,73 \cdot \left(\frac{0,11}{3}\right) \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^3 \approx 0,004 \text{ А.}$$

Определяем значение емкостного тока трех кабельных линий (3.8):

$$I_{\text{емк.кл}} \approx \frac{U_{\text{ном.кл}} \cdot l}{10} = 3 \cdot \frac{10 \cdot 0,1}{10} = 0,3 \text{ А.}$$

Первичный ток срабатывания защиты от ОЗЗ электродвигателя СТД–6300–2 рассчитываем по формуле (3.1):

$$I_{\text{с.з}} = \frac{k_{\text{н}} \cdot k_{\text{бр}}}{k_{\text{в}}} \cdot (I_{\text{емк.дв}} + I_{\text{емк.кл}}) = \frac{1,2 \cdot 2}{0,95} \cdot (0,004 + 0,3) = 0,77 \text{ А.}$$

Ток срабатывания защиты от ОЗЗ $I_{\text{с.з}}$ оказался больше суммарного емкостного тока сети $I_{\text{ОЗЗ}\Sigma}^{(1)}$, поэтому для повышения чувствительности защиты выполним ее направленной.

Уставку срабатывания по току направленной защиты от ОЗЗ выбираем исходя из условия (3.11):

$$I_{\text{с.з}} < \frac{I_{\text{ОЗЗ}\Sigma}^{(1)}}{1,5} = \frac{0,5}{1,5} = 0,333 \text{ А.}$$

Ток срабатывания защиты выбираем $I_{\text{с.з}} = 0,3$ А.

При этом коэффициент чувствительности защиты составит:

$$k_{\text{ч}}^{(1)} = \frac{I_{\text{ОЗЗ}\Sigma}^{(1)}}{3I_{0>}} = \frac{0,5}{0,3} = 1,67.$$

$k_{\text{ч}}^{(1)} > 1,5$, защита удовлетворяет требованиям [1].

Двигатель работает в сети с изолированной нейтралью – характеристику работы направленной защиты от ОЗЗ выбираем в соответствии с рис. 3.2.

Определяем вторичное значение тока срабатывания защиты с учетом коэффициента трансформации ТТП типа ТЗР:

$$3I_{0\text{ втор}} \geq \frac{3I_0}{k_{\text{тр}}} = \frac{0,3}{18} = 0,0167 \text{ А.}$$

Принимаем ток срабатывания защиты от двойных замыканий на землю 100 А.

Защита от двойных замыканий на землю работает без выдержки времени.

4. Расчет защиты минимального напряжения (ЗМН)

Защита минимального напряжения применяется в качестве основной защиты асинхронных электродвигателей и в качестве резервной для синхронных.

Защита минимального напряжения электродвигателей выполняется групповой, т.е. на секцию питания электродвигателей устанавливается один комплект в ячейке трансформатора напряжения (например, БМРЗ–104–ТН), действующий на все электродвигатели.

Первая ступень (ЗМН–1) этой защиты предназначена для отключения ответственных электродвигателей при кратковременных перерывах питания с целью облегчения самозапуска ответственных электродвигателей после восстановления питания. Вторая ступень (ЗМН–2) предназначена для отключения всех электродвигателей при длительном исчезновении напряжения по условиям технологического процесса и техники безопасности.

Уставка срабатывания ЗМН–1 принимается больше, чем остаточное напряжение, при котором возможен самозапуск электродвигателей, и меньше, чем остаточное напряжение при пусках отдельных электродвигателей:

$$U_{\text{с.ЗМН1}} = (0,6 \div 0,7) U_{\text{ном}}. \quad (4.1)$$

Время срабатывания принимается по условию отстройки от времени срабатывания быстродействующих защит присоединений:

$$t_{\text{с.ЗМН1}} = 0,5 \text{ с.} \quad (4.2)$$

Уставка срабатывания второй ступени ЗМН принимается по условию возврата при самозапуске электродвигателей:

$$U_{\text{с.ЗМН2}} = \frac{U_{\text{сзп}}}{k_{\text{н}} \cdot k_{\text{в}}} = (0,4 \div 0,5) U_{\text{ном}}, \quad (4.3)$$

где $U_{\text{сзп}}$ – остаточное напряжение при самозапуске электродвигателей; $k_{\text{н}}$ – коэффициент надежности, принимается равным 1,1–1,2, $k_{\text{в}}$ – коэффициент возврата реле минимального напряжения.

Время срабатывания ЗМН–2 обычно принимают

$$t_{\text{с.ЗМН2}} = 5 \div 10 \text{ с.} \quad (4.4)$$

Действие ЗМН осуществляется через общесекционные шинки 1ШМН и 2ШМН и индивидуальные выходные реле, установленные в ячейках электродвигателей.

На подстанциях с СД ЗМН выполняет следующие дополнительные функции:

- резервирует ЗПП при близких КЗ, когда последняя может отказать из-за глубокого снижения напряжения;

- ЗМН–1 отключает выключатели и запускает АПВ электродвигателей, участвующих в самозапуске (возможно также гашение поля без отключения выключателей).

чателей), через шинку *1ШМН* осуществляется также отключение СД с пуском АПВ при срабатывании ЗПП или АВР;

- при длительном исчезновении напряжения ЗМН–2 отключает выключатели электродвигателей, запрещает их АПВ и дает команду в схемы технологической автоматики на полный останов технологии приводного агрегата (закрытие кранов, задвижек, отключение маслососов и т.п.).

Отметим, что при применении для защиты электродвигателей цифровых многофункциональных терминалов имеется возможность реализовать функцию ЗМН в каждом терминале. Обычно такое решение не применяют, ЗМН по-прежнему выполняют групповой (в терминале трансформатора напряжения) из следующих соображений:

- ввод уставок выполняется в одном, а не в ряде терминалов;
- проще выполнять блокировку от ошибочных действий персонала и КЗ в цепях напряжения;
- проще выполнять проверки ЗМН;
- меньше загрузка сетей АСУ;
- упрощение вторичной коммутации. Например, шинка *1ШМН* используется также для передачи команд на отключение СД с пуском АПВ при срабатывании ЗПП или АВР, а также и для отключения СД и ускорения АВР при КЗ в зоне дифзащиты трансформатора.

На электродвигателях с изменяемой частотой вращения ответственных механизмов, самозапуск которых допустим и целесообразен, защита минимального напряжения должна производить автоматическое переключение на низшую частоту вращения.

Выполнение ЗМН на терминалах БМРЗ. Групповая защита минимального напряжения предусмотрена в терминале БМРЗ–104–ТН. Индивидуальный комплект защиты минимального напряжения, предусмотренный в терминале БМРЗ–УЗД, может использоваться для одиночных электродвигателей в случаях, когда групповая защита минимального напряжения по каким – либо причинам не установлена или ее использование не представляется возможным.

Параметры срабатывания защиты выбираются по выражениям (4.1) – (4.4).

5. Расчет защиты от потери питания

Защита от потери питания (ЗПП) предназначена для выявления режима потери питания и подпитки во внешнюю сеть со стороны синхронных двигателей (СД).

На подстанциях с преобладающей нагрузкой СД защита выполняется групповой и устанавливается на вводном выключателе подстанции. Она действует на отключение (или гашение поля) СД секции (при включенном секционном выключателе – и на отключение или гашение поля СД смежной секции), блокировку АЧР, и блокируется от частотного органа АВР (для предотвращения срывов АВР).

На подстанциях с одиночными СД защита выполняется в терминале защиты двигателя с действием на его отключение, для этого в блоке БМРЗ–УЗД предусмотрена функция ЗПП.

Выполнение защиты от потери питания синхронных электродвигателей на терминалах БМРЗ. Предусмотрена универсальная схема, реагирующая на снижение частоты и изменение направления активной мощности. Органы направления мощности предусмотрены в двух фазах, так как при двухфазном КЗ за трансформатором со схемой соединения обмоток Y/Δ (на питающей ВЛ) один орган защиты может сработать неправильно.

Органы направления мощности выполнены по 90-градусной схеме и включены так, что при направлении мощности от шин к двигателю они находятся в сработавшем

состоянии и запрещают работу ЗПП (рис. 5.1). При направлении мощности от двигателя к шинам (обратное направление мощности) органы направления мощности заклинены, при этом при снижении частоты ЗПП срабатывает. Таким образом, ЗПП срабатывает в случаях, когда мощность направлена от двигателя в сеть или равна нулю, а частота снижается до уставки срабатывания.

Обычно принимают уставку по частоте срабатывания ЗПП

$$F_{с.зпп} = 48,5 \text{ Гц.} \quad (5.1)$$

Выдержка времени ЗПП вводится для предотвращения излишнего срабатывания ЗПП в переходных режимах (например, при снижении и восстановлении напряжения), когда реле частоты может кратковременно замыкать свой контакт. Выдержка времени срабатывания защиты принимается [10]:

$$t_{с.зпп} = 0,3 - 0,4 \text{ с.} \quad (5.2)$$

Поскольку цифровое реле направления мощности включается по 90-градусной схеме, значение уставки угла максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч}$ следует выбирать в диапазоне от минус 30° до минус 60° [11].

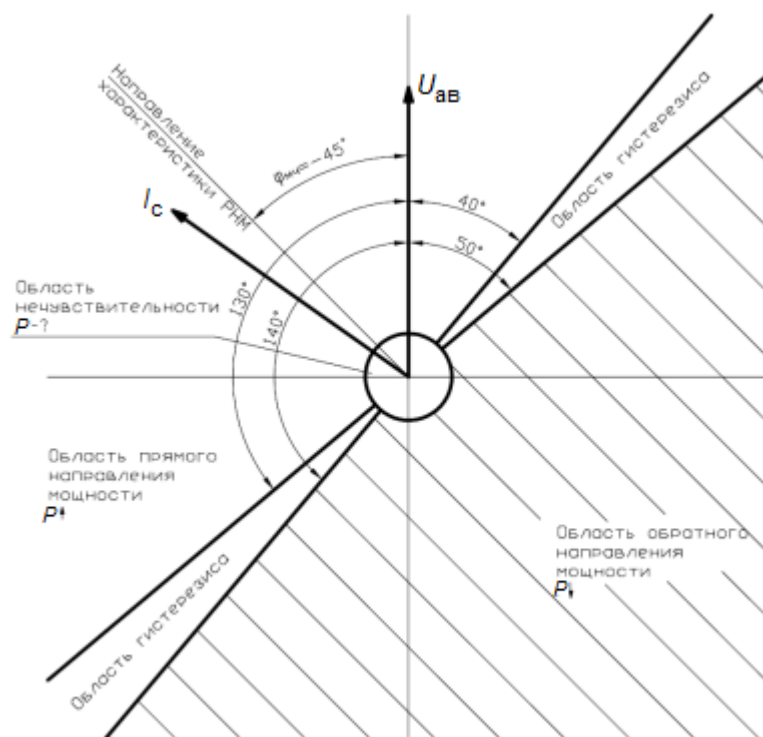


Рис. 5.1 Характеристика реле направления мощности

6. Расчеты защиты от неполнофазного режима работы электродвигателя

При неполнофазном режиме работы электродвигателя ток в каждой из двух рабочих фазах составляет от 1,6 до 2,5 $I_{ном.дв}$. Поэтому неполнофазный режим работы электродвигателя приводит к недопустимому разогреву зубцов ротора, пазовых клиньев и бандажных колец, а также к увеличению механической вибрации. При возможности обрыва фазы на линии внешнего электроснабжения рекомендуется применять для двигателей защиту от неполнофазного режима.

Выполнение защиты от неполнофазного режима на терминалах БМРЗ и выбор уставок. Для защиты от неполнофазных режимов (ЗНР) применена токовая защита обратной последовательности. ЗНР может работать с независимой или зави-

симой выдержкой времени. Для независимой и обратнозависимой ступеней предусмотрены отдельные уставки по току.

Первичный ток срабатывания защиты по обратной последовательности выбирается из условия несрабатывания защиты от токов небаланса нормального режима двигателя:

$$I_{2c.3} = k_n \cdot \varepsilon \cdot I_{ном} \approx 1,5 \cdot 0,1 \cdot I_{ном} = 0,15 \cdot I_{ном}, \quad (6.1)$$

где k_n – коэффициент надежности, принимаемый равным 1,5; ε – коэффициент несимметрии по току в нормальном режиме, учитывающий несимметрию линейных напряжений, разное сопротивление фаз электродвигателя и погрешность трансформаторов тока, принимается равным 0,1; $I_{ном}$ – номинальный ток двигателя, А.

Чувствительность защиты обычно достаточно высока и может не проверяться.

При обрыве фазы двигателя токи прямой и обратной последовательностей:

$$I_1 = I_2 = I / \sqrt{3}, \quad (6.2)$$

где I – ток неповрежденной фазы, т.е. защита пускается при токах неповрежденных фаз, равных $\sqrt{3} \cdot 0,15 \cdot I_{ном} = 0,26 \cdot I_{ном}$.

При внешнем близком двухфазном КЗ значение тока I_2 , проходящего через двигатель, составляет примерно 0,5 пускового тока, и срабатывание защиты также обеспечивается, если это КЗ не будет отключено «своей» защитой.

Уставка по времени срабатывания защиты выбирается наибольшей из следующих условий:

– несрабатывание при пуске (самозапуске) двигателя, поскольку в этом режиме ток небаланса (обратной последовательности) существенно увеличивается:

$$t_{c.3} \geq (1,2 \div 1,3) \cdot t_{п}, \quad (6.3)$$

где $t_{п}$ – длительность пуска (самозапуска) двигателя;

– согласование с временем срабатывания пускового органа АВР по напряжению обратной последовательности (для предотвращения излишнего отключения перед АВР, если такой орган используется):

$$t_{c.3} \geq t_{ABPU2} + \Delta t, \quad (6.4)$$

где Δt – ступень селективности, принимается равной 1 с.

В терминалах БМРЗ–ДА и БМРЗ–ДД значение тока I_2 определяется из значений фазных токов. Для использования защиты от неполнофазного режима в этих терминалах необходимо наличие трансформаторов тока в каждой фазе питания двигателя. В БМРЗ–УЗД и БМРЗ–ДВА предусмотрена возможность вычисления тока I_2 из токов двух фаз и тока $3I_0$ и защиту от неполнофазного режима в этих терминалах можно реализовать при наличии трансформаторов тока в двух фазах питания двигателя.

7. Расчеты защит электродвигателя от перегрузок

7.1. Общие положения

Защита от перегрузки должна предусматриваться для электродвигателей [1]:

- подверженных перегрузке по технологическим причинам;
- с особо тяжелыми условиями пуска и самозапуска (длительность прямого пуска непосредственно от сети 20 с и более);

– перегрузка которых возможна при чрезмерном увеличении длительности пускового периода при понижении напряжения питающей сети.

Защиту от симметричной перегрузки следует предусматривать в одной фазе с зависимой или не зависимой от тока выдержкой времени, отстроенной от длительности пуска электродвигателя в нормальных условиях и самозапуска после действия АВР и АПВ. Для исключения излишних срабатываний защиты от перегрузки при форсировке возбуждения синхронных электродвигателей выдержка времени срабатывания защиты выбирается близкой к предельно допустимой тепловой перегрузочной характеристике электродвигателя.

На электродвигателях, подверженных перегрузке по технологическим причинам, защита, как правило, должна выполняться с действием на сигнал и автоматическую разгрузку механизма.

Действие защиты на отключение электродвигателя допускается:

- на электродвигателях механизмов, для которых отсутствует возможность своевременной разгрузки без останова, или на электродвигателях, работающих без постоянного дежурства персонала;
- на электродвигателях механизмов с тяжелыми условиями запуска или самозапуска.

На электродвигателях, имеющих принудительную вентиляцию, следует устанавливать защиту, действующую на сигнал и отключение электродвигателя при повышении температуры или прекращении действия вентиляции.

В отличие от [1] в настоящее время рекомендуется вводить в работу защиту от перегрузок в любом случае, если она предусмотрена в терминале, поскольку она предотвращает перегрев и возможное возгорание кабелей.

7.2. Выполнение защиты двигателей от перегрузок на терминалах БМРЗ

В терминалах БМРЗ предусмотрено два варианта исполнения защиты двигателя от перегрузок:

- в виде токовой защиты от симметричных перегрузок;
- в виде тепловой защиты, основанной на программируемой тепловой модели двигателя.

К достоинствам защиты от симметричных перегрузок, выполняемой по максимальному фазному току, следует отнести её простоту и несложный способ расчета уставок. К недостаткам данной защиты следует отнести отсутствие учета температуры окружающей среды и температуры статорной обмотки от ранее полученного теплового импульса.

Исполнение защиты в виде тепловой модели сложнее, для расчета уставок может потребоваться запрос у производителей двигателей дополнительных данных. Достоинством такого исполнения защиты является учёт предыдущего нагрева и охлаждения двигателя, возможность учёта температуры окружающей среды (охлаждителя). При наличии в терминале входа для датчика измерения температуры окружающей среды рекомендуется использование такого датчика. Датчик необходимо установить в условиях окружающей среды, аналогичных тем, в которых установлен двигатель. К недостаткам тепловой модели можно отнести отсутствие возможности точного учёта погрешности измерения, отсутствие обобщенного опыта её применения, а также то, что существующие тепловые модели не учитывают отдельные индивидуальные особенности деталей электрических машин.

Действие защиты от симметричных перегрузок рекомендуется выполнять на отключение. Действие защиты на базе тепловой модели рекомендуется выполнять на сигнализацию. Решение о действии тепловой защиты на отключение двигателя должно приниматься совместно с технологическим персоналом и утверждаться

главным инженером. При принятии решения должны быть сопоставлены размеры материального ущерба при повреждении электродвигателя вследствие его неотключения и материальный ущерб вследствие нарушения технологического процесса при неправильном отключении электродвигателя.

7.3. Расчет токовой защиты от симметричных перегрузок электродвигателя

7.3.1. Защита от затянутого пуска и блокировки ротора

Защита от затянутого пуска и блокировки ротора является вспомогательным элементом тепловой защиты и осуществляет резервирование защиты от симметричных перегрузок.

Принцип действия защит состоит в сравнении максимального из фазных токов с уставкой защиты. При этом учитывается, сколько времени прошло с момента возрастания тока от нуля до 0,1 А (вторичных) – это признак пуска двигателя. Если с момента пуска прошло время большее уставки T_{Π} , то при превышении током уставки запускается защита от блокировки ротора. Если с момента пуска прошло времени меньше T_{Π} , запускается защита от затянутого пуска.

Защиты выполняются с независимыми характеристиками и работают каждая со своей выдержкой времени, но с общей уставкой по току срабатывания. Защиты выполнены с действием на отключение электродвигателя.

Ток срабатывания защит выбирается меньше пускового тока электродвигателя и определяется по формуле

$$I_{с.з.БР} = \frac{k_{\text{пуск}}}{1,2k_b} \cdot I_{\text{ном.дв}}, \quad (7.1)$$

где $k_{\text{пуск}}$ – кратность пускового тока электродвигателя; $k_b = 0,95$ – коэффициент возврата (уточняется в руководстве по эксплуатации на конкретное изделие); $I_{\text{ном.дв}}$ – номинальный ток двигателя, А.

Время срабатывания защиты от затянутого пуска принимают больше времени пуска (самозапуска) электродвигателя:

$$t_{с.з.ЗП} \geq (1,5 \div 2) \cdot t_{\Pi}. \quad (7.2)$$

Время срабатывания защиты от блокировки ротора $t_{с.з.БР}$ принимают большим из двух условий:

- условие согласования с временем срабатывания быстродействующих защит смежных двигателей из расчета, чтобы ток подпитки КЗ от рассматриваемого двигателя не приводил к его излишнему отключению, ориентировочно 1 – 2 с;
- условие согласования с временем выхода двигателя на нормальный режим после кратковременных снижений напряжения питающей сети, ориентировочно 0,2–0,4 времени пуска двигателя.

7.3.2. Защита от перегрузки с действием на отключение двигателя

В терминалах БМРЗ защита от перегрузки выполняется применением третьей степени МТЗ. Защита выполняется с инверсной характеристикой, она должна соответствовать перегрузочной характеристике двигателя.

Время срабатывания защиты рассчитывает сам терминал, используя выражение

$$t_{с.з.ЗП} = \frac{A}{k_*^2 - 1}, \quad (7.3)$$

где A – значение тепловой постоянной времени охлаждения статора для защищаемого электродвигателя. Значение A может находиться в диапазоне от 60 до 300 с, в зависимости от типа защищаемого двигателя; k_* – кратность тока статорной обмотки двигателя по отношению к номинальному току электродвигателя.

Если производитель не предоставил значение тепловой постоянной времени охлаждения статора на защищаемый электродвигатель, в дальнейших расчетах можно использовать значение минимально допустимой постоянной времени охлаждения статора.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства изготавливают в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52776–2007 (введен 1 января 2008 г.), согласно которым трехфазные двигатели переменного тока мощностью не менее 0,55 кВт с косвенным охлаждением обмоток статора должны выдерживать ток, равный 1,5 номинального тока, в течение 2 мин. Серийные двигатели общего назначения отечественного производства, изготовленные до 1 июля 2010 г., как правило, соответствуют требованиям ГОСТ 183–74 [12]. В ГОСТ 183–74 также указано приведенное выше требование.

Исходя из указанного требования, можно рассчитать допустимую постоянную времени охлаждения статора [5]:

$$A = t_{\text{доп}} \cdot (k_*^2 - 1) = 120 \cdot (1,5^2 - 1) = 150 \text{ с}, \quad (7.4)$$

где $t_{\text{доп}}$ – допустимое время работы при кратности тока k_* , с.

Значение тепловой постоянной A рассчитывается автоматически при вводе уставок в блок, исходя из значений уставок кратности тока и допустимого времени.

Принимая во внимание реальные диапазоны значений этих уставок (по кратности тока – от 1,1 до 10,00; по времени – от 1,0 до 20,0 с) можно из выражения (7.4) найти значения уставок.

Например, если значение кратности тока, протекающего по статорной обмотке двигателя равна четырем, то время срабатывания защиты по (7.4) составит

$$\frac{150}{4^2 - 1} = 10 \text{ с}.$$

Если электродвигатель имеет тяжелые условия пуска, то защита от перегрузок выводится при пуске такой машины. При этом нужно понимать, что каждый пуск такого двигателя приводит к быстрому старению электрической изоляции двигателя и ремонтные работы по восстановлению электрической изоляции нужно проводить после ограниченного количества циклов включения такого электродвигателя.

7.3.3. Защита от перегрузки с действием на сигнал

Защита выполняется с независимой характеристикой и предназначена для применения на объектах с дежурным персоналом. Ток срабатывания защиты $I_{\text{с.з.}}$, А, определяется по формуле

$$I_{\text{с.з.СП}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot I_{\text{ном.дв}}, \quad (7.5)$$

где $k_{\text{отс}} = 1,05$ – коэффициент отстройки защиты от симметричных перегрузок, для электродвигателей с допустимой длительной перегрузкой 10% $k_{\text{отс}} = 1,1$; $k_{\text{в}} = 0,95$ – коэффициент возврата (уточняется в руководстве по эксплуатации на конкретное изделие).

Если двигатель не подвержен технологическим перегрузкам, время срабатывания защиты выбирается больше времени пуска электродвигателя из диапазона 10–20 с. Если двигатель подвержен перегрузкам, время выбирается

большим, чем допустимое время технологической перегрузки, как правило, от 10 до 180 с и также отстраивается от времени пуска электродвигателя.

7.4. Расчет тепловой защиты электродвигателя

Тепловая защита позволяет продлить ресурс работы изоляции статорной обмотки и предотвратить активное старение и повреждения изоляции при тепловой перегрузке, ограничить перегрев двигателя при протекании сверхтоков в обмотке статора.

Часто в высоковольтных электродвигателях устанавливаются датчики температуры в обмотки и активное железо статора. Это позволяет выполнить тепловую защиту электродвигателя путем непосредственного измерения температуры. Такая защита эффективна и имеет высокую точность измерения температуры при установившихся тепловых переходных процессах. Для высоковольтных двигателей с большой толщиной изоляции и большими постоянными времени нагрева эта защита небыстродействующая. Поэтому для выполнения быстродействующей защиты двигателя от тепловых перегрузок (перегрева) следует использовать тепловую защиту на базе тепловой модели (ТМ) двигателя.

При нагреве двигателя критической величиной является температура, которую может выдержать его изоляция. При различных значениях температуры окружающей среды двигатель может допускать большую или меньшую величину допустимой тепловой перегрузки. Поэтому для более точного выполнения защиты рекомендуется использование в терминале датчика температуры окружающей среды. Отметим, что ГОСТ Р 52776–2007 допускает увеличение предельно допустимого значения перегрева не более чем на 40°C (при температуре окружающей среды 0°C; значение зависит от класса изоляции, см. ГОСТ Р 52776–2007, ГОСТ 8865–93).

Рассмотрим работу тепловой модели двигателя. Относительный перегрев статорной обмотки электродвигателя $E_{\text{нагр, \%}}$ за временной интервал работы (нагрева) электродвигателя $t_{\text{нагр}}$ определяет микропроцессорная система терминала по формуле

$$E_{\text{нагр, \%}} = 100\% \cdot \left(\frac{I_{\text{экв}}}{I_{\text{ТМ}}} \right)^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{нагр}}}{T_{\text{e1}}}} \right) + E_{0, \%} e^{-\frac{t_{\text{нагр}}}{T_{\text{e1}}}}, \quad (7.6)$$

где $I_{\text{экв}}$ – эквивалентный ток электродвигателя, А; $I_{\text{ТМ}}$ – расчетный ток тепловой модели, (выбирается равным номинальному току двигателя, в руководствах по эксплуатации терминалов БМРЗ назван штатным током), А; $t_{\text{нагр}}$ – время нагрева, мин; T_{e1} – постоянная времени нагрева электродвигателя, мин; $E_{0, \%}$ – относительная величина перегрева двигателя на момент начала процесса нагрева, %.

В выражение (7.6) микропроцессорная система терминала подставляет измеренное значение эквивалентного тока $I_{\text{экв}}$ и постоянную времени нагрева $t_{\text{нагр}}$ в минутах. Таким образом, определяется текущее относительное значение температуры статорной обмотки электродвигателя и, если расчётное относительное значение температуры превышает относительное значение параметра срабатывания защиты, срабатывает защита от тепловой перегрузки.

Значение эквивалентного тока $I_{\text{экв}}$, А, рассчитывается по формуле

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{I_{\text{фазн. макс}}^2 + K_2 \cdot I_2^2}, \quad (7.7)$$

где $I_{\text{фазн. макс}}$ – значение максимального из фазных токов, А; K_2 – коэффициент учета тока обратной последовательности, учитывает тепловое воздействие тока обратной последовательности; I_2 – значение тока обратной последовательности, А.

Для использования ТМ в БМРЗ–ДА и БМРЗ–ДД необходимо наличие трансфор-

маторов тока в каждой фазе двигателя. В БМРЗ–УЗД и БМРЗ–ДВА предусмотрена возможность вычисления тока I_2 из токов двух фаз и тока $3I_0$, таким образом, ТМ в этих терминалах можно использовать при наличии трансформаторов тока в двух фазах двигателя. Коэффициент K_2 в БМРЗ–УЗД назначаемый для электродвигателей отечественного производства рекомендуется принять равным четырем, для зарубежных – равным шести.

Процесс охлаждения остановленного электродвигателя $E_{\text{охл, \%}}$, % аппроксимируется формулой

$$E_{\text{охл, \%}} = E_{0, \%} e^{-\frac{t_{\text{охл}}}{T_{e2}}}, \quad (7.8)$$

где $E_{0, \%}$ – значение перегрева двигателя на момент начала процесса охлаждения, %; T_{e2} – постоянная времени охлаждения электродвигателя, мин; $t_{\text{охл}}$ – время охлаждения, мин.

Возможность задания постоянных времени нагрева и охлаждения позволяет учитывать условия охлаждения остановленного двигателя (например, если используется вентилятор, закрепленный на валу).

Характеристика работы защиты представлена на рис. 7.1.

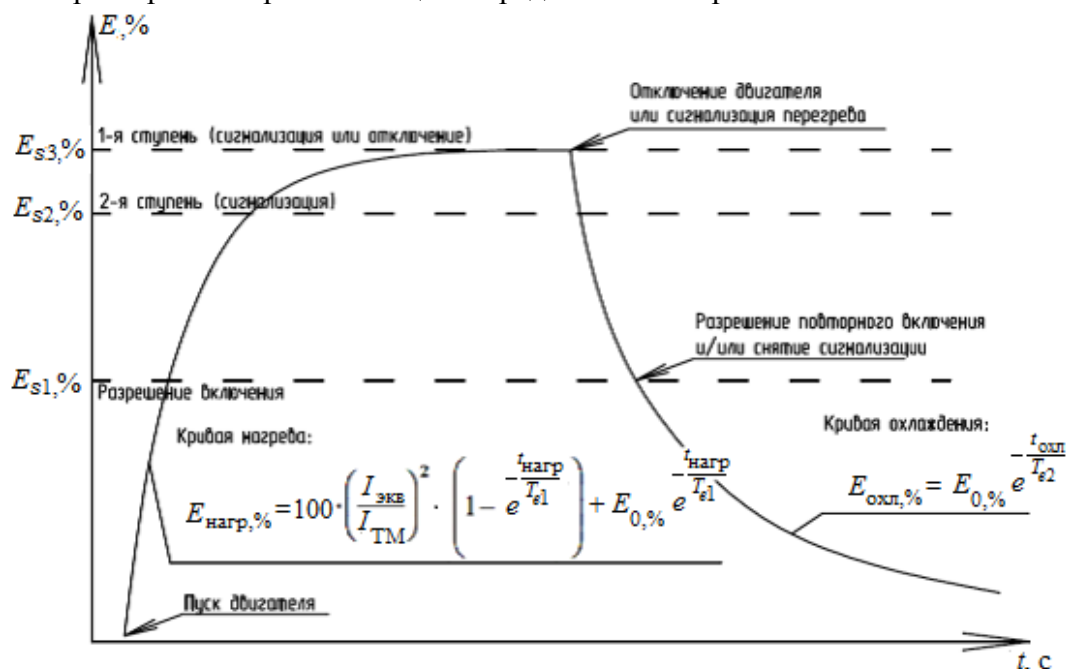


Рис. 7.1. Характеристика работы тепловой модели электродвигателя

На объектах с персоналом защиту рекомендуется выполнять двумя ступенями с действием на сигнализацию и отключение. На объектах без персонала защиту рекомендуется выполнять одной ступенью с действием на отключение.

Для настройки защиты используются следующие характеристики электродвигателя:

$I_{\text{ТМ}}$ – расчетный ток тепловой модели (выбирается равным номинальному току двигателя, в руководствах по эксплуатации терминалов БМРЗ назван штатным током);

$I_{\text{ТМ}}$ – расчетный;

T_{e1} – постоянная времени нагрева электродвигателя (задаётся заводом-изготовителем или определяется способами, приведенными в п. 7.5), мин;

T_{e2} – постоянная времени охлаждения электродвигателя (задаётся заводом-

изготовителем или определяется способами, приведенными в п. 7.5), мин;

E_{S1} – параметр разрешения включения электродвигателя после срабатывания защиты, %;

E_{S2} – параметр пуска защиты на сигнализацию (вторая ступень), %;

E_{S3} – параметр пуска защиты на сигнализацию или отключение (первая ступень), %.

Определим значения T_{e1} , T_{e2} двигателя из его предельной допустимой нагрузочной характеристики. Рекомендуется данные величины определять в два этапа. На этапе проектирования выполняется теоретический расчёт. На этапе пуско-наладочных работ постоянные времени нагрева и охлаждения уточняются экспериментально.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства изготавливают в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52776–2007 (введен 1 января 2008 г.), согласно которым трехфазные двигатели переменного тока мощностью не менее 0,55 кВт с косвенным охлаждением обмоток статора должны выдерживать ток, равный 1,5 номинального тока, в течение 2 мин.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства, изготовленные до 1 июля 2010г., как правило, соответствуют требованиям ГОСТ 183–74 [12], требования к допустимой перегрузке двигателей в котором совпадают с ГОСТ Р 52776–2007.

Исходя из указанных требований, рассчитываем минимально допустимую постоянную времени охлаждения статора [5]:

$$A = t_{\text{доп}} \cdot (k_*^2 - 1) = 120 \cdot (1,5^2 - 1) = 150 \text{ с}, \quad (7.9)$$

где A – тепловая постоянная времени охлаждения статорной обмотки, определяемая конструкцией электродвигателя, с.

$t_{\text{доп}}$ – допустимое время работы при кратности тока k_* , с.

Определим минимально допустимую постоянную времени нагрева электродвигателя T_{e1} , мин, по формуле [13]:

$$\frac{A}{T_{e1} \cdot 60} = \ln \left(\frac{k_*^2 - 1}{k_*^2 - k_{\text{max}}^2} \right), \quad (7.10)$$

$$T_{e1} = \frac{A}{60 \cdot \ln \left(\frac{k_*^2 - 1}{k_*^2 - k_{\text{max}}^2} \right)}, \quad (7.11)$$

где k_{max} – предельная кратность тока перегрева двигателя (относительно нагрева двигателя номинальным током), определяется классом изоляции двигателя (табл. 7.1.). Таблица составлена для работы двигателя при температуре окружающей среды 40° С на основе ГОСТ 8865–93; при составлении таблицы учитывалось, что при токах не превышающих номинальный ток двигателя, изоляция обычно используется по более низкому температурному классу, например F с использованием по классу В, при других условиях работы машины требуется дополнительный расчет.

Таблица 7.1

Предельно допустимая температура для различных классов изоляции

Класс изоляции	А	Е (исп. по А)	В (исп. по Е)	Ф (исп. по В)	Н (исп. по F)
Предельно допустимая температура перегрева, °С	65	80	90	115	140
k_{max}	—	1,231	1,125	1,278	1,217

Постоянную времени охлаждения T_{e2} выбирают пропорционально эффективности работы системы охлаждения на остановленном электродвигателе. При наличии системы охлаждения, эффективность которой не зависит от скорости вращения вала двигателя (нет вентилятора внутри двигателя и т.п.), величина равна постоянной времени нагрева. Если двигатель охлаждается вентилятором, закрепленным на валу, T_{e2} , как правило, в два – четыре раза больше постоянной времени нагрева.

Для более точной настройки тепловой защиты рекомендуется при проведении пусконаладочных работ экспериментальное определение реальных постоянных времени нагрева и охлаждения электродвигателя.

Для расчета параметра E_{S1} необходимо на основе времени пуска и пускового тока определить расчётное относительное значение нагрева двигателя за время пуска, $E_{\text{пуск}}$, % :

$$E_{\text{пуск}} = k_{\text{пуск}}^2 \cdot (1 - e^{-\frac{t_n}{T_{e1}}}) \cdot 100\%, \quad (7.12)$$

где $k_{\text{пуск}}$ – кратность пускового тока машины (как правило, от трех до восьми $I_{\text{ном.дв}}$); $E_{\text{пуск}}$ – относительный расчётный нагрев двигателя за время пуска, %.

Определяем расчётное допустимое значение относительного перегрева E_{S1} , %, при котором разрешается пуск машины:

$$E_{S1} \leq 100\% - E_{\text{пуск}} \%. \quad (7.13)$$

Параметры пуска тепловой защиты электродвигателя на сигнализацию и отключение E_{S2} и E_{S3} , %, определяем по формуле:

$$E_{S2,3} = 100\% \cdot \left(\frac{I_{\text{дв}}}{I_{\text{дв.ном}}} \right)^2, \quad (7.14)$$

где 100% – относительная температура нагрева двигателя, когда по его статорным обмоткам протекает номинальный ток; $I_{\text{дв}}$ – ток, потребляемый электродвигателем, А; $I_{\text{дв.ном}}$ – номинальное значение тока электродвигателя, А;

– для первой ступени (сигнализация или отключение)

$$\frac{I_{\text{дв}}}{I_{\text{ном.дв}}} = 1,10, \text{ соответственно } E_{S2} = 100\% \cdot (1,10)^2 \approx 121\%,$$

значение 1,1 выбрано, исходя из допустимой возможной длительной работы электродвигателя в сети с напряжением, составляющим 90 % номинального (ГОСТ 13109–97);

– для второй ступени (сигнализация):

$$\frac{I_{\text{дв}}}{I_{\text{ном.дв}}} = 0,9, \text{ соответственно } E_{S2} = 100\% \cdot (0,9)^2 \approx 81\%,$$

значение 0,9 выбрано, исходя из возможной длительной работы двигателя в сети с напряжением, составляющим 110 % номинального (ГОСТ 13109–97).

Для обеспечения более точной работы тепловой защиты электродвигателя рекомендуется выполнять измерение температуры окружающей среды с помощью датчика температуры, подключенного к соответствующему входу терминала (при его наличии).

7.5. Экспериментальное определение постоянных времени тепловой модели двигателя

Тепловая модель включает в себя две постоянных времени: постоянную времени нагрева T_{e1} и постоянную времени охлаждения T_{e2} , а также уставку по номинальному (штатному) току двигателя $I_{\text{ТМ}}$.

Постоянные времени определяются экспериментально при оценке скорости нагрева и охлаждения двигателя. При наличии встроенных тепловых датчиков двигателя температура определяется по ним. При отсутствии встроенных датчиков температура может быть определена косвенным образом по температуре поверхности двигателя. Желательно, чтобы при проведении эксперимента температура окружающей среды оставалась постоянной. Рекомендуется всегда проводить экспериментальное определение параметров тепловой модели при проведении пусконаладочных работ.

Экспериментальное определение уставок тепловой модели осуществляется в следующем порядке:

а) электродвигатель останавливается на промежуток времени, необходимый для полного остывания, как внешней поверхности двигателя, так и его внутренних частей (зависит от конструкции двигателя, порядка 10 – 20 ч при отсутствии независимого охлаждения). При наличии независимого охлаждения двигателя, последнее должно быть включено на остановленном двигателе, в этом случае время охлаждения двигателя существенно сокращается (1 – 2 ч). Производится измерение температуры охлажденного двигателя, после чего двигатель запускается;

б) снимается график (рис. 7.2) нагрева электродвигателя с интервалом времени – 60 с. Нагрузка двигателя – постоянная, не менее 50% от номинальной. Выполняется 120 измерений или больше, если температура двигателя не достигла установившегося значения;

в) по полученному графику определяется установившееся значение температуры электродвигателя при постоянной нагрузке;

г) двигатель останавливается и снимается график (рис. 7.3) охлаждения остановленного двигателя. При наличии независимых устройств охлаждения двигателя они должны находиться в таком состоянии (включены или отключены), в каком они будут находиться при остановленном двигателе в процессе эксплуатации;

д) по полученному графику определяется установившееся значение температуры остановленного электродвигателя (должна соответствовать температуре до пуска);

е) разность температур двигателя через 60 с после запуска из холодного состояния ($t_{\text{заверш.пуск}}$) и двигателя при постоянной нагрузке ($t_{\text{пост.нагр}}$) принимается за $\Delta t_{\text{нагр}}$. Постоянная времени нагрева определяется как время от момента измерения температуры $t_{\text{заверш.пуск}}$ °С, до момента достижения температурой значения:

$$t_{\text{заверш.пуск}} + \Delta t_{\text{нагр}} \cdot 0,632, \quad (7.15)$$

где, $t_{\text{заверш.пуск}}$ – температура двигателя через 60 с после запуска из холодного состояния, °С;

$\Delta t_{\text{нагр}} = t_{\text{пост.}} - t_{\text{заверш.пуск}}$ – разность температуры двигателя при постоянной нагрузке и температуры двигателя после завершения пуска, °С;

ж) разность температур двигателя при постоянной нагрузке ($t_{\text{пост.нагр.}}$) и полностью остывшего после включения на постоянную нагрузку двигателя ($t_{\text{полн.ост}}$) принимается за $\Delta t_{\text{ост.}}$. Постоянная времени охлаждения T_{e2} , °С, определяется как время от момента отключения двигателя до достижения температурой значения:

$$t_{\text{полн.ост}} + \Delta t_{\text{ост}} \cdot 0,368, \quad (7.16)$$

где $t_{\text{полн.ост}}$ – температура полностью остывшего после включения на постоянную нагрузку двигателя, °С; $\Delta t_{\text{ост}} = t_{\text{пост.нагр}} - t_{\text{полн.ост}}$ – разница температур двигателя при постоянной нагрузке и полностью остывшего двигателя, °С.

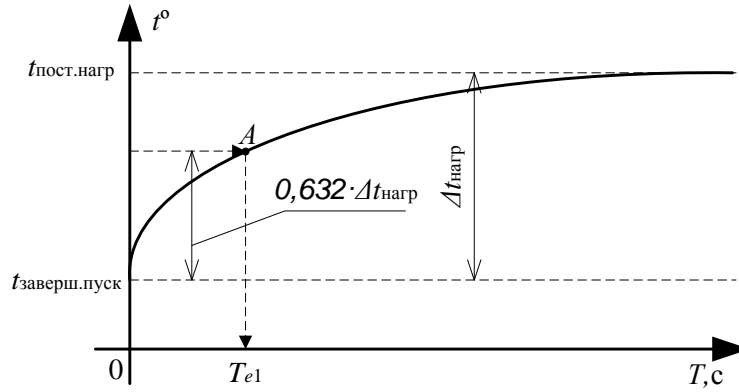


Рис. 7.2. Определение постоянной времени нагрева T_{e1} по графику нагрева двигателя

Как правило, постоянная времени охлаждения в два – шесть раз больше постоянной времени нагрева;

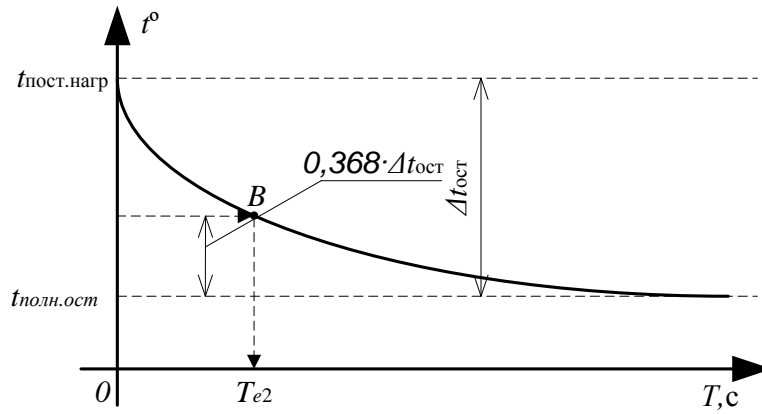


Рис. 7.3. Определение постоянной времени охлаждения T_{e2} по графику охлаждения двигателя

з) ток тепловой модели режима I_{TM} должен быть равен номинальному току двигателя во вторичных значениях;

и) после задания в терминале постоянных времени T_{e1} и T_{e2} , а также тока тепловой модели I_{TM} необходима проверка правильности работы тепловой модели. Проверка осуществляется аналогично пунктам а – д, при этом кроме текущей температуры двигателя каждые 60 с фиксируется значение перегрева, индицируемое на дисплее БМРЗ. После завершения эксперимента на основе полученных значений строится график процессов нагрева и охлаждения, где установившееся значение перегрева, индицируемое БМРЗ, приравнивается к установившейся температуре двигателя при постоянной нагрузке. По графику проводится определение погрешности тепловой модели в каждой точке измерения по формуле

$$\Delta t = \frac{t_{TM,\%} \cdot t_{\text{двиг.уст}}}{t_{TM,\text{уст}}} - t_{\text{двиг}}, \quad (7.17)$$

где $t_{TM,\%}$ – текущее значение перегрева, индицируемое БМРЗ, %; $t_{\text{двиг.уст}}$ – установившееся значение повышения температуры двигателя относительно температуры полностью остывшего двигателя, °С; $t_{TM,\text{уст}}$ – установившееся значение перегрева,

индицируемое БМРЗ, %; $t_{\text{двиг}}$ – текущее значение повышения температуры двигателя относительно температуры полностью остывшего двигателя, °С.

Если погрешность не превышает $\pm 5^\circ\text{C}$, настройка защиты по тепловой модели считается успешной;

к) на точность настройки тепловой модели существенное влияние оказывают условия охлаждения двигателя (изменение температуры окружающей среды, наличие ветра при наружной установке и т.п.). В случае, если погрешность превышает указанное допустимое значение, необходимо повторить шаги **а** – **и**. При невозможности настройки модели путем повторного эксперимента, а также при существенном отличии полученных характеристик нагрева и охлаждения двигателя от представленных на рис. 7.2 и 7.3, целесообразно направить экспериментальные данные для их анализа в ООО «НТЦ «Механотроника».

7.6. Примеры расчета защит двигателя от перегрузок

Пример 7.1. Расчет защиты от симметричных перегрузок АД серии А4.

Исходные данные для расчета:

номинальная 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
 КПД, η 0,975
 кратность пускового тока, $k_{\text{пуск}}$ 5,5
 время пуска $t_{\text{пуск}}$ (по проекту)..... 5 с

Пуск АД прямой от напряжения питающей сети.

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

АД соответствует требованиям ГОСТ 183–74.

Определяем первичный ток срабатывания защиты от перегрузок при затянувшемся пуске и при блокировке ротора (7.1):

$$I_{\text{с.з.БР}} = \frac{k_{\text{пуск}}}{1,2 \cdot k_{\text{в}}} I_{\text{ном.дв}} = \frac{5,5}{1,2 \cdot 0,95} \cdot 57 = 275 \text{ А} = 4,82 I_{\text{ном.дв}}.$$

Время срабатывания защиты от затянувшегося пуска принимаем по (7.2):

$$t_{\text{с.з.ЗП}} \geq 1,5 \cdot t_{\text{п}} = 1,5 \cdot 5 = 7,5 \text{ с.}$$

Время срабатывания защиты от блокировки ротора принимаем

$$t_{\text{с.з.БР}} = 0,4 \cdot 5 = 2 \text{ с.}$$

Защита от перегрузки с действием на отключение электродвигателя выполняется с инверсной характеристикой. Ток срабатывания принимается равным номинальному току электродвигателя 57 А.

Время срабатывания защиты рассчитывается в БМРЗ автоматически по формуле (7.3) при $A = 150$ с:

$$t_{\text{с.з.СП}} = \frac{150}{k_*^2 - 1},$$

для этого в блок вводим уставку кратности тока, равной четырем, уставку по времени, равной 10 с.

Защита от перегрузки с действием на сигнал выполняем с независимой характеристикой. Первичный ток срабатывания определяем по формуле (7.5):

$$I_{с.з.СП} = \frac{1,1}{k_B} \cdot I_{ном.дв} = \frac{1,1}{0,95} \cdot 57 = 66 \text{ А}.$$

АД не подвержен технологическим перегрузкам, а расчетное время его пуска составляет $t_{пуск} = 5 \text{ с}$. Принимаем время срабатывания ступени защиты на сигнализацию $t_{с.з.СП} = 10 \text{ с}$.

Пример 7.2. Расчет защиты от перегрузок АД серии А4 с помощью тепловой модели.

Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{ном.дв}$	800 кВт
номинальный ток двигателя, $I_{ном.дв}$	57 А
напряжение, $U_{ном.дв}$	10 кВ
кратность пускового тока, $k_{пуск}$	5,5
время пуска $t_{пуск}$ (по проекту)	10 с
кратность пускового момента	1,9
номинальная частота вращения двигателя, $\omega_{ном}$	1000 об/мин

АД соответствует требованиям ГОСТ Р 52776–2007.

Пуск АД прямой от напряжения питающей сети.

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

Класс изоляции двигателя: F с использованием по классу В.

Ток тепловой модели (штатный, в РЭ на терминалы БМРЗ) выбираем равным номинальному току двигателя:

$$I_{ТМ} = I_{ном.дв} = 57 \text{ А}.$$

Минимально допустимая постоянная времени охлаждения статора двигателя (7.10):

$$A = t_{доп} \cdot (k_*^2 - 1) = 120 \cdot (1,5^2 - 1) = 150 \text{ с},$$

где A – тепловая постоянная времени охлаждения статорной обмотки, определяемая конструкцией электродвигателя, с; $t_{доп}$ – допустимое время работы двигателя при перегрузке k_* , поскольку двигатель соответствует ГОСТ Р 52776–2007, принимаем $t_{доп} = 120 \text{ с}$, $k_i = 1,5$.

Определяем минимально допустимую постоянную времени нагрева электродвигателя T_{e1} , мин, с учётом его соответствия ГОСТ Р 52776–2007 (7.12):

$$T_{e1} = \frac{A}{60 \cdot \ln \left(\frac{k_*^2 - 1}{k_*^2 - k_{\max}^2} \right)} = \frac{150}{60 \cdot \ln \left(\frac{1,5^2 - 1}{1,5^2 - 1,278} \right)} \approx 9,94 \text{ мин},$$

где k_{\max} – предельная кратность перегрева, определяемая классом изоляции двигателя при изоляции класса F с использованием по классу В, составляет 1,278 (табл. 7.1).

Вентилятор охлаждения закреплен на валу двигателя. Принимаем постоянную охлаждения двигателя:

$$T_{e2} = 4 \cdot T_{e1} \approx 40 \text{ мин}.$$

Определяем расчётный нагрев в процессе пуска двигателя (7.13):

$$E_{\text{пуск}} = k_{\text{пуск}}^2 \cdot (1 - e^{-\frac{t_n}{T_{e1}}}) \cdot 100 = 5,5^2 \cdot (1 - e^{-\frac{10}{596,4}}) \approx 50,3\%.$$

Исходя из допустимой температуры двигателя, определяем максимально допустимое значение уставки E_{S1} :

$$E_{S1} \leq 100\% - E_{\text{пуск}} = 100\% - 50,3\% = 49,7\%.$$

Принимаем

$$E_{S1} = 49\%.$$

Принимаем

$$E_{S2} = 81\% ,$$

$$E_{S3} = 121\% .$$

Характеристика работы тепловой модели приведена на рис. 7.4.

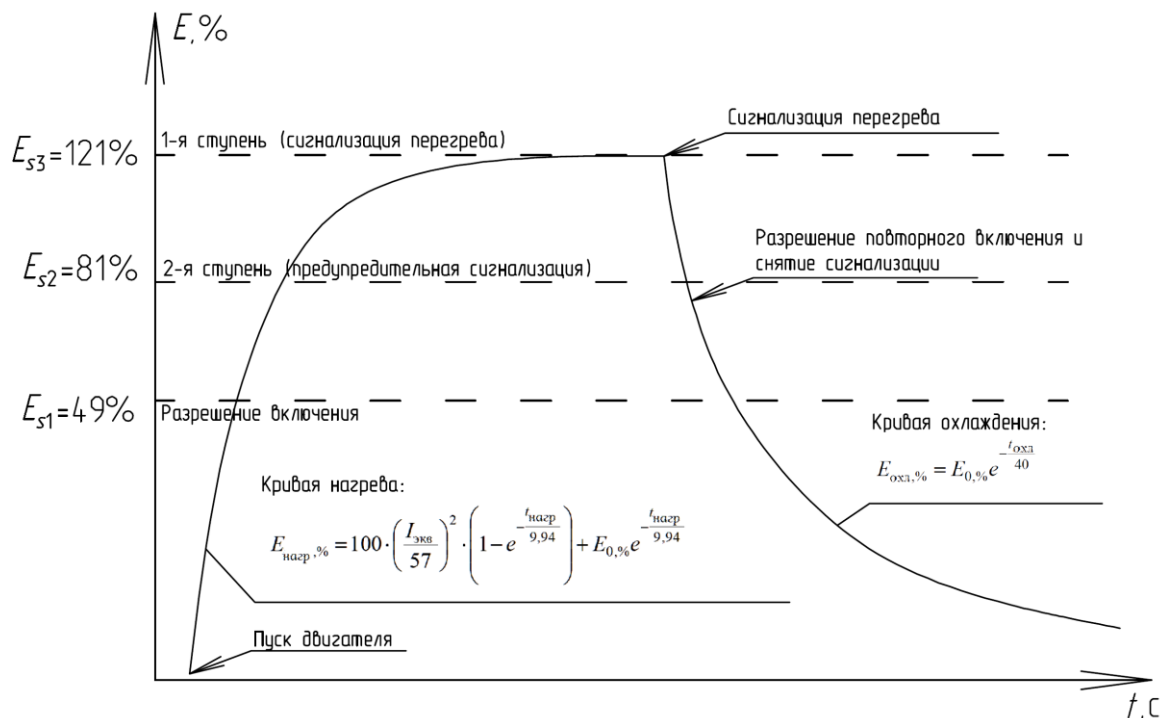


Рис. 7.4 Характеристика работы тепловой модели двигателя серии А4 мощностью 800 кВт

8. Расчет защиты электродвигателя с возбуждением от асинхронного хода

Традиционный способ выполнения защиты основан на фиксации периодических колебаний тока статора. Защита выполняется на основе пускового органа максимального тока с независимой характеристикой с задержкой на отпускание защиты.

Ток срабатывания защиты принимается по выражению

$$I_{\text{с.з.ЗАР}} = \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{в}}} \cdot I_{\text{ном.дв}} , \quad (8.1)$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2–1,3; $k_{\text{в}} = 0,95$ — коэффициент возврата (уточняется в руководстве по эксплуатации на конкретное изделие).

Время срабатывания ступени защиты, действующей на перевод СД в

асинхронный режим без возбуждения и разгрузку механизма, принимается на ступень селективности больше времени отключения КЗ в сети, сопровождающихся током подпитки от двигателя большим, чем ток срабатывания, выбранный по (8.1), но не менее 1,5 с.

Время срабатывания ступени защиты, действующей на отключение, принимается по условию

$$t_{с.з.ЗАР} \geq k_n \cdot t_{пуск.дв}, \quad (8.2)$$

где k_n – коэффициент надежности, принимается равным 1,2–1,3; $t_{пуск.дв}$ – длительность пуска (самозапуска) СД, с.

Время срабатывания таймера логической схемы, обеспечивающего устойчивое действие защиты при колебаниях тока статора (или время возврата токового органа) принято равным 1,5 с. При этом, отсчитанные выдержки времени сохраняются в течение 1,5 с после возврата защиты и если вновь будет превышена уставка по току, отсчет выдержек будет начинаться от сохраненного значения.

Рассмотренная защита позволяет просто и надежно защитить СД при асинхронном ходе с возбуждением.

9. Расчет защиты от асинхронного режима при потере синхронным двигателем возбуждения

Защита от асинхронного режима с потерей возбуждения в БМРЗ выполнена с использованием реле сопротивления (как в защитах генератора) [14].

При нормальном режиме работы (с опережающим $\cos \varphi = 0,9$) вектор полного сопротивления прямой последовательности на выводах питания двигателя расположен вблизи оси R в I и IV квадрантах комплексной плоскости Z (рис. 9.1). При потере возбуждения двигатель начинает потреблять из сети значительную реактивную мощность, при этом продолжает потреблять активную мощность. Вектор полного сопротивления смещается против часовой стрелки и попадает в область круговой характеристики реле сопротивления, опирающейся на точки $Z_{см}$ и Z_p , то есть в область срабатывания реле.

Согласно экспериментальным исследованиям [15], сопротивление на выводах синхронной машины при потере возбуждения может изменяться в диапазоне от $(0,3–0,5) x_d''$ до $(1,1–1,4) x_d$, где x_d'' – сверхпереходное сопротивление СД, Ом, x_d – индуктивное сопротивление прямой последовательности СД, Ом.

Поэтому характеристика срабатывания защиты, выполненная в виде окружности, расположенной на комплексной плоскости симметрично относительно оси jX (рис. 9.1), проходит через точки с координатами:

$$(0,3 \dots 0,5) x_d'' \text{ и } (1,1 \dots 1,4) x_d.$$

Положительным направлением токов для двигателя считается направление «в двигатель» (для синхронного генератора – «из генератора»), характеристика срабатывания защиты находится в верхней полуплоскости.



Рис. 9.1. Характеристика защиты электродвигателя от потери возбуждения

Если значения сопротивлений двигателя заданы в относительных единицах, то для их перевода в именованные единицы можно использовать следующие выражения:

$$x_d'' = \frac{x_d''(\%) \cdot U_{\text{ном.дв}}^2}{100\% \cdot S_{\text{ном.дв}}}, \quad (9.1)$$

$$x_d = \frac{x_d(\%) \cdot U_{\text{ном.дв}}^2}{100\% \cdot S_{\text{ном.дв}}}, \quad (9.2)$$

где $U_{\text{ном.дв}}$ – номинальное напряжение двигателя, кВ; $S_{\text{ном.дв}}$ – номинальная полная мощность двигателя, МВ·А; $x_d''(\%)$ – сверхпереходное индуктивное сопротивление двигателя, %; $x_d(\%)$ – индуктивное сопротивление прямой последовательности, %.

Для предотвращения ложного срабатывания реле в режиме асинхронного хода и качаний, когда вектор сопротивления двигателя может кратковременно попадать в область срабатывания реле, время срабатывания защиты принимают из диапазона от 1 до 2 с.

Работа защит СД от асинхронного режима автоматически блокируются при формировании терминалом сигнала включения автомата гашения поля (АГП), а также и при наличии внешнего сигнала на включение АГП (например, при управлении гашением поля в ручном режиме).

К достоинствам такой защиты следует отнести правильное выявление потери возбуждения и простота расчёта уставок, а к недостаткам – зависимость от исправности измерительных цепей напряжения. Защита реализована в БМРЗ–УЗД.

Пример 1. Расчет защиты от потери возбуждения электродвигателя СТД–4000–2.

Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{\text{ном.дв}}$	4000 кВт
номинальная мощность на валу двигателя, $S_{\text{ном.дв}}$	4560 кВт
напряжение, $U_{\text{ном.дв}}$	10 кВ
сверхпереходное индуктивное сопротивление двигателя, x_d''	14,29%

индуктивное сопротивление двигателя, x_d 181,5%

Переведем значения сверхпереходного и установившегося сопротивлений двигателя в именованные единицы по (9.1) и (9.2):

$$x_d'' = \frac{x_d''(\%) \cdot U_{\text{ном.дв}}^2}{100\% \cdot S_{\text{ном.дв}}} = \frac{14,29\% \cdot 10^2}{100\% \cdot 4,56} = 3,13 \text{ Ом},$$

$$x_d = \frac{x_d(\%) \cdot U_{\text{ном.дв}}^2}{100\% \cdot S_{\text{ном.дв}}} = \frac{185,1\% \cdot 10^2}{100\% \cdot 4,56} = 40,6 \text{ Ом}.$$

Выдержку времени защиты принимаем 2 с. По результатам расчетов строим характеристику работы защиты (рис. 9.2).



Рис. 9.2 Характеристика защиты электродвигателя СТД–4000–2 от потери возбуждения

10. Расчет уставок устройства резервирования при отказе выключателя

Функция резервирования при отказе выключателя (УРОВ) предназначена для отключения смежных выключателей электрической сети при отказе выключателя электродвигателя. ПУЭ не требует применения УРОВ для электроустановок 6 – 10 кВ [1]. Тем не менее при использовании терминалов микропроцессорной релейной защиты применение УРОВ следует рекомендовать, поскольку небольшие затраты на организацию такой схемы позволяют минимизировать повреждения распределительного устройства в случае отказа выключателя электродвигателя.

Функция УРОВ терминала БМРЗ выполняет контроль тока в защищаемой цепи после сигнала отключения выключателя. При отключении двигателя выключателем УРОВ должен зафиксировать значение тока ниже значения уставки УРОВ (при исправном выключателе). Если после выдачи сигнала на отключение выключателя терминал продолжает контролировать ток на отключаемом присоединении значения больше значения уставки УРОВ, то с выдержкой времени формируется выходной сигнал «УРОВ_д».

Ток пуска УРОВ $I_{\text{уров}}$ выбирают из диапазона $0,05 - 0,20 I_{\text{ном.дв}}$.

Исходя из вышеизложенного, в качестве уставки по току пуска УРОВ может быть рекомендовано значение из диапазона от 0,05 до 0,1 $I_{\text{ном.дв}}$.

Время задержки формирования выходного сигнала «УРОВ_д» при срабатывании защит, действующих на отключение, определяется из формулы [14]:

$$t_{\text{уров}} = t_{\text{вык}} + t_{\text{воз. РЗ}} + t_{\text{ош. РВ}} + t_{\text{зап}}, \quad (10.1)$$

где $t_{\text{вык}}$ – время отключения выключателя (как правило, от 0,05 до 0,1с); $t_{\text{воз. РЗ}}$ – время, необходимое для возврата РЗ, пускающей УРОВ, (для терминала БМРЗ – 0,01 с); $t_{\text{ош. РВ}}$ – время допустимой погрешности реле времени УРОВ в сторону ускорения действия (для терминала БМРЗ – 0,025 с при уставках от 0,05 до 1 с); $t_{\text{зап}}$ – запас по времени (как правило, 0,1 с).

Рекомендуемое значение $t_{\text{уров}} = 0,3 \dots 0,5$ с.

11. Расчет минимальной токовой защиты электродвигателя

Минимальная токовая защита является технологической защитой и предназначена для выявления ненормального режима работы при аварийном сбросе нагрузки на валу электродвигателя. Ток срабатывания защиты выбирается из условий минимально возможной нагрузки электродвигателя во всех технологических режимах его работы при проведении пусконаладочных работ и по согласованию с технологическим персоналом. Защита выполняется с действием на сигнализацию и с регулируемым значением тока срабатывания $I_{\text{с.з.}}$, выбираемым из диапазона от 0,2 до 0,6 $I_{\text{ном.дв}}$.

Время срабатывания защиты регулируется от 2 до 5 с.

12. Защита от колебаний нагрузки

Защита от колебаний нагрузки (ЗКН) является технологической защитой и предназначена для выявления колебаний нагрузки компрессорных или вентиляторных установок (помпажа).

Принцип действия защиты основан на выявлении колебаний активной мощности синхронного двигателя с периодом от 2 до 8 с и амплитудой, превышающей значение $A_{\text{кол}}$ – минимальной амплитуды колебаний активной мощности синхронного двигателя.

ЗКН имеет три ступени. Пуск ступеней ЗКН производится при фиксации первого колебания активной мощности с амплитудой, превышающей $A_{\text{кол}}$. Возврат ступени защиты в исходное состояние производится в том случае, если очередное колебание активной мощности, превышающее заданную уставку, не зафиксировано в течение 10 с.

Алгоритм работы защиты может быть разделен на шесть различных режимов. Первый режим соответствует нормальной работе двигателя с постоянной нагрузкой. В нем выявляется первое колебание нагрузки (пуск первой ступени ЗКН), которое, возможно, является началом помпажных колебаний. Во втором режиме защита либо выявляет наличие колебания нагрузки и формирует команду на срабатывание 1-й ступени защиты от колебаний нагрузки (срабатывает реле ЗКН1), либо не выявляет колебания нагрузки и тогда возвращается к первому режиму. Третий режим возникает в том случае, если во втором режиме было выявлено колебание нагрузки (произошло срабатывание ЗКН 1). В нем защита ожидает заданное время (10 с), пока в системе установится новый установившийся режим после срабатывания ЗКН1.

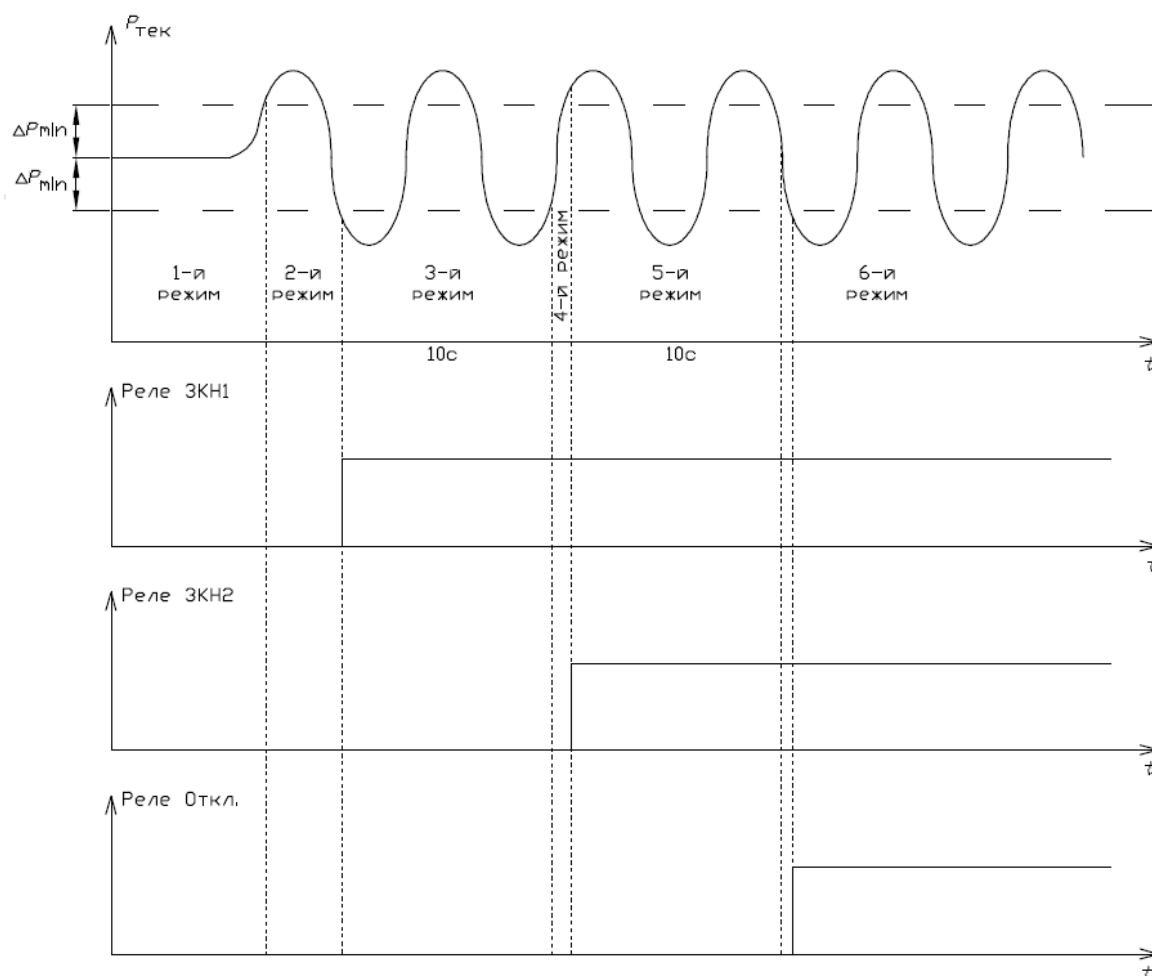


Рис. 12.1 Характеристика работы защиты от колебаний нагрузки

В четвертом режиме защита вновь пытается зафиксировать наличие колебания нагрузки и, если оно выявлено, то формируется команда на срабатывание 2-й ступени защиты (срабатывает реле ЗКН2), а если нет, то защита переходит в первый режим работы. Пятый режим возникает в том случае, если сработала 2-я ступень защиты от колебания нагрузки (произошло срабатывание реле ЗКН2). Он аналогичен 3-му режиму, в нем защита ожидает заданное время, пока в системе установится новый установившейся режим после срабатывания ЗКН2.

Шестой режим аналогичен четвертому режиму: защита вновь пытается зафиксировать наличие колебания нагрузки и, если оно выявлено, то формируется команда на срабатывание 3-й ступени защиты (отключение двигателя), а если нет, то защита переходит в первый режим работы.

В качестве уставки защиты от колебаний нагрузки задается относительное значение амплитуды колебаний $A_{\text{кол}}$, %, вычисляемое по формуле

$$A_{\text{кол}} = \frac{\Delta P_{\text{мин}}}{P_{\text{ном.дв}}} \cdot 100, \quad (12.1)$$

где $\Delta P_{\text{мин}}$ – минимальная амплитуда колебаний мощности синхронного двигателя, кВт; $P_{\text{ном.дв}}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт.

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 6-е изд.
2. РД 153–34.0–35.301–2002. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения.
3. Александров А.М. Выбор уставок срабатывания защит асинхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – СПб.: ПЭИПК, 2012.
4. Королев Е.П. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты/ Е.П.Королев, Э.М. Либерзон – М.: Энергия, 1980.
5. Корогодский В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. / В.И. Корогодский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно – М.: Энергоатомиздат, 1987.
6. Шабад М.А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты, Экспериментальная и расчетные проверки, конспект лекций. – СПб.: ПЭИПК, 2012.
7. Шабад М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6 – 35 кВ. – СПб.: ПЭИПК, 2012.
8. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных двигателей. – М.: Энергия, 1977.
9. Афанасьев В.В. Трансформаторы тока./ В.В. Афанасьев и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1989 г.
10. Беляев А.В. Автоматика и защита на подстанциях с синхронными и частотно регулируемые электродвигателями большой мощности. СПб, ПЭИПК, 2012. – Ч.1–2.
11. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем./ Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов – М.: Энергоатомиздат, 1998.
12. ГОСТ 183–74. Межгосударственный стандарт. Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия, изд. июль 2001 г. (отменен 01.07.2010 г.).
13. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
14. Соловьёв А.Л. Защита генераторов малой и средней мощности терминалами «Сириус–ГС». – М.: НТФ «Энергопресс», 2009.
15. Вавин В.Н. Релейная защита блоков «турбогенератор–трансформатор». – М.: Энергоиздат, 1982.
16. Пирогов М.Г., Михалев С.В. Проблема излишнего действия дифференциальной защиты при повреждении в измерительных токовых цепях// Новости электротехники. 2012. №2(74).

Приложение 1

Нормативные ссылки

В работе использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ Р 52776–2007. Национальный стандарт РФ. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики. (введен 01.01.2008 г.)

ГОСТ 8865–93. Межгосударственный стандарт. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация.

ГОСТ 13109–97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

ГОСТ 7746–2001. Межгосударственный стандарт. Трансформаторы тока. Общие технические условия.

Приложение 2

Рекомендации применения защит

Вид защиты	Вид потребителя		
	Односкоростной асинхронный двигатель	Двухскоростной асинхронный двигатель	Синхронный двигатель
Токовая отсечка (ТО)	Необходима	Необходима для каждой обмотки статора	Необходима
Дифференциальная защита с торможением (ДЗТ)	Необходима при мощности двигателя более 5 МВт либо, если ТО не удовлетворяет требованиям по чувствительности		
Дифференциальная токовая отсечка (ДТО)	Рекомендуется к применению всегда в качестве вспомогательного элемента при использовании ДЗТ		
Защита от замыканий на землю	При мощности менее 2 МВт необходима при токе замыкания на землю 10 А и более, при мощности более 2 МВт необходима при токе замыкания на землю 5 А и более. Рекомендуется к применению всегда		
Защита от двойных замыканий на землю	Применяется при выполнении защиты от междуфазных КЗ в двухфазном исполнении. Необходима при использовании защиты от ОЗЗ с выдержкой времени или направленной защиты от ОЗЗ. Рекомендуется к применению всегда.		
Защита минимального напряжения (ЗМН)	Необходима, если отсутствует групповая ЗМН	Необходима, если отсутствует групповая ЗМН	Может быть использована для резервирования ЗПП
Защита от потери питания (ЗПП)	Не используется		Необходима, если отсутствует групповая ЗПП
Защита от неполнофазного режима (ЗНР)	Рекомендуется к применению всегда		
Защита от перегрузки	Рекомендуется к применению всегда		
Защита от асинхронного режима	Не применяется		Необходима
УРОВ	Рекомендуется к применению всегда		
Защита от колебаний нагрузки (ЗКН)	Необходима в случае возможности режима колебаний нагрузки		

Оглавление

Введение.....	3
1. Обозначения и сокращения	4
2. Расчет защит от междуфазных коротких замыканий в электродвигателе.....	5
2.1. Общие положения	5
2.2. Расчет максимальной токовой отсечки (ТО)	5
2.3. Дифференциальная защита электродвигателя	7
2.4. Примеры расчетов защит двигателя от междуфазных КЗ	12
3. Расчеты защит от замыканий на землю в статорной обмотке двигателя	25
3.1. Общие положения	25
3.2. Расчет защиты электродвигателя от однофазных замыканий на землю	25
3.3. Расчет защиты электродвигателя от двойных замыканий на землю	29
3.4. Расчет направленной токовой защиты двигателя от однофазных замыканий на землю	29
3.5. Неселективная сигнализация замыканий на землю и функция селектора направления ОЗЗ (СНОЗЗ).....	31
3.6. Примеры расчета защит от замыканий на землю	31
4. Расчет защиты минимального напряжения (ЗМН)	34
5. Расчет защиты от потери питания	35
6. Расчеты защиты от неполнофазного режима работы электродвигателя	36
7. Расчеты защит электродвигателя от перегрузок	37
7.1. Общие положения	37
7.2. Выполнение защиты двигателей от перегрузок на терминалах БМРЗ	38
7.3. Расчет токовой защиты от симметричных перегрузок электродвигателя.....	39
7.3.1. Защита от затянутого пуска и блокировки ротора	39
7.3.2. Защита от перегрузки с действием на отключение двигателя	39
7.3.3. Защита от перегрузки с действием на сигнал	40
7.4. Расчет тепловой защиты электродвигателя	41
7.5. Экспериментальное определение постоянных времени тепловой модели двигателя.....	44
7.6. Примеры расчета защит двигателя от перегрузок	47
8. Расчет защиты электродвигателя с возбуждением от асинхронного хода	49
9. Расчет защиты от асинхронного режима при потере синхронным двигателем возбуждения.....	50
10. Расчет уставок устройства резервирования при отказе выключателя	52
11. Расчет минимальной токовой защиты электродвигателя.....	53
12. Защита от колебаний нагрузки.....	53
Приложение 1.....	56
Приложение 2.....	57

Учебное издание

**ГОНДУРОВ Сергей Александрович, Михалев Сергей Владимирович,
ПИРОГОВ Михаил Геннадьевич, СОЛОВЬЁВ Александр Леонидович.**

**Релейная защита электродвигателей напряжением 6–10 кВ термина-
лами БМРЗ**

Методика расчета
Редактор Е.Б. Никанорова

Ризограф. Объем 2,3 печ. л. Тираж 300 экз.

Заказ №

ПЭИПК, 196135, Санкт–Петербург, Авиационная ул., 23