

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ
ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА
ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ 6-10 КВ**

*Методические указания к самостоятельной работе
для студентов специальности 21.05.04*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра электроэнергетики и электромеханики

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ
ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА
ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ 6-10 КВ**

*Методические указания к самостоятельной работе
для студентов специальности 21.05.04*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019

УДК 621.31.622(073)

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА. Защита электродвигателей 6 – 10 кВ: Методические указания к самостоятельной работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов*. СПб, 2019. 78 с.

В методических указаниях изложены материалы об организации систем защиты электродвигателей напряжением питания свыше 1 кВ, рассмотрены необходимые виды защит, устанавливаемые на двигатели, методики расчета уставок максимальной токовой защиты, дифференциальной защиты, защиты двигателей от замыкания на землю, защиты минимального напряжения, защиты электродвигателей от перегрузок, тепловой защиты. Приведенные материалы могут быть использованы при выполнении раздела «Электроснабжение» в пояснительной записке дипломного проекта.

Предназначены для студентов всех форм обучения специальности 21.05.04 «Горное дело» специализации «Электрификация и автоматизация горного производства», а также могут быть использованы бакалаврами, магистрантами и аспирантами данного профиля.

Научный редактор проф. *А.Е. Козярук*

Рецензент канд. техн. наук *В.А. Соловьев* (ООО «НПК «ЭНЕРГОПРО-ГРЕСС»)

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2019

ВВЕДЕНИЕ

В данных методических указаниях приведены учебно-методические материалы, необходимые для изучения одного из базисных курсов «Электроснабжение горного производства» и выполнения курсового проекта.

Учебная дисциплина «Электроснабжение горного производства» является специальной дисциплиной и предназначена для формирования у студентов профессиональных знаний по проектированию надежных и экономичных систем электроснабжения (СЭС).

В результате изучения дисциплины студент должен:

- иметь понятие о проектной документации;
- знать принципы, методы и алгоритмы проектирования СЭС;
- знать принципы построения и реализации устройств СЭС, а также устройств защиты и сетевой автоматики;
- уметь выполнять проектирование основных элементов СЭС с использованием компьютерных средств.

Дисциплина «Электроснабжение горного производства» относится к базовой части Блока 1 «Дисциплины (модули)» основной профессиональной образовательной программы по специальности «21.05.04 Горное дело (уровень специалитета)», специализация «Электрификация и автоматизация горного производства».

Для изучения дисциплины «Электроснабжение горного производства» необходимы знания, умения и компетенции, полученные обучающимися при изучении в Университете дисциплин «Материаловедение», «Введение в специальность», «Электротехника», «Электрические и электронные аппараты», «Электрические машины», «Горные машины и оборудование».

Знания, умения и компетенции, освоенные при изучении данной дисциплины, используются в процессе изучения специальных дисциплин «Математическое моделирование электротехнических систем», «Математическое моделирование

электромеханических систем», «Электрические и электронные аппараты», и ряда специальных дисциплин, в которых рассматриваются разделы, специфичные для данного направления подготовки «Эксплуатация систем электроснабжения», «Электробезопасность на горных предприятиях».

Номер выполняемого варианта соответствует порядковому номеру в журнале учёта текущей успеваемости.

1. НЕОБХОДИМЫЕ ВИДЫ ЗАЩИТ, УСТАНОВЛИВАЕМЫЕ НА ДВИГАТЕЛИ

На электродвигателях должна предусматриваться защита от многофазных замыканий и в случаях, оговоренных ниже, защита от однофазных замыканий на землю, защита от токов перегрузки и защита минимального напряжения. На синхронных электродвигателях должна, кроме того, предусматриваться защита от асинхронного режима, которая может быть совмещена с защитой от токов перегрузки.

Защита электродвигателей с изменяемой частотой вращения должна выполняться для каждой частоты вращения в виде отдельного комплекта, действующего на свой выключатель.

Для защиты электродвигателей от многофазных замыканий в случаях, когда не применяются предохранители, должна предусматриваться:

1. Токовая однорелейная отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах, с реле прямого или косвенного действия, включенным на разность токов двух фаз, - для электродвигателей мощностью менее 2 МВт.

2. Токовая двухрелейная отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах, с реле прямого или косвенного действия - 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,

когда защита по п. 1 не удовлетворяет требованиям чувствительности или, когда двухрелейная отсечка оказывается целесообразной по исполнению комплектной защиты или применяемого привода с реле прямого действия.

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.

3. Продольная дифференциальная токовая защита - для электродвигателей мощностью 5 МВт и более, а также менее 5 МВт, если установка токовых отсечек по п. 1 и 2 не обеспечивает выполнения требований чувствительности; продольная дифференциальная защита электродвигателей при наличии на них защиты от замыканий на землю должна иметь двухфазное исполнение, а при отсутствии этой защиты - 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.

Для блоков трансформатор (автотрансформатор) - электродвигатель должна предусматриваться общая защита от многофазных замыканий:

1. Токовая отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах, - для электродвигателей мощностью до 2 МВт. При схеме соединения обмоток трансформатора звезда - треугольник отсечка выполняется из трех токовых реле: двух включенных на фазные токи и одного включенного на сумму этих токов.

При невозможности установки трех реле (например, при ограниченном числе реле прямого действия) допускается схема с

двумя реле, включенными на соединенные треугольником вторичные обмотки трех трансформаторов тока.

2. Дифференциальная отсечка в двухрелейном исполнении, отстроенная от бросков тока намагничивания трансформатора, - для электродвигателей мощностью более 2 МВт, а также 2 МВт и менее, если защита по п. 1 не удовлетворяет требованиям чувствительности при междуфазном КЗ на выводах электродвигателя.

3. Продольная дифференциальная токовая защита в двухрелейном исполнении с промежуточными насыщающимися трансформаторами тока - для электродвигателей мощностью более 5 МВт, а также 5 МВт и менее, если установка отсечек по п. 1 и 2 не удовлетворяет требованиям чувствительности.

Оценка чувствительности должна производиться при КЗ на выводах электродвигателя.

Защита должна действовать на отключение выключателя блока, а у синхронных электродвигателей - также на устройство автоматического гашения поля (АГП), если оно предусмотрено.

Для блоков с электродвигателями мощностью более 20 МВт, как правило, должна предусматриваться защита от замыкания на землю, охватывающая не менее 85% витков обмотки статора электродвигателя и действующая на сигнал с выдержкой времени.

Указания по выполнению остальных видов защиты трансформаторов (автотрансформаторов) и электродвигателей при работе их раздельно действительны и в том случае, когда они объединены в блок трансформатор (автотрансформатор) - электродвигатель.

Защита электродвигателей мощностью до 2 МВт от однофазных замыканий на землю при отсутствии компенсации должна предусматриваться при токах замыкания на землю 10 А и более, а при наличии компенсации - если остаточный ток в нормальных условиях превышает это значение. Такая защита для электродвигателей мощностью более 2 МВт должна предусматриваться при токах 5 А и более.

Ток срабатывания защит электродвигателей от замыканий на землю должен быть не более: для электродвигателей мощностью до 2 МВт 10 А и для электродвигателей мощностью более 2 МВт 5 А. Рекомендуются меньшие токи срабатывания, если это не усложняет выполнения защиты.

Защиту следует выполнять без выдержки времени (за исключением электродвигателей, для которых требуется замедление защиты по условию отстройки от переходных процессов) с использованием трансформаторов тока нулевой последовательности, установленных, как правило, в распределительном устройстве (РУ). В тех случаях, когда установка трансформаторов тока нулевой последовательности в РУ невозможна или может вызвать увеличение выдержки времени защиты, допускается устанавливать их у выводов электродвигателя в фундаментной яме.

Если защита по условию отстройки от переходных процессов должна иметь выдержку времени, то для обеспечения быстродействующего отключения двойных замыканий на землю в различных точках должно устанавливаться дополнительное токовое реле с первичным током срабатывания около 50-100 А.

Защита должна действовать на отключение электродвигателя, а у синхронных электродвигателей - также на устройство АГП, если оно предусмотрено.

Защита от перегрузки должна предусматриваться на электродвигателях, подверженных перегрузке по технологическим причинам, и на электродвигателях 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 вследствие понижения напряжения в сети.

Защиту от перегрузки следует предусматривать в одной фазе с зависимой или независимой от тока выдержкой времени, отстроенной от длительности пуска электродвигателя в нормальных условиях и самозапуска после действия автоматического ввода резерва (АВР) и автоматического повторного включения (АПВ).

Выдержка времени защиты от перегрузки синхронных электродвигателей во избежание излишних срабатываний при длительной форсировке возбуждения должна быть по возможности близкой к наибольшей допустимой по тепловой 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.

Для электродвигателей, которые защищаются от токов КЗ предохранителями, не имеющими вспомогательных контактов для сигнализации об их перегорании, должна предусматриваться защита от перегрузки в двух фазах.

Защита синхронных электродвигателей от асинхронного режима может осуществляться при помощи реле, реагирующего на увеличение тока в обмотках статора; она должна быть отстроена по времени от пускового режима и тока при действии форсировки возбуждения.

Защита, как правило, должна выполняться с независимой от тока характеристикой выдержки времени. Допускается применение защиты с зависимой от тока характеристикой на электродвигателях с отношением КЗ более 1.

Защита синхронных электродвигателей от асинхронного режима должна действовать с выдержкой времени на одну из схем, предусматривающих:

- ресинхронизацию;

- ресинхронизацию с автоматической кратковременной разгрузкой механизма до такой нагрузки, при которой обеспечивается втягивание электродвигателя в синхронизм (при допустимости кратковременной разгрузки по условиям технологического процесса);

- отключение электродвигателя и повторный автоматический пуск;

- отключение электродвигателя (при невозможности его разгрузки или ресинхронизации, при отсутствии необходимости автоматического повторного пуска и ресинхронизации по условиям технологического процесса).

Для облегчения условий восстановления напряжения после отключения КЗ и обеспечения самозапуска электродвигателей ответственных механизмов следует предусматривать отключение защитой минимального напряжения электродвигателей неответственных механизмов суммарной мощностью, определяемой возможностями источника питания и сети по обеспечению самозапуска.

Выдержки времени защиты минимального напряжения должны выбираться в пределах от 0,5 до 1,5 с - на ступень больше времени действия быстродействующих защит от многофазных КЗ, а уставки по напряжению должны быть, как правило, не выше 70% номинального напряжения.

При наличии синхронных электродвигателей, если напряжение на отключенной секции затухает медленно, в целях ускорения действия АВР и АПВ может быть применено гашение поля синхронных электродвигателей ответственных механизмов с помощью защиты минимальной частоты или других способов, обеспечивающих быстрейшую фиксацию потери питания.

Эти же средства могут быть использованы для отключения неответственных синхронных электродвигателей, а также для предупреждения несинхронного включения отключенных двигателей, если токи выключения превышают допустимые значения.

В электроустановках промышленных предприятий в случаях, когда не может быть осуществлен одновременный самозапуск всех электродвигателей ответственных механизмов, следует применять отключение части таких ответственных механизмов и их автоматический повторный пуск по окончании самозапуска первой группы электродвигателей. Включение последующих групп может быть осуществлено по току, напряжению или времени.

Защита минимального напряжения с выдержкой времени не более 10 с и уставкой по напряжению, как правило, не выше 50% номинального напряжения должна устанавливаться на электродвигателях ответственных механизмов также в случаях, когда самозапуск механизмов после останова недопустим по условиям технологического процесса или по условиям безопасности и, кроме того, когда не может быть обеспечен самозапуск всех электродвигателей ответственных механизмов. Кроме указанных случаев эту защиту следует использовать также для обеспечения надежности пуска АВР электродвигателей взаиморезервируемых механизмов.

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

На синхронных электродвигателях должно предусматриваться автоматическое гашение поля. Для электродвигателей мощностью 2 МВт и более АГП осуществляется путем введения сопротивления в цепь обмотки возбуждения. Для электродвигателей мощностью менее 2 МВт допускается осуществлять АГП путем введения сопротивления в цепь обмотки возбуждения возбудителя. Для синхронных электродвигателей менее 0,5 МВт АГП, как правило, не требуется. На синхронных электродвигателях, которые снабжены системой возбуждения, выполненной на управляемых полупроводниковых элементах, АГП независимо от мощности двигателя может осуществляться инвертированием, если оно обеспечивается схемой питания. В

противном случае АГП должно осуществляться введением сопротивления в цепь обмотки возбуждения.

Согласно «ПУЭ» оценка чувствительности дифференциальных защит должна производиться при помощи коэффициента чувствительности, определяемого как отношение расчетного значения дифференциального тока при металлическом КЗ в пределах защищаемой зоны к величине дифференциального тока, при котором происходит срабатывание защиты. Соответственно коэффициент чувствительности токовой отсечки (ТО) – отношение расчетного значения фазного тока при металлическом КЗ в пределах защищаемой зоны к величине фазного тока при котором происходит срабатывание защиты.

Чувствительность защит от междуфазных замыканий должна проверяться при КЗ на вводах питания электродвигателя. Для обеспечения надёжной работы коэффициент чувствительности защит от междуфазных замыканий должен быть не менее 2,0.

2. РАСЧЕТ УСТАВОК ЗАЩИТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СВЫШЕ 1 КВ

2.1. Методика расчета уставок токовой отсечки

Для защиты электродвигателей от межфазных замыканий должна применяться токовая отсечка (ТО) без выдержки времени. При обоснованной необходимости использования дифференциальной защиты от междуфазных замыканий рекомендуется всегда использовать ТО в качестве резервной защиты.

Отстройка ТО выполняется от двух параметров:

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

В случае расчета уставок для синхронного двигателя следует учитывать, что машина запускается в асинхронном режиме. Когда скорость вращения достигает значения близкой к синхронной - выполняют переключение обмотки возбуждения с резистора на

напряжение возбуждения и двигатель втягивается в синхронизм. Бросок пускового тока определяется аналогично асинхронному электродвигателю.

В случае, если номинальный ток двигателя не приведен в паспортных данных, определяем его по формуле:

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

где $P_{\text{ном.дв}}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт;

$U_{\text{ном.дв}}$ – номинальное линейное действующее напряжения двигателя, кВ;

η – номинальный к.п.д. электродвигателя;

$\cos \varphi$ – номинальный коэффициент мощности электродвигателя.

В соответствии с определенным номинальным током – трансформаторы тока, устанавливаемые со стороны питания электродвигателя, должны быть выбраны таким образом и иметь такой коэффициент трансформации, чтобы обеспечивался вторичный ток не более 5 А (рекомендуемый диапазон 1 ÷ 4 А) при номинальном первичном токе двигателя.

По паспортным данным трансформатора тока определяем предельную кратность тока, при которой трансформатор сохраняет погрешность не более 10%.

Пусковая характеристика электродвигателя приведена на рисунке 2.1. Считается, что процесс пуска машины завершен, когда пусковой ток станет ниже значения $1,25 I_{\text{ном.дв}}$.

В случае прямого пуска двигателя, определяем максимальный бросок пускового тока электродвигателя с учётом аperiodической составляющей:

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

где $k_{\text{апер}}$ – коэффициент, учитывающий аperiodическую составляющую пускового тока машины, принимается 2,5;

$k_{\text{пуск}}$ – кратность пускового тока машины (как правило, 3 ÷ 8 $I_{\text{ном.дв}}$).

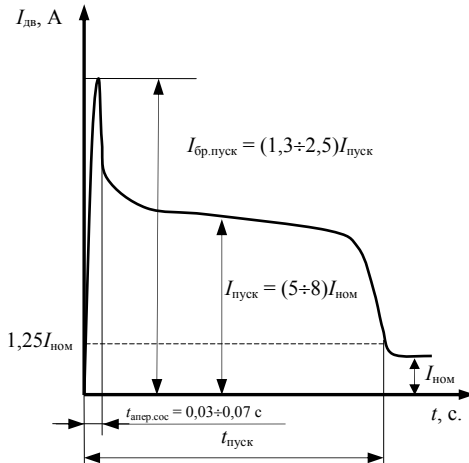


Рис. 2.1. Пусковая характеристика электродвигателя

В случае реакторного пуска двигателя, определяем максимальный бросок пускового тока электродвигателя с учётом аperiodической составляющей $I_{бр.пуск}$ по (2.2).

Определяем полное пусковое индуктивное сопротивление двигателя:

$$X_d = \frac{U_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot I_{бр.пуск}}, \text{ Ом.} \quad (2.3)$$

Определяем максимальный бросок пускового тока двигателя при реакторном пуске:

$$I_{бр.пуск.р} = \frac{U_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot (X_c + X_d + X_p)}, \quad (2.4)$$

где X_c – индуктивное сопротивление сети, X_p – индуктивное сопротивление реактора.

В случае участия двигателя в самозапуске, поскольку напряжение на двигателе после включения резервного питания

может составлять 1,3 ÷ 1,4 от номинального, полученный ток $I_{бр.пуск}$ необходимо увеличить в 1,4 раза.

Выбираем уставку срабатывания первой ступени ТО большую $I_{бр.пуск}$.

$$I_{co} \geq I_{бр.пуск} \quad (2.5)$$

Выполняем проверку, что при токе двигателя $1,1 \cdot I_{co}$ трансформаторы тока обеспечивают погрешность не более 10%. В случае невыполнения указанного требования необходимо принять меры для его выполнения.

Определяем значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя и коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ.

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{кз}^{(3)}, \quad (2.6)$$

$$k_{ч} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{co}}. \quad (2.7)$$

Защита от междуфазных КЗ работает без выдержки времени.

Расчет уставок токовой отсечки для многоскоростных двигателей осуществляется аналогично односкоростным для каждой скорости отдельно.

3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ДВИГАТЕЛЯ

Существует две концепции 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. Такая настройка защиты, рекомендована к применению на объектах, где есть обслуживающий персонал.

- дифференциальная защита с током срабатывания больше номинального тока защищаемого электродвигателя. Такой способ выполнения защиты рекомендован к применению на ответственных объектах и обеспечивает правильную работу защиты при обрыве и неисправности токовых цепей, или при неисправности одного из трансформаторов тока дифференциальной защиты электродвигателя.

Защита работает без выдержки времени.

Дифференциальная защита с торможением (ДЗТ) является основным элементом дифференциальной защиты, а дифференциальная токовая отсечка (ДТО) является её вспомогательным элементом и должна всегда применяться с ДЗТ.

Характеристика срабатывания дифференциальной защиты приведена на рисунке 3.1.

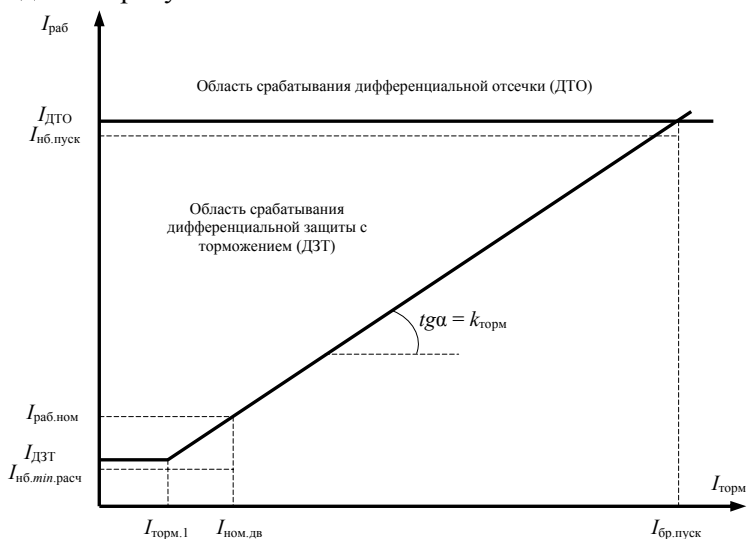


Рис. 3.1. Характеристика срабатывания дифференциальной защиты

В случае, если номинальный ток двигателя не приведен в паспортных данных, определяем его по формуле:

$$I_{\text{ном.дв}} = \frac{P_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.дв}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi}, \quad (3.1)$$

где $P_{\text{ном.дв}}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт;

$U_{\text{ном.дв}}$ – номинальное линейное действующее напряжения двигателя, кВ;

η – номинальный к.п.д. электродвигателя;

$\cos \varphi$ – номинальный коэффициент мощности электродвигателя.

В соответствии с определенным номинальным током – трансформаторы тока, устанавливаемые со стороны питания электродвигателя, должны быть выбраны таким образом и иметь такой коэффициент трансформации, чтобы обеспечивался вторичный ток не более 5 А (рекомендуемый диапазон 1 ÷ 4 А) при номинальном первичном токе двигателя. Для повышения чувствительности защиты и снижения дифференциального тока небаланса рекомендуется трансформаторы тока со стороны питания и со стороны нейтрали выбирать одинакового типа.

По паспортным данным трансформатора тока определяем предельную кратность тока, при которой трансформатор сохраняет погрешность не более 10%.

В случае прямого пуска двигателя, определяем максимальный бросок пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей:

$$I_{\text{бр.пуск}} = 1,4 k_{\text{апер}} \cdot k_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{ном.дв}}, \text{ А}, \quad (3.2)$$

где $k_{\text{апер}}$ - коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую пускового тока машины, принимается 1,8;

$k_{\text{пуск}}$ - кратность пускового тока машины (как правило, 3 ÷ 8 $I_{\text{ном.дв}}$).

В случае реакторного пуска двигателя, определяем максимальный бросок пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей:

$$I_{\text{бр.прям.пуск}} = 1,4 k_{\text{апер}} \cdot k_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{ном.дв}}, \text{ А}, \quad (3.3)$$

где $k_{\text{апер}}$ - коэффициент, учитывающий аperiodическую составляющую пускового тока машины, принимается 1,8;
 $k_{\text{пуск}}$ - кратность пускового тока машины (как правило, $3 \div 8 I_{\text{ном.дв}}$).

Определяем полное пусковое индуктивное сопротивление двигателя:

$$X_d = \frac{U_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{бр.прям.пуск}}}, \text{ Ом.} \quad (3.4)$$

Определяем максимальный бросок пускового тока двигателя при реакторном пуске:

$$I_{\text{бр.пуск}} = \frac{U_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} \cdot (X_c + X_d + X_p)}, \quad (3.5)$$

где X_c – индуктивное сопротивление сети, X_p – индуктивное сопротивление реактора.

В случае участия двигателя в самозапуске, поскольку напряжение на двигателе после включения резервного питания может составлять $1,3 \div 1,4$ от номинального, полученный ток $I_{\text{бр.пуск}}$ необходимо увеличить в 1,4 раза.

Определяем погрешности трансформатора тока (ТТ):

ε_1 – полная относительная погрешность ТТ установленных со стороны нейтрали электродвигателя в режиме, соответствующем максимальному значению броска аperiodической составляющей пускового тока электродвигателя.

ε_2 – полная относительная погрешность ТТ установленных со стороны нейтрали электродвигателя при номинальном токе электродвигателя.

Погрешности могут быть рассчитаны известными методами, например, по типовой кривой намагничивания для электротехнической стали (рис. 3.2) На типовой кривой намагничивания показаны параметры:

$$A = \frac{k_{\text{max}}}{k_{10}}, \quad (3.6)$$

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

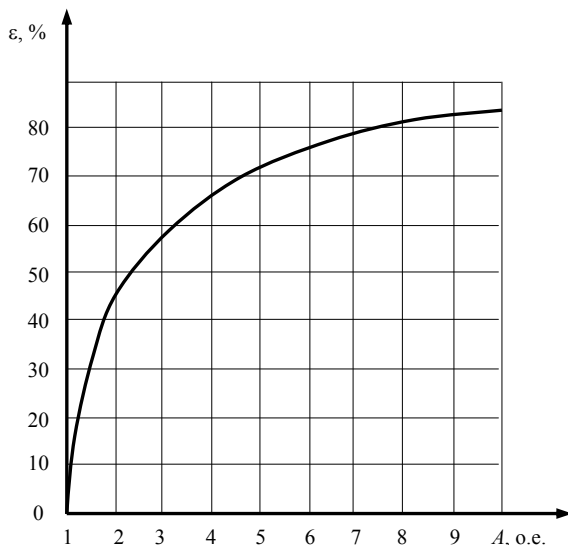


Рис. 3.2. Характеристика намагничивания электротехнической стали

Определяем расчетное значение максимального тока небаланса $I_{нб.пуск}$, соответствующее максимальному броску пускового тока электродвигателя $I_{бр.пуск}$:

$$I_{нб.пуск} = (\varepsilon_1 + \gamma + \delta) \cdot I_{бр.пуск}, \quad (3.7)$$

где γ – основная относительная погрешность измерения дифференциального тока устройством релейной защиты (складывается из погрешностей измерения двух токовых каналов, погрешность каждого – 2,5%, итого 5%);

δ – технологический запас, обусловленный наличием дополнительной погрешности измерения терминала. Принимается

равным половине основной погрешности измерения дифференциального тока ($\delta = 2,5\%$).

Определяем максимальный ток небаланса в цепях дифференциальной защиты обусловленный максимальным значением броска пускового тока электродвигателя с учетом значения коэффициента отстройки $k_{отс}$:

$$I_{\text{раб.пуск}} > k_{отс} \cdot I_{\text{нб.пуск}}, \quad (3.8)$$

где $k_{отс} = 1,2$ – коэффициент отстройки.

Выполняем расчет коэффициента торможения защиты:

$$k_{\text{торм}} \geq \frac{I_{\text{раб.пуск}}}{I_{\text{бр.пуск}}} = k_{отс} \cdot (\varepsilon_1 + \gamma + \delta). \quad (3.9)$$

Округляем коэффициент торможения до сотых в большую сторону.

Определим значение уставки срабатывания дифференциальной токовой отсечки с учётом отстройки от максимального тока небаланса $I_{\text{ДТО}} \geq I_{\text{нб.пуск}}$ при максимальном броске пускового тока электродвигателя, с учетом округленного значения коэффициента торможения:

$$I_{\text{ДТО}} = k_{\text{торм}} \cdot I_{\text{бр.пуск}}. \quad (3.10)$$

Определяем максимальное значение тока небаланса при номинальном токе двигателя:

$$I_{\text{нб.мин.расч}} = (\varepsilon_2 + \gamma + \delta) \cdot I_{\text{ном.дв}}. \quad (3.11)$$

Определяем значение уставки $I_{\text{дзт}}$:

$$I_{\text{дзт}} \geq k_{отс} \cdot I_{\text{нб.мин.расч}}, \quad (3.12)$$

где $k_{отс} = 1,2$ – коэффициент отстройки.

$I_{\text{дзт}}$ выбирается меньше либо больше номинального тока электродвигателя в зависимости от типа потребителя.

Рекомендуемое значение $I_{\text{дзт}} = (0,3 \div 1,2) \cdot I_{\text{дв.ном}}$.

Для построения характеристики ДЗТ, определяем значение тока торможения, при котором выполняется излом характеристики дифференциальной защиты $I_{\text{торм.1}}$:

$$I_{\text{торм.1}} = \frac{I_{\text{ДЗТ}}}{k_{\text{торм}}}. \quad (3.13)$$

Выдержка времени ДЗТ и ДТО должна быть задана нулевой. Для проверки чувствительности защиты определяем коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ}}^{(2)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_{\text{КЗ}}^{(3)}}{I_{\text{ДЗТ}}}. \quad (3.14)$$

Расчет уставок токовой отсечки для многоскоростных двигателей осуществляется аналогично односкоростным для каждой скорости отдельно.

4. МЕТОДИКА ВЫБОРА И РАСЧЕТА УСТАВОК ЗАЩИТ ДВИГАТЕЛЯ С ПЛАВНЫМ ПУСКОМ

При использовании для запуска двигателя устройства плавного пуска (УПП), рекомендуется применение в качестве защит от междуфазных замыканий:

- в ячейке питания двигателя от сети: ТО, ДЗТ, ДТО;
- в ячейке питания УПП: ТО, ДТО.

Организация защит от междуфазных замыканий двигателя с устройством плавного пуска показана на рисунке 4.1.

При выборе варианта выполнения защиты двигателя с плавным пуском следует в первую очередь учитывать рекомендации производителя устройства плавного пуска.

Расчет уставок ТО, ДЗТ и ДТО, установленных в ячейке питания двигателя от сети аналогичен расчету уставок защит для прямого пуска, при этом защита должна быть отстроена от тока самозапуска. Дифференциальная защита в ячейке питания, во

избежание ложного срабатывания, должна выводиться на время пуска электродвигателя, например, блокироваться по факту снижения со стороны питания электродвигателя максимального из трёх фазных токов ниже значения равного 75% холостого хода ЭД.

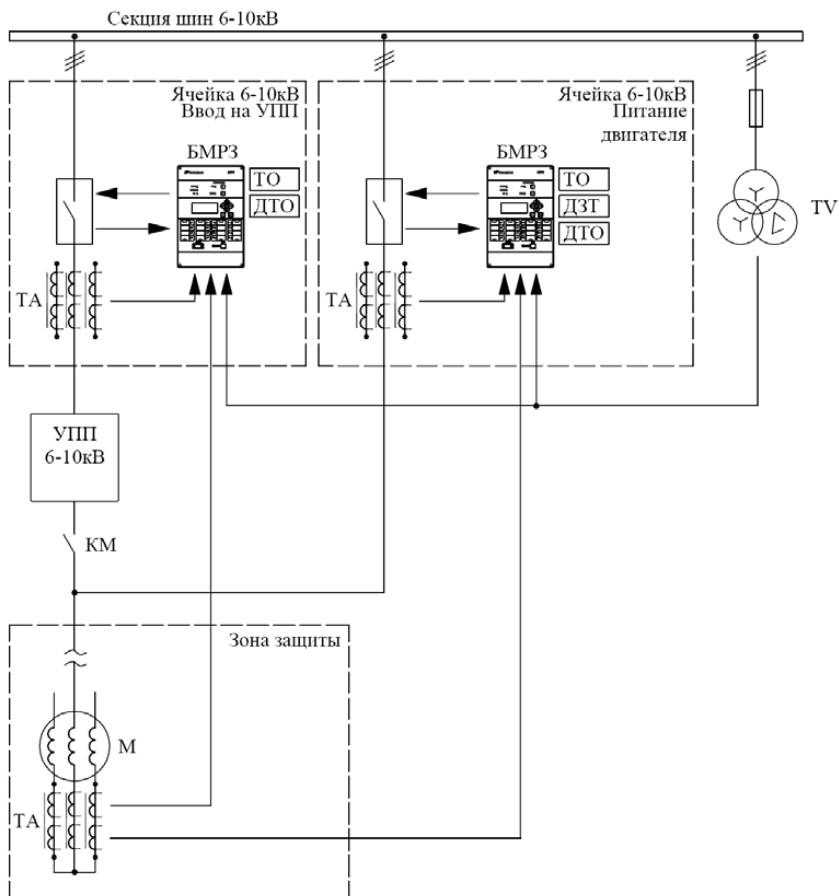


Рис. 4.1. Рекомендуемое исполнение защит двигателя с плавным пуском

После выполнения пуска электродвигателя от УПП и завершения перевода питания электродвигателя на ячейку питания

рекомендуется выводить из работы дифференциальную защиту ячейки УПП.

При организации защит и цепей автоматики ячейки питания УПП должны учитываться индивидуальные рекомендации производителя УПП.

Рекомендуется применение в ячейке питания УПП токовой отсечки и, при необходимости дифференциальной токовой отсечки. Расчет уставок ТО производится аналогично прямому пуску.

Уставка срабатывания ДТО определяется по формуле:

$$I_{\text{ДТО}} = 1,1 \cdot k_{\text{УПП}} \cdot I_{\text{ном дв}} \cdot A, \quad (4.1)$$

где $k_{\text{УПП}}$ – предельная кратность пускового тока, задаваемая при настройке устройства плавного пуска (УПП) (как правило, $3 \div 4$).

Применение ДЗТ в ячейке питания УПП не целесообразно.

5. ЗАЩИТА ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

5.1. Защита от однофазного замыкания на землю

Защита электродвигателей мощностью до 2 МВт от однофазных замыканий на землю при отсутствии компенсации должна предусматриваться при токах замыкания на землю 10 А и более, а при наличии компенсации - если остаточный ток в нормальных условиях превышает это значение. Такая защита для электродвигателей мощностью более 2 МВт должна предусматриваться при токах замыкания на землю 5 А и более.

Ток срабатывания защит электродвигателей от замыканий на землю должен быть не более: для электродвигателей мощностью до 2 МВт 10 А и для электродвигателей мощностью более 2 МВт 5 А. Рекомендуются меньшие токи срабатывания, если это не усложняет выполнения защиты.

Защиту следует выполнять без выдержки времени (за исключением электродвигателей, для которых требуется замедление защиты по условию отстройки от переходных процессов) с использованием трансформаторов тока нулевой последовательности, установленных, как правило, в РУ. В тех

случаях, когда установка трансформаторов тока нулевой последовательности в РУ невозможна или может вызвать увеличение выдержки времени защиты, допускается устанавливать их у выводов электродвигателя в фундаментной яме.

Если защита по условию отстройки от переходных процессов должна иметь выдержку времени, то для обеспечения быстродействующего отключения двойных замыканий на землю в различных точках должно устанавливаться дополнительное токовое реле с первичным током срабатывания около $50 \div 200$ А.

Защита должна действовать на отключение электродвигателя, а у синхронных электродвигателей – также на устройство автоматического гашения поля (АГП), если оно предусмотрено.

Защита от замыканий на землю выполняется двухступенчатой:

- первая ступень выполняет функцию защиты от однофазных замыканий на землю;
- вторая ступень выполняет функцию защиты от двойных замыканий на землю и используется в случае выполнения первой ступени с выдержкой времени (для отстройки от переходных процессов).

Часто при выполнении защиты от ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью защита выполняется по методике отстройки от собственного емкостного тока защищаемого присоединения. В зависимости от значения суммарного тока ОЗЗ может выполняться с действием на сигнализацию (при токах меньших, чем требуемые «ПУЭ», см. выше) или отключение поврежденного электродвигателя. Принцип работы защиты поясняется на рисунке 5.1.

В кабельной линии 4 возникло ОЗЗ. После установления переходного процесса, связанного с перезарядом емкостей сети, 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 защищаемых присоединений в направлении места ОЗЗ. Методика

отстройки от собственного емкостного тока защищаемого присоединения заключается в отстройке срабатывания защит от ОЗЗ от значения этого тока.

Для повышения чувствительности – защита, как правило, выполняется с выдержкой времени 0,1 с. Задержку по времени срабатывания защиты от ОЗЗ рекомендуется устанавливать нулевой, в крайних случаях при необходимости отстройки от переходных процессов выдержка времени ОЗЗ может быть принята 0,1 с. При применении задержки на срабатывание ОЗЗ требуется использование защиты от двойных замыканий на землю (вторая ступень), работающей без выдержки времени.

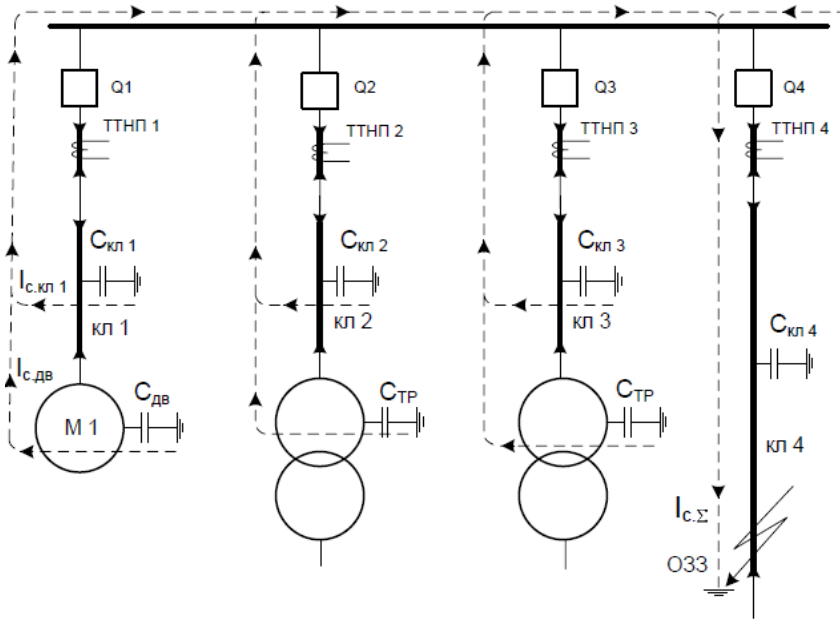


Рис. 5.1. Схема фрагмента сети с изолированной нейтралью с ОЗЗ

Параметр срабатывания защиты электродвигателя по току от ОЗЗ определяется из формулы:

$$I_{с.з} = \frac{k_{отс}}{k_{возв}} \cdot k_{бр} \cdot (I_{емк.дв} + I_{емк.кл}), \quad (5.1)$$

где $k_{отс} = 1,2$ – коэффициент отстройки защиты от ОЗЗ для блоков БМРЗ (для электромеханических реле коэффициент отстройки защиты принимали $k_{отс} = 1,3$);

$k_{возврат} = 0,95$ – коэффициент возврата защит для блоков БМРЗ;

$k_{бр}$ – коэффициент броска емкостного тока, обусловленного перезарядом емкостей электрической сети при ОЗЗ. В данном случае этот коэффициент, показывающий ослабление броска аperiodической составляющей емкостного тока цифровыми фильтрами терминала. Для блоков БМРЗ коэффициент броска емкостного тока защиты от ОЗЗ принимается $k_{бр} = 2$ (для электромеханических и статических реле коэффициент броска емкостного тока принимают $k_{бр} = 3 \div 5$);

$I_{емк.дв}$ – емкостной ток защищаемого электродвигателя, А;

$I_{емк.кл}$ – емкостной ток кабельной линии, соединяющий электродвигатель с ячейкой, А.

В некоторых сетях с изолированной нейтралью токи ОЗЗ малы. Поэтому, при недостаточной чувствительности ненаправленной токовой защиты – применяют направленную токовую защиту от ОЗЗ. Ток срабатывания направленной токовой защиты от ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью определяют по формуле (5.1), но $k_{бр}$ принимают равным единице, и это позволяет в два раза повысить чувствительность защиты.

Значение емкостного тока линии и, соответственно, суммарного емкостного тока линий всей сети можно ориентировочно определить по эмпирическим формулам:

- для кабельных сетей $I_{с\sum}^{(1)} \approx \frac{U_n \cdot l_{\sum}}{10}$; (5.2)

- для воздушных сетей $I_{с\sum}^{(1)} \approx \frac{U_n \cdot l_{\sum}}{350}$, (5.3)

где U_n – номинальное напряжение сети (кВ), l_{\sum} – суммарная длина линий (км).

Значение ёмкости статорной обмотки электродвигателя принимается по паспортным данным, если соответствующее значение в них приведено.

Для некоторых двигателей значения электрической ёмкости статорной обмотки на землю приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Значение емкости статорной обмотки для СТД

Тип двигателя	Мощность, МВт	Ёмкость статорной обмотки трех фаз, мкФ, для СД 6 кВ.	Ёмкость статорной обмотки трех фаз, мкФ, для СД 10 кВ.
СТД-5000-2	5,0	0,085	0,11
СТД-6300-2	6,3	0,11	0,11
СТД-8000-2	8,0	0,11	0,17
СТД-10000-2	10,0	0,15	0,17
СТД-12500-2	12,5	0,15	0,22

При отсутствии данных на двигатель, электрическую ёмкость статорной обмотки можно определить по следующим приближенным формулам.

Для определения ёмкостного тока АД напряжением выше 1 кВ можно применить следующие формулы:

$$\text{для АД напряжением 6 кВ: } I_{\text{емк.дв}} \approx 0,017 \cdot S_{\text{ном.дв}}; \quad (5.4)$$

$$\text{для АД напряжением 10 кВ: } I_{\text{емк.дв}} \approx 0,03 \cdot S_{\text{ном.дв}}; \quad (5.5)$$

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

$$S_{\text{ном.дв}} = \frac{P_{\text{ном.дв}}}{\cos \varphi \cdot \eta}, \text{ МВ} \cdot \text{А}, \quad (5.6)$$

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

Для более точного определения ёмкостного тока двигателя напряжением выше 1 кВ можно использовать следующую формулу:

$$I_{\text{емк.дв}} = 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{3} \cdot C_{\text{дв}} \cdot U_{\text{ном.дв}} \text{ А}, \quad (5.7)$$

где $C_{\text{дв}}$ – электрическая емкость двигателя в фарадах (Ф);
 $U_{\text{ном.дв.}}$ – номинальное напряжение двигателя в вольтах (В);
 $f_{\text{ном}}$ – номинальная частота питающей сети в герцах (Гц).

Для явнополюсных синхронных двигателей $C_{\text{дв}}$ определяется по формуле:

$$C_{\text{дв}} \approx \frac{404 \sqrt{S_{\text{ном.дв.}}^3} \cdot 10^{-6}}{3 \cdot (U_{\text{ном.дв.}} + 3600) \cdot \sqrt[3]{n}}, \quad (5.8)$$

где $S_{\text{ном.дв.}}$ - полная мощность электродвигателя, кВ·А;
 $U_{\text{ном.дв.}}$ – номинальное напряжение двигателя, В;
 n – синхронная скорость вращения двигателя, об/мин.

Для неявнополюсных синхронных и асинхронных двигателей $C_{\text{дв}}$ определяется по формуле:

$$C_{\text{дв}} \approx \frac{0,0187 \cdot S_{\text{ном.дв.}} \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{U_{\text{ном.дв.}} \cdot (1 + 0,08 \cdot U_{\text{ном.дв.}})}}, \quad (5.9)$$

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

Точное значение емкостного тока кабельной линии $I_{\text{с.кл}}$ с бумажной изоляцией определяется из таблицы 5.2.

Таблица 5.2

Значение емкостного тока кабельной линии

Сечение жил кабеля, мм ²	Удельное значение емкостного тока $I_{\text{с}}$, А/км при напряжении сети	
	6 кВ	10 кВ
16	0,40	0,55
25	0,50	0,65
35	0,58	0,72
50	0,68	0,80
70	0,80	0,92
95	0,90	1,04
120	1,00	1,16
150	1,18	1,30
185	1,25	1,47
240	1,45	1,70

В сетях с резистивным заземлением нейтрали суммарное значение тока ОЗЗ определяется по формуле:

$$I_{\text{ОЗЗ}}^{(1)} = \sqrt{I_{\text{с}\Sigma}^2 + I_R^2}, \quad (5.10)$$

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 линий 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 защиты.

Для проверки чувствительности защиты выполняем оценку коэффициента чувствительности при ОЗЗ:

$$k_{\text{ч}}^{(1)} = \frac{I_{\text{ОЗЗ}\Sigma}^{(1)}}{3I_{\text{с.з}}}, \quad (5.11)$$

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

Значение коэффициента чувствительности должно быть больше или равно 1,5.

5.2. Расчет уставок защиты от двойных замыканий на землю

Защита необходима в случае использования защиты от однофазных замыканий на землю, работающей с выдержкой времени для отстройки от переходных процессов.

Защита работает без выдержки времени и должна выполняться с параметрами срабатывания по току 50 – 200 А.

Ток срабатывания защиты должен быть отстроен от максимального значения тока небаланса, соответствующего пусковому току электродвигателя. В сетях с резистивным заземлением нейтрали через высокоомный резистор токи обратной последовательности преобразуются в токи нулевой

последовательности. Параметр срабатывания защиты по току определяется из формулы:

$$I_{с.з} = k_{отс} \cdot k_{нес} \cdot I_{пуск.дв} = k_{отс} \cdot k_{нес} \cdot k_{п} \cdot I_{ном.дв}, \quad (5.12)$$

где $k_{отс} = 1,05$ – коэффициент отстройки;

$k_{нес} = 0,025$ – коэффициент, показывающий допустимое значение токов нулевой последовательности, обусловленных резистивным заземлением нейтрали при несимметрии напряжения питающей сети и разбросом индуктивных сопротивлений фазных обмоток электродвигателя (для сетей с изолированной нейтралью принимают $k_{нес} = 0,015$);

$I_{пуск.дв}$ – пусковой ток электродвигателя, А;

$k_{п}$ – коэффициент пуска;

$I_{ном.дв}$ – номинальный ток электродвигателя, А.

5.3. Направленная токовая защита от однофазных замыканий на землю

Направленная токовая защита от ОЗЗ может применяться для выполнения селективности в сетях и как дополнительный способ повышения чувствительности защиты в сетях с изолированной или резистивно-заземленной нейтралью.

Применение направленной защиты в сетях с изолированной нейтралью необходимо только в случаях, когда собственный ёмкостный ток защищаемого присоединения ($I_{емк.дв} + I_{емк.кл}$) больше или сравним с суммарным значением тока $I_{ОЗЗ\Sigma}^{(1)}$.

Необходимым условием применения направленной защиты является обеспечение суммарного тока при ОЗЗ на защищаемом присоединении – не менее 40% от номинального тока трансформатора тока нулевой последовательности (угловая погрешность ТТНП не превышает 36° , см. рис. 5.2.

Направленная защита от ОЗЗ применяется в сетях с изолированной нейтралью и резистивным заземлением нейтрали.

При повреждении измерительных цепей напряжения защита должна переводиться в ненаправленный режим, при этом возможно её неселективное действие.

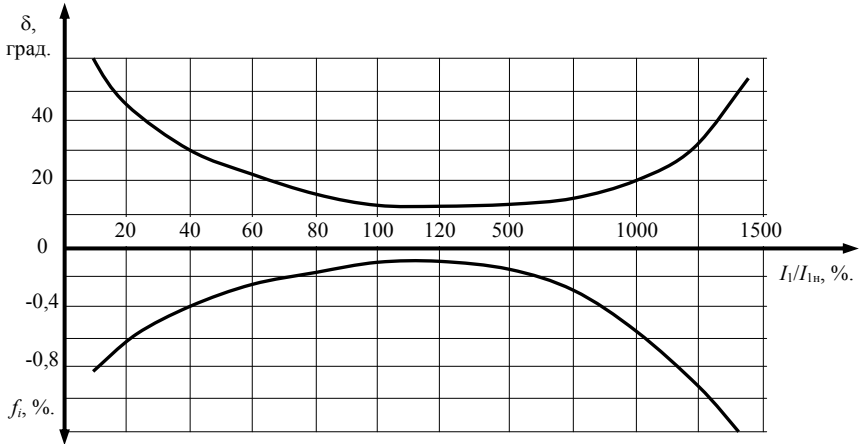


Рис. 5.2. Зависимость токовой f_i и угловой δ погрешности некомпенсированного ТТ от кратности протекаемого первичного тока I_1 к номинальному току ТТНП $I_{1н}$

Для повышения чувствительности – защита выполняется с выдержкой времени 0,1 с.

Время срабатывания токовой защиты от ОЗЗ $t_{с.з} = 0,1$ с выбрано по условию отстройки от длительности переходных процессов.

Значение параметра срабатывания защиты выбирается исходя из соблюдения условия:

$$I_{сз} < I_{ОЗЗ}^{(1)} \cdot \quad (5.13)$$

Характеристика направленной защиты от ОЗЗ для сети с изолированной нейтралью приведена на рисунке 5.3.

Характеристика направленной защиты от ОЗЗ для сети с нейтралью заземленной через высокоомный резистор приведена на рисунке 5.4.

Угол максимальной чувствительности $\varphi_{\text{мч}}$ регулируемый.

Для сети с изолированной нейтралью рекомендуется устанавливать угол $\varphi_{\text{мч}}$ равным минус 36° . Это обусловлено тем, что емкостной ток сети на поврежденном присоединении будет отставать от напряжения нулевой последовательности U_0 на 90° , при этом возможные угловые погрешности трансформаторов тока нулевой последовательности компенсируются смещением характеристики на указанный угол.

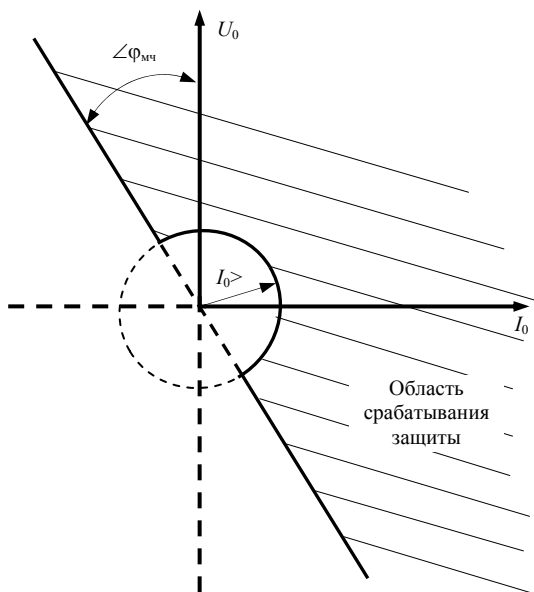


Рис. 5.3. Характеристика выполнения направленной защиты от ОЗС для сетей с изолированной нейтралью

Для сети с нейтралью заземленной через высокоомный резистор вектор тока ОЗС (см. рис. 5.4) будет находиться в 4-м квадранте, рекомендуется устанавливать угол $\varphi_{\text{мч}}$ равным плюс 45° . В этом случае рекомендуется проверка корректности работы реле

направления мощности нулевой последовательности на основании расчета угла тока сети при ОЗЗ на поврежденном соединении.

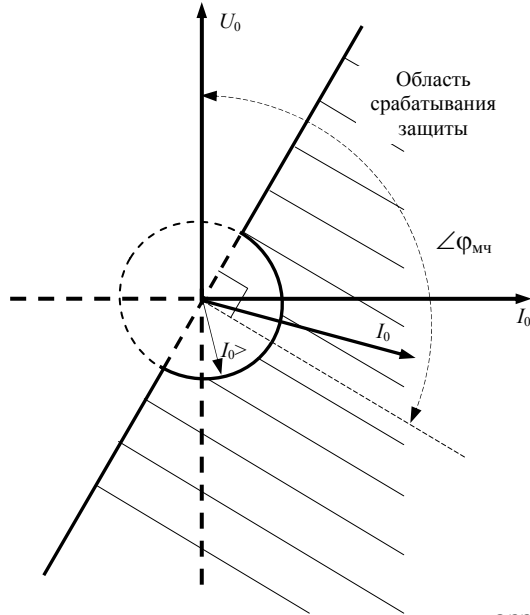


Рис. 5.4. Характеристика выполнения направленной защиты от ОЗЗ для сетей с нейтралью заземленной через высокоомный резистор

Расчет угла между вектором тока I_0 и вектором напряжения U_0 при ОЗЗ осуществляется на основании суммарного емкостного тока ОЗЗ сети и номинального сопротивления резистора нейтрали:

$$\varphi_{I_0 U_0} = 90^\circ + \arcsin\left(\frac{I_{\text{акт}}}{I_{\text{емк}}^2 + I_{\text{акт}}^2}\right), \quad (5.14)$$

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

6. РАСЧЕТ ЗАЩИТ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

6.1. Требования ПУЭ к защитам минимального напряжения электродвигателей

Для облегчения условий восстановления напряжения после отключения КЗ и обеспечения самозапуска электродвигателей ответственных механизмов следует предусматривать отключение защитой минимального напряжения электродвигателей неответственных механизмов суммарной мощностью, определяемой возможностями источника питания и сети по обеспечению самозапуска.

Выдержки времени защиты минимального напряжения должны выбираться в пределах от 0,5 до 1,5 с – на ступень больше времени действия быстродействующих защит от многофазных КЗ, а уставки по напряжению должны быть, как правило, не выше 70% номинального напряжения.

Эти же средства могут быть использованы для отключения неответственных синхронных электродвигателей, а также для предупреждения несинхронного включения отключенных двигателей, если токи выключения превышают допустимые значения.

В электроустановках промышленных предприятий в случаях, когда не может быть осуществлен одновременный самозапуск всех электродвигателей ответственных механизмов (сохранение которых в работе после кратковременных перерывов питания или понижения напряжения, обусловленных отключением КЗ, действием АПВ или АВР, необходимо по технологическим условиям и допустимо по условиям техники безопасности), следует применять отключение части таких ответственных механизмов и их автоматический повторный пуск по окончании самозапуска первой группы электродвигателей. Включение последующих групп может быть осуществлено по току, напряжению или времени.

Защита минимального напряжения с выдержкой времени не более 10 с и уставкой по напряжению, как правило, не выше 50% номинального напряжения должна устанавливаться на

электродвигателях ответственных механизмов также в случаях, когда самозапуск механизмов после останова недопустим по условиям технологического процесса или по условиям безопасности и, кроме того, когда не может быть обеспечен самозапуск всех электродвигателей ответственных механизмов.

Кроме указанных случаев эту защиту следует использовать также для обеспечения надежности пуска АВР электродвигателей взаиморезервируемых механизмов.

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

6.2. Исполнение защиты минимального напряжения с применением блоков БМРЗ

Защита минимально напряжения применяется для защиты только АД. Защита выполняется двухступенчатой.

Первая ступень защиты предназначена для отключения неответственных электродвигателей, не участвующих в самозапуске с целью облегчения процесса самозапуска, и выполняется с напряжением срабатывания:

$$U_{\cdot} = (0,6 \div 0,7) \cdot U_{\text{ном дв}}, \text{ В.} \quad (6.1)$$

Время срабатывания этой ступени составит $t_{\text{зmn}} = 0,5 \div 0,9$ с.

Вторая ступень защиты предназначена для отключения всех электродвигателей при длительном исчезновении напряжения по условиям технологического процесса и техники безопасности. Она выполняется с параметром срабатывания по напряжению (по условию возврата при самозапуске электродвигателей):

$$U_{\cdot} = (0,4 \div 0,5) \cdot U_{\text{ном дв}} \quad (6.2)$$

Время срабатывания второй ступени составляет $t_{\text{змн}} = 3 \div 9$ с. Значение времени срабатывания защиты выбирается в зависимости от скорости затормаживания основных АД.

Такая настройка защиты предназначена для отключения ответственных АД при длительном отсутствии напряжения по требованиям безопасности или для последовательного пуска механизмов при невозможности их одновременного разворота.

Если присоединенные массы на валу АД большие, и электродвигатели затормаживаются медленно, время срабатывания защиты выбирают из диапазона $t_{\text{змн}} = 6 \div 9$ с. Если электродвигатели затормаживаются быстро, то время действия защиты выбирают менее 6 с.

Список электродвигателей, участвующих и неучаствующих в самозапуске, всегда утверждается главным инженером предприятия.

7. ЗАЩИТА ОТ ПОТЕРИ ПИТАНИЯ

7.1. Общие сведения

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

Требования ПУЭ к защитам от потери питания электродвигателей.

При наличии синхронных электродвигателей, если напряжение на отключенной секции затухает медленно, в целях ускорения действия АВР и АПВ может быть применено гашение поля синхронных электродвигателей ответственных механизмов с помощью защиты минимальной частоты или других способов, обеспечивающих быструю фиксацию потери питания.

Эти же средства могут быть использованы для отключения неответственных синхронных электродвигателей, а также для предупреждения несинхронного включения отключенных двигателей, если токи включения превышают допустимые значения.

7.2. Выполнение защиты от потери питания синхронных электродвигателей на базе блоков БМРЗ

Защита от потери питания может быть организована на следующих принципах:

1. Понижение напряжения. Поскольку при потере питания напряжение генерируется синхронными двигателями, то процесс снижения напряжения на шинах СД характеризуется большой длительностью, поэтому по такому принципу ЗПП не выполняется.

Защита минимального напряжения, выполненная по такому принципу, применяется как вспомогательная.

2. Снижение частоты. В чистом виде этот принцип не используется, так как устройства, выполненные по этому принципу, не способны различить снижение частоты при потере питания от снижения частоты при дефиците мощности в энергетической системе при системных авариях. При этом отключение СД не только будет излишним, но и может усугубить дефицит реактивной мощности в энергосистеме.

3. Устройства, контролирующие снижение частоты на разных секциях подстанции с синхронными двигателями. Схема работает только при питании секций подстанции от отдельных вводов и используется только для частотного пуска устройства АВР секционного выключателя.

4. Устройства, реагирующие на скорость снижения частоты, могут применяться только в тех случаях, когда скорость снижения частоты при выбеге двигателя в $3 \div 4$ раза превышает скорость снижения частоты при аварийном дефиците мощности в энергосистеме, т.е. может применяться не всегда, кроме того скорость снижения частоты при выбеге синхронных двигателей зависит от их нагрузки.

5. Устройства, построенные на принципе изменения направления активной мощности. Данные устройства не отстроены от качаний, возможна их ложная работа, кроме того, они имеют большую выдержку времени из-за необходимости согласования с релейной защитой от замыканий на землю

отходящих от шин, питающих подстанции смежных линий электропередачи.

6. Схема, реагирующая на снижение частоты и изменение направления активной мощности избавлена от недостатков предыдущих схем, и является наиболее универсальной, поэтому рекомендуется применять данную схему защиты от потери питания.

Параметр срабатывания реле минимальной частоты выбирается меньше значения частоты срабатывания первой ступени АЧР-1:

$$f_{сз} = (48,3 \div 48,4) \text{ Гц.} \tag{7.1}$$

Блокировка по направлению мощности позволяет выполнить эту защиту быстродействующей. Время срабатывания защиты составляет $t_{сз} = (0,3 \div 0,4) \text{ с}$ (на основе опыта эксплуатации синхронных двигателей ОАО «Газпром»).

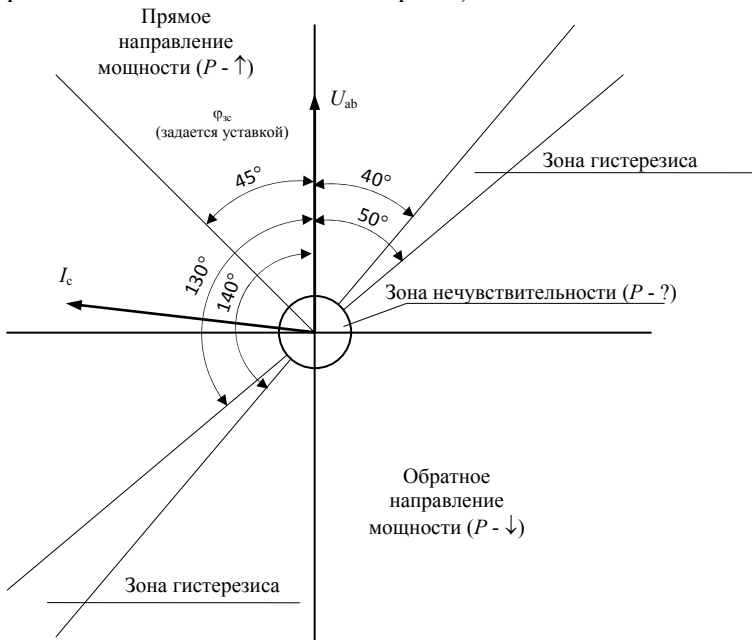


Рис. 7.1. Характеристика реле активной мощности

При определении направления мощности блок БМРЗ по состояниям цифровых реле направления мощности для каждой из пар входных сигналов I_A , U_{BC} и I_C , U_{AB} определяет направление активной мощности P в присоединении, либо сигнализирует о неправильной фазировке. Цифровые реле активной мощности БМРЗ имеют характеристику, показанную на рисунке 7.1.

Поскольку цифровое реле направления мощности включается по 90-градусной схеме, значение уставки $\varphi_{ЗС}$ следует выбирать из диапазона $30^\circ \div 60^\circ$.

8. ЗАЩИТА ОТ НЕПОЛНОФАЗНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

8.1. Требования ПУЭ к защите двигателей от неполнофазных режимов работы

Неполнофазный режим работы трехфазных электродвигателей приводит к недопустимому разогреву зубцов ротора, пазовых клиньев и бандажных колец.

Согласно требованиям «ПУЭ» для электродвигателей, которые защищаются от токов КЗ предохранителями, не имеющими вспомогательных контактов для сигнализации об их перегорании, должна предусматриваться защита от перегрузки в двух фазах. Однако ввиду возможности обрыва фазы на линии внешнего электроснабжения рекомендуется применять защиту от неполнофазного режима для всех двигателей.

8.2. Исполнение защиты от неполнофазного режима на базе блоков БМРЗ и выбор её уставок

Ток в каждой из двух рабочих фаз при неполнофазном режиме работы электродвигателя составляет:

$$I_{дв} = (1,6 \div 2,5) I_{дв.ном.} \quad (8.1)$$

При работе электродвигателя в неполнофазном режиме значения токов прямой и обратной последовательности равны.

Защита срабатывает при выполнении двух условий:

- превышение тока, потребляемого электродвигателем в двух фазах значения $1,6 I_{\text{ном.дв}}$;
- значение тока обратной последовательности превышает 0,3 от значения тока прямой последовательности.

Время срабатывания защиты на отключение электродвигателя выбирается из диапазона $(0,5 \div 1)$ с и отстраивается от времени ликвидации неполнофазного режима системами автоматики внешнего электроснабжения.

На основе принципа защиты от неполнофазного режима выполнена диагностика целостности вторичных токовых цепей трансформаторов тока. Если значение тока обратной последовательности превышает 0,3 от значения тока прямой последовательности, а значения фазных токов электродвигателя не превышает значения $1,6 I_{\text{ном.дв}}$ – это признак нарушения вторичных токовых цепей трансформаторов тока.

9. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ПЕРЕГРУЗОК

9.1. Требования ПУЭ к защите электродвигателей от перегрузок

Защита от перегрузки должна предусматриваться на электродвигателях:

- 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 вследствие понижения напряжения в сети.

Защиту от перегрузки следует предусматривать в одной фазе с зависимой или независимой от тока выдержкой времени, отстроенной от длительности пуска электродвигателя в нормальных условиях и самозапуска после действия АВР и АПВ. Выдержка времени защиты от перегрузки синхронных электродвигателей во избежание излишних срабатываний при длительной форсировке

возбуждения должна быть по возможности близкой к наибольшей допустимой по тепловой 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 дежурного персонала;
- на электродвигателях механизмов с тяжелыми условиями запуска или самозапуска.

Для электродвигателей, которые защищаются от токов КЗ предохранителями, не имеющими вспомогательных контактов для сигнализации об их перегорании, должна предусматриваться защита от перегрузки в двух фазах.

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

9.2. Исполнение защиты двигателей от перегрузок на базе блоков БМРЗ

В блоках БМРЗ предусмотрено два варианта исполнения защиты двигателя от перегрузок: в виде защиты от симметричных перегрузок и в виде тепловой защиты.

К достоинствам защиты от симметричных перегрузок, выполняемой по максимальному фазному току, следует отнести её простоту и простой способ расчета уставок. К недостатку 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 (охладителя). 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 точной возможности учёта погрешности измерения, отсутствует обобщенный опыт её применения, существующие тепловые модели не учитывают отдельные индивидуальные особенности деталей электрических машин.

Рекомендуется применение защиты от симметричных перегрузок с действием на отключение, а действие защиты на базе тепловой модели рекомендуется на сигнализацию.

Решение о действии тепловой защиты на отключение 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 технологическому процессу вследствие неправильного отключения электродвигателя.

9.3. Методика расчета уставок защиты от симметричных перегрузок

Защита электродвигателя от симметричных перегрузок выполняется трёхступенчатой в соответствии с рисунком. Защита работает по максимальному фазному току. Каждая ступень может быть введена и выведена независимо от других.

Основной характеристикой является вторая ступень, она является защитой от любых перегрузок и должна соответствовать перегрузочной характеристике двигателя.

Первая ступень предназначена для быстрого отключения двигателя в случае блокировки ротора, а также выполняет функцию ближнего резервирования при отказе максимальной токовой защиты. Третья ступень действует на сигнализацию при малой кратности перегрузки за заранее заданный отрезок времени.

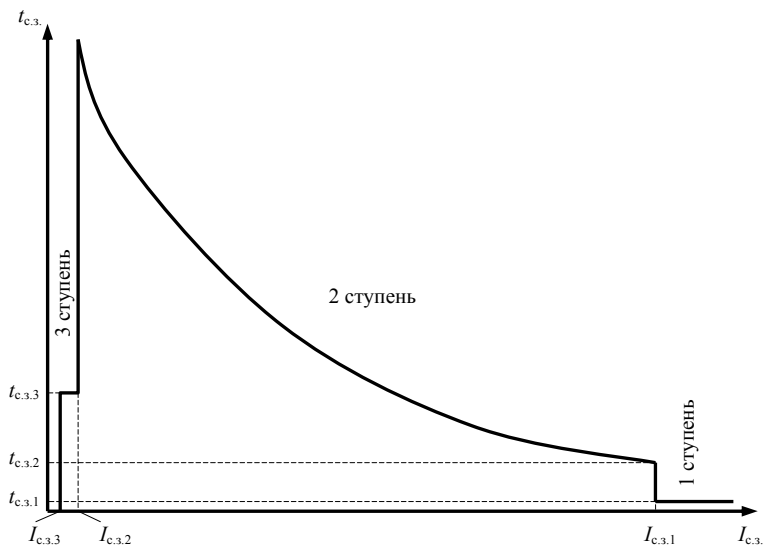


Рис. 9.1. Характеристика трехступенчатой защиты от перегрузок

Первая ступень защиты выполняется с независимой характеристикой и работает с выдержкой времени и действием на отключение электродвигателя. Ток срабатывания защиты отстраивается от пускового тока электродвигателя и определяется по формуле:

$$I_{с.з.1} = \frac{1,2 \cdot k_{\text{пуск}}}{k_{\text{в}}} \cdot I_{\text{ном.дв}}, \quad (9.1)$$

где $k_{\text{пуск}}$ – кратность пускового тока электродвигателя;

$k_B = 0,95$ – коэффициент возврата (уточняется в руководстве по эксплуатации на конкретное изделие).

Время срабатывания первой ступени защиты принимают равным $t_{сз.1} = 0,1$ с. Это время позволяет выполнить отстройку срабатывания первой ступени от броска пускового тока электродвигателя.

Вторая ступень защиты выполняется с инверсной характеристикой и работает с действием на отключение электродвигателя.

Время срабатывания защиты определяется по формуле:

$$t_{сз.} = \frac{A}{k_*^2 - 1}, \quad (9.2)$$

где A – значение тепловой постоянной времени охлаждения статора для защищаемого электродвигателя. Значение A может находиться в диапазоне $60 \div 300$ с, в зависимости от типа защищаемого двигателя;

k_* – кратность тока статорной обмотки двигателя.

Ток срабатывания второй ступени определяется по формуле:

$$I_{сз.2} = \frac{1,08}{k_B} \cdot I_{ном.дв}, \quad (9.3)$$

В случае, если производитель не предоставил значение тепловой постоянной времени охлаждения статора в дальнейших расчетах можно использовать минимально допустимую постоянную времени охлаждения статора.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства изготавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52776-2007 (введен 01.01.2008), 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 ранее 01.07.2010, могут быть изготовлены по ГОСТ 183-74. Двигатели, изготовленные по ГОСТ

183-74, также должны соответствовать приведенному выше требованию.

Исходя из указанных требований, можно рассчитать минимально допустимую постоянную времени охлаждения статора:

$$A = t_{\text{доп}} \cdot (k_i^2 - 1) = 120 \cdot (1.5^2 - 1) = 150 \text{ с}, \quad (9.4)$$

где $t_{\text{доп}}$ допустимое время работы при кратности тока k_i .

Третья ступень защиты выполняется с независимой характеристикой и работает с действием на сигнализацию. Предназначена для применения на объектах с дежурным персоналом. Ток срабатывания третьей ступени определяется по формуле:

$$I_{\text{сз.3}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot I_{\text{ном.дв}}, \quad (9.5)$$

где $k_{\text{отс}} = 1,05$ – коэффициент отстройки защиты от симметричных перегрузок;

$k_{\text{в}} = 0,95$ – коэффициент возврата (уточняется в руководстве по эксплуатации на конкретное изделие).

Если двигатель не подвержен технологическим перегрузкам – время срабатывания защиты выбирается из диапазона $10 \div 20$ с (больше, чем время пуска электродвигателя). Если двигатель подвержен перегрузкам, время выбирается большим, чем допустимое время технологической перегрузки, как правило, $10 \div 1800$ с (также отстраивается от времени пуска электродвигателя).

9.4. Методика выбора уставок защиты от затянутого пуска

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

Уставка по времени защиты от затянутого пуска $t_{\text{п}}$ должна быть отстроена от максимального времени пуска (самозапуска) электродвигателя с учетом увеличения времени пуска из-за возможного снижения напряжения на 10%.

Уставка по току защиты от затянутого пуска и блокировки выбирается меньше пускового тока электродвигателя, но больше максимального тока перегрузки двигателя. Например, для двигателя с кратностью пускового тока $7I_{\text{ном.дв}}$ и максимальным током перегрузки $1,5I_{\text{ном.дв}}$, значение уставки может быть выбрано равным $5I_{\text{ном.дв}}$.

9.5. Методика расчета уставок тепловой защиты электродвигателей

Тепловая защита электродвигателя предназначена для предотвращения повреждения изоляции электродвигателя вследствие теплового действия токов обусловленных симметричными и несимметричными перегрузками, (блокировкой ротора, затянувшимся пуском и самозапусками, обрывов фаз питающей сети и т.д.). Тепловая защита базируется на тепловой модели двигателя, которая позволяет оценить перегрев двигателя косвенно – по значению и длительности протекания тока в обмотках статора.

Часто в высоковольтных электродвигателях устанавливаются датчики измерения температуры в обмотки и активное железо статора. Таким образом, обеспечивается тепловая защита электродвигателя на базе непосредственного измерения температуры. Следует отметить, что такая мера защиты, эффективная для низковольтных электродвигателей, часто оказывается менее эффективной для высоковольтных ввиду большой толщины изоляции и массы железа а, следовательно, и гораздо больших постоянных времени нагрева и охлаждения.

По этой причине для защиты двигателя от перегрева следует рекомендовать использование тепловой защиты на базе тепловой модели двигателя.

Поскольку при нагреве двигателя критической величиной является температура, которую может выдержать его изоляция, очевидно, что при колебаниях температуры окружающей среды двигатель может допускать большую или меньшую величину и

длительность перегрузки. Для более полного использования перегрузочных способностей двигателя рекомендуется, при наличии в терминале возможности подключения датчика температуры окружающей среды, использование такого датчика. Отметим, что ГОСТ Р 52776-2007 допускает увеличение предельно допустимого значения перегрева не более чем на 40°C (при температуре окружающей среды 0°C, зависит от класса изоляции).

Рассмотрим работу тепловой модели двигателя. Относительная величина перегрева статорных обмоток электродвигателя $E_{\text{нагр}},\%$ (в процентах, за 100% принята относительная величина перегрева при длительной работе с номинальной нагрузкой, 0% – обмотки имеют температуру окружающей среды) за временной интервал работы (нагрева) электродвигателя $t_{\text{нагр}}$ определяется микропроцессорной системой терминала из выражения:

$$E_{\text{нагр},\%} = 100 \cdot \left(\frac{I_{\text{экв}}}{I_{\text{ш}}} \right)^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{нагр}}}{T_{\text{e1}}}} \right) + E_{0,\%} \cdot e^{-\frac{t_{\text{нагр}}}{T_{\text{e1}}}}, \% \quad (9.6)$$

где $I_{\text{экв}}$ – эквивалентный ток электродвигателя, А;

$I_{\text{ш}}$ – штатный ток электродвигателя, А;

$E_{0,\%}$ – относительная величина перегрева двигателя на момент начала процесса нагрева, %;

T_{e1} – постоянная времени нагрева электродвигателя, мин;

$t_{\text{нагр}}$ – время нагрева, мин.

В выражение контроллер терминала подставляет рассчитанное значение эквивалентного тока $I_{\text{экв}}$ и время работы электродвигателя $t_{\text{нагр}}$ 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 рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{I_{\text{фазн.макс}}^2 + 3 \cdot I_2^2}, \text{ А}, \quad (9.7)$$

где $I_{\text{фазн.макс}}$ – значение максимального из фазных токов, А;

I_2 – значение тока обратной последовательности, А.

Значение текущего перегрева при охлаждении остановленного электродвигателя $E_{\text{охл, \%}}$ может быть определено из выражения:

$$E_{\text{охл, \%}} = E_{0, \%} \cdot e^{-\frac{t_{\text{охл}}}{T_{e2}}} \% , \quad (9.8)$$

где $E_{0, \%}$ – величина перегрева двигателя на момент начала процесса охлаждения, %;

T_{e2} – постоянная времени охлаждения электродвигателя, мин;

$t_{\text{охл}}$ – время охлаждения, мин.

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

Характеристика работы защиты представлена на рисунке 9.2.

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

Для настройки защиты используются следующие характеристики электродвигателя:

- $I_{\text{ш}}$ – штатный ток двигателя (выбирается равным номинальному току двигателя);

- T_{e1} – постоянная времени нагрева электродвигателя (задаётся заводом изготовителем или определяется экспериментально), мин;

- T_{e2} – постоянная времени охлаждения электродвигателя (задаётся заводом изготовителем или определяется экспериментально), 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 предельно-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.

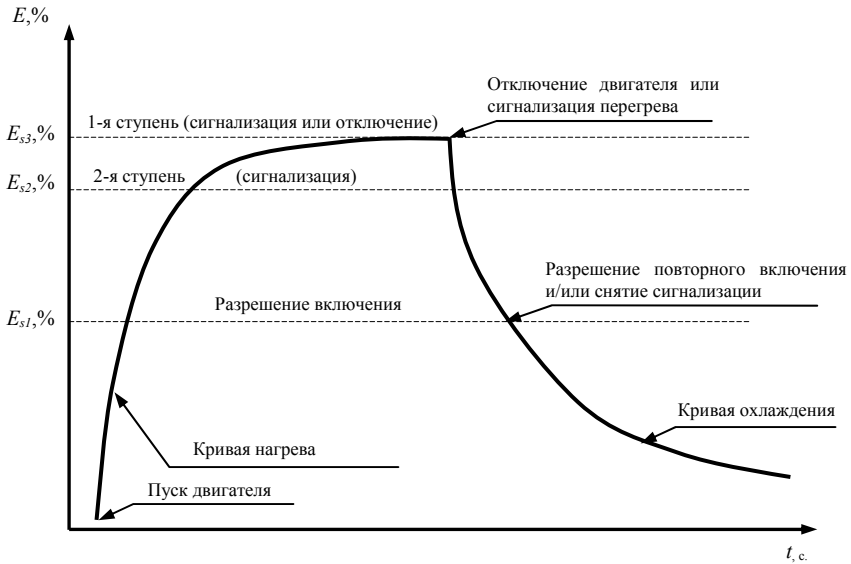


Рис. 9.2. Характеристика работы тепловой модели

Исходя из указанных требований (п. 9.3), рассчитываем минимально допустимую постоянную времени охлаждения статора (9.4)

Определим минимально допустимую постоянную времени нагрева электродвигателя T_{e1} по формуле

$$\frac{A}{T_{e1} \cdot 60} = \ln \left(\frac{k^2 - 1}{k^2 - k_{max}} \right), \quad (9.9)$$

откуда имеем

$$T_{e1} = \frac{A}{60 \cdot \ln\left(\frac{k^2 - 1}{k^2 - k_{max}}\right)}, \text{ мин} \quad (9.10)$$

где k_{max} – предельная кратность перегрева относительно перегрева при номинальном токе, определяется классом изоляции двигателя (см. таблицу 9.1, таблица составлена для работы двигателя при температуре окружающей среды 40°C; 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 B , при других условиях работы машины требуется дополнительный расчет).

Таблица 9.1

Предельно допустимая температура перегрева

Класс изоляции	A	E (исп. по A)	B (исп. по E)	F (исп. по B)	H (исп. по F)
Предельно допустимая температура перегрева, °C	65	80	90	115	140
k_{max}	–	1,231	1,125	1,278	1,217

Постоянную времени охлаждения T_{e2} выбираем пропорционально эффективности работы системы охлаждения на остановленном электродвигателе. При наличии системы охлаждения, эффективность которой не зависит от скорости вращения вала (вентилятор, закрепленный на валу двигателя и т.п.), величина равна постоянной времени нагрева. Если двигатель охлаждается вентилятором, закрепленным на валу, T_{e2} , как правило, в $2 \div 4$ раза больше постоянной времени нагрева.

Для полного использования перегрузочных возможностей машины рекомендуется при проведении пуско-наладочных работ экспериментальное определение реальных постоянных времени нагрева и охлаждения.

Для расчета параметра E_{S1} необходимо на основе времени пуска и пускового тока определить расчётную относительную величину нагрева двигателя за время пуска:

$$E_{\text{пуск}} = k_{\text{пуск}}^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{п}}}{T_{\text{el}}}} \right) \cdot 100\% , \quad (9.11)$$

где $k_{\text{пуск}}$ – кратность пускового тока машины (как правило, $3 \div 8 I_{\text{ном.дв}}$);

$E_{\text{пуск}}$ – относительный расчётный нагрев двигателя за время пуска, %.

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

$$E_{S1} \leq 100\% - E_{\text{пуск}}\% . \quad (9.12)$$

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

$$E_{S2,3} = 100\% \cdot \left(\frac{I_{\text{дв}}}{I_{\text{дв.ном}}} \right)^2 , \quad (9.13)$$

где 100% – относительная температура нагрева двигателя, когда по его статорным обмоткам протекает номинальный ток;

$I_{\text{дв}}$ – ток, потребляемый электродвигателем;

$I_{\text{дв.ном}}$ - номинальное значение тока электродвигателя;

Для первой ступени (сигнализация или отключение):

$$\frac{I_{\text{дв}}}{I_{\text{дв.ном}}} = 1,1 , \text{ соответственно, } E_{S3} = 100\% \cdot (1,1)^2 \approx 121\% .$$

Величина 1,1 выбрана исходя из допустимой возможной длительной работы электродвигателя в сети с напряжением составляющим 90 % от номинального.

Для второй ступени (сигнализация):

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

Величина 0,9 выбрана исходя из возможной длительной работы двигателя в сети с напряжением составляющим 110% от номинального.

Для обеспечения более точной работы тепловой защиты электродвигателя рекомендуется выполнять измерение температуры окружающей среды с помощью датчика температуры, подключенного к соответствующему входу (при его наличии) терминала. Датчик должен быть установлен в условиях окружающей среды аналогичных тем, в которых работает двигатель.

10. РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА

10.1. Требования ПУЭ к защите синхронных двигателей от асинхронного режима

На синхронных электродвигателях должна предусматриваться защита от асинхронного режима, которая может быть совмещена с защитой от токов перегрузки.

Защита синхронных электродвигателей от асинхронного режима может осуществляться при помощи реле, реагирующего на увеличение тока в обмотках статора; она должна быть отстроена по времени от пускового режима и тока при действии форсировки возбуждения.

Защита, как правило, должна выполняться с независимой от тока характеристикой выдержки времени. Допускается применение защиты с зависимой от тока характеристикой на электродвигателях с отношением КЗ более 1.

Отношением короткого замыкания ОКЗ называется отношение установившегося тока трехфазного короткого замыкания I_{k0} при токе возбуждения i_0 , который при холостом ходе создает $E = U_n$, к номинальному току якоря I_n (рис. 10.1):

$$\text{ОКЗ} = \frac{I_{k0}}{I_H} = \frac{i_{f0}}{i_{fk}}, \quad (10.1)$$

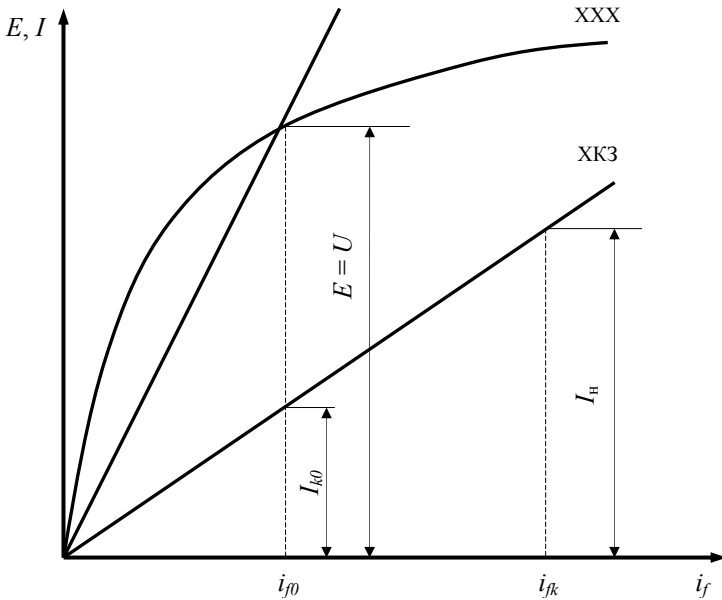


Рис. 10.1. Отношение тока короткого замыкания

Величина ОКЗ у явнополюсных генераторов составляет $0,8 \div 1,8$, у неявнополюсных – $0,5 \div 1,0$, и определяет предельное значение нагрузки, которую способен нести генератор при установившемся режиме работы.

При выполнении схемы защиты должны приниматься меры по предотвращению отказа защиты при биениях тока асинхронного режима. Допускается применение других способов защиты, обеспечивающих надежное действие защиты при возникновении асинхронного режима.

Защита синхронных электродвигателей от асинхронного режима должна действовать с выдержкой времени на одну из схем, предусматривающих:

- ресинхронизацию;
- ресинхронизацию с автоматической кратковременной разгрузкой механизма до такой нагрузки, при которой обеспечивается втягивание электродвигателя в синхронизм (при допустимости кратковременной разгрузки по условиям технологического процесса);
- отключение электродвигателя и повторный автоматический пуск;
- отключение электродвигателя (при невозможности его разгрузки или ресинхронизации, при отсутствии необходимости автоматического повторного пуска и ресинхронизации по условиям технологического процесса).

10.2. Выполнение защиты синхронных двигателей от асинхронного режима (потери возбуждения) на базе терминалов БМРЗ

Длительная работа синхронных двигателей (СД) в асинхронном режиме (потеря возбуждения) приводит к тепловым перегрузкам и перегреву обмотки статора и демпферных контуров ротора. Защита СД от потери возбуждения, как правило, выполняется на основе максимальной токовой защиты с регулируемым временем возврата. Однако, такое исполнение защиты не позволяет защитить СД работающих с технологическими перегрузками. Поэтому целесообразно всегда выполнять защиту от асинхронного режима аналогично защите синхронных генераторов – на основе реле сопротивления.

По аналогии с генератором, проанализируем сопротивление на выводах питания двигателя (рис. 10.2). При нормальном режиме работы (с опережающим $\cos\varphi = 0,9$) вектор полного сопротивления прямой последовательности на выводах питания двигателя

находится во 2-м квадранте (двигатель отдает реактивную мощность, потребляет активную).

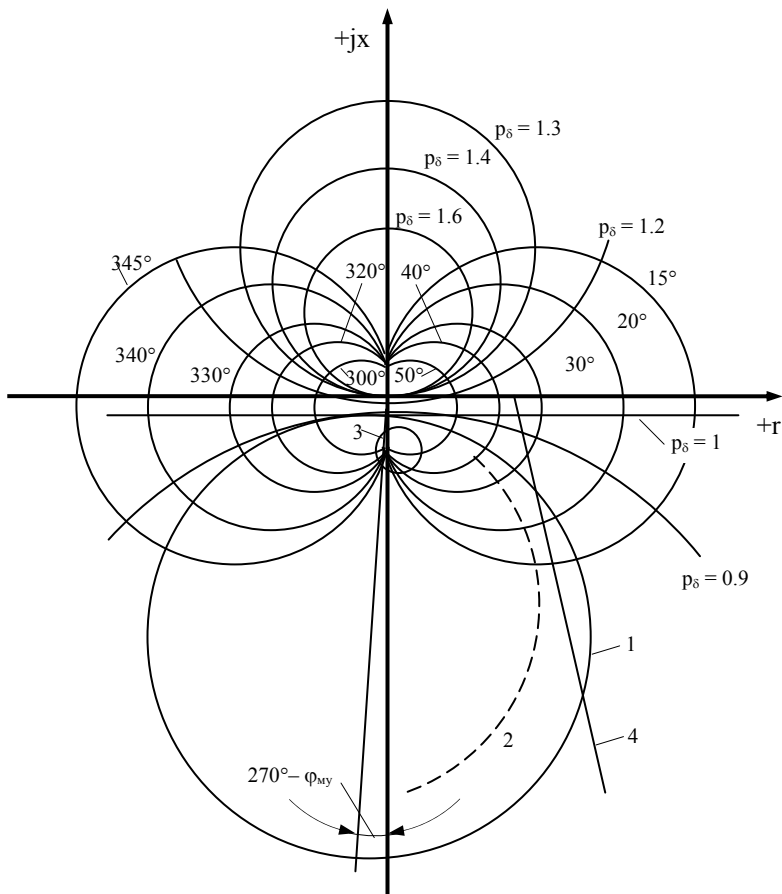


Рис. 10.2. Круговые диаграммы полного сопротивления на выводах синхронной машины и характеристика реле

При потере возбуждения двигатель начинает потреблять из сети значительную реактивную мощность, при этом продолжает

потреблять активную мощность. При этом вектор полного сопротивления смещается в 3-й квадрант. Поэтому реле сопротивления включается так, чтобы окружность его характеристики размещалась в 3-м и 4-м квадрантах.

Согласно экспериментальным исследованиям, сопротивление на выводах синхронной машины при потере возбуждения может изменяться в диапазоне от $(0,3 \div 0,5) \cdot x_d''$ до $(1,1 \div 1,4) \cdot x_d$ (рис. 10.2, кривая 1), где x_d'' – сверхпереходное сопротивление СД, Ом, x_d – индуктивное сопротивление прямой последовательности СД, Ом.

В соответствии с вышесказанным, характеристика области срабатывания защиты выполняется в виде окружности, расположенной симметрично на комплексной плоскости относительно оси jx и проходит через точки с координатами: $(0,3 \div 0,5) \cdot x_d''$ до $(1,1 \div 1,4) \cdot x_d$.

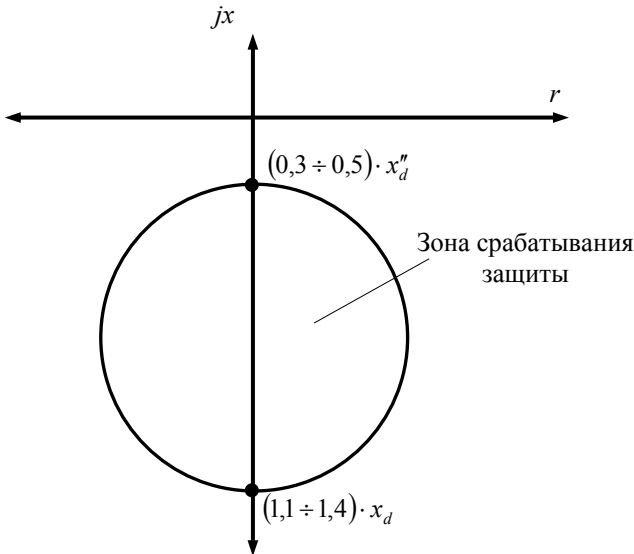


Рис. 10.3. Характеристика защиты электродвигателя от потери возбуждения

Время срабатывания защиты принимают $1 \div 2$ 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 корректность выявления потери возбуждения и простоту расчёта уставок, а к недостаткам – зависимость от исправности измерительных цепей напряжения.

11. ВЫБОР УСТАВОК УСТРОЙСТВА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ПРИ ОТКАЗЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Функция устройства резервирования при отказе выключателя (УРОВ) предназначена для отключения смежных выключателей электрической сети при отказе выключателя электродвигателя. «ПУЭ» не требует применения УРОВ для электроустановок напряжением 6 – 10 кВ. 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 нулевое значение тока (при исправном выключателе). Если после выдачи сигнала на отключение выключателя терминал продолжает контролировать ток (отличный от нулевого) на отключаемом присоединении, то с выдержкой времени формируется выходной сигнал «УРОВ_д».

Ток пуска УРОВ выбирают из диапазона:

$$I_{с.з} = (0,05 \div 0,20) I_{ном.дв.} \quad (11.1)$$

Исходя из вышеизложенного, в качестве уставки по току пуска УРОВ может быть рекомендовано значение:

$$I_{сз}=(0,05\div 0,1)\cdot I_{ном.дв}. \quad (11.2)$$

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

$$t_{уров} = t_{вык} + t_{воз.рз} + t_{ош.рв} + t_{зап}, \quad (11.3)$$

где $t_{вык}$ – время отключения выключателя (как правило, $(0,05\div 0,1)$ с);
 $t_{воз.рз}$ – время, необходимое для возврата РЗ, пускающей УРОВ, (для терминала БМРЗ – $0,01$ с);

$t_{ош.рв}$ – время допустимой погрешности реле времени УРОВ в сторону ускорения действия (для терминала БМРЗ – $0,025$ с при уставках от $0,05$ до 1 с);

$t_{зап}$ – запас по времени (как правило $0,1$ с).

Рекомендуемое значение $t_{уров} = (0,3 \div 0,5)$ с.

12. ЗАЩИТА МИНИМАЛЬНОГО ТОКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Защита минимального тока является технологической защитой и предназначена для выявления ненормального режима работы при аварийном сбросе нагрузки на валу электродвигателя. Параметр срабатывания защиты по току 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 параметра срабатывания по току:

$$I_{с.з} = (0,2\div 0,6) I_{ном.дв}. \quad (12.1)$$

Время срабатывания защиты выполняется с регулируемой выдержкой времени $2\div 5$ с.

13. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА УСТАВОК ЗАЩИТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

13.1. Пример расчета защиты от междуфазных замыканий для синхронного двигателя (с применением ДЗТ с током срабатывания больше номинального тока электродвигателя)

Требуется определить параметры защиты от междуфазных замыканий синхронного электродвигателя серии СДН. Данные для расчета:

- мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном}} = 2000$ кВт;
- коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,9$;
- напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 6$ В;
- КПД: $\eta = 0,955$;
- кратность пускового тока: $k_{\text{пуск}} = 5,7$;
- значение тока трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя: $I_{\text{кз}}^{(3)} = 10$ кА;
- пуск двигателя прямой от напряжения питающей сети;
- двигатель не участвует в самозапуске;
- максимальное сопротивление токовых цепей со стороны питания электродвигателя – не более $0,5$ Ом;
- максимальное сопротивление токовых цепей со стороны нейтрали электродвигателя – не более 1 Ом.

Определяем значение номинального тока электродвигателя:

$$I_{\text{ном.дв}} = \frac{P_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.дв}} \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,955 \cdot 0,9} = 225 \text{ А.}$$

Выбираем трансформаторы тока стороны питания электродвигателя: ТЛМ10-1-0,5/10Р-300/5 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $k_{\text{тр}} = 300/5$. Трансформатор тока ТЛМ10 имеет погрешность не более 10% при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 300 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,6 Ом) до 17 (до 5100 А).

Определяем максимальный бросок пускового тока электродвигателя при условии, что он не участвует в самозапуске:

$$I_{бр.пуск} = k_{апер} \cdot k_{пуск} \cdot I_{номдв} = 1,8 \cdot 5,7 \cdot 225 \approx 2308,5 \text{ А}$$

Выбираем ток срабатывания ТО $I_{>>>} = 2500 \text{ А}$.

Поскольку при токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>} = 2500 \text{ А}$ трансформаторы тока обеспечивают погрешность не более 10%, они пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки.

Определяем значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя и коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ.

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{кз}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 10000 = 8660 \text{ А};$$

$$k_{ч} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{>>>}} = \frac{8660}{2500} = 3,5.$$

Выбираем трансформаторы тока, устанавливаемые со стороны нейтрали электродвигателя аналогичные трансформаторам, устанавливаемым со стороны питания – ТЛМ10-1-0,5/10Р-300/5. Трансформатор тока ТЛМ10-5-82 имеет погрешность не более 10% при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 300 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,6 Ом) до 17 (до 5100 А). Трансформаторы удовлетворяют требованиям по установке в цепях дифференциальной защиты, поскольку обеспечивают погрешность не более 10% при номинальном токе двигателя.

По типовой кривой намагничивания для электротехнической стали определяем погрешности трансформатора тока (ТТ):

$\epsilon_1 = 0,1$ – полная относительная погрешность ТТ установленных со стороны нейтрали электродвигателя в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей.

$\varepsilon_2 = 0,1$ – полная относительная погрешность ТТ установленных со стороны нейтрали электродвигателя при номинальном токе электродвигателя.

Определяем расчетное значение максимального тока небаланса $I_{\text{нб.пуск}}$, соответствующее максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей $I_{\text{бр.пуск}}$:

$$I_{\text{нб.пуск}} = (\varepsilon_1 + \gamma + \delta) \cdot I_{\text{бр.пуск}} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 2308,5 \approx 404 \text{ А.}$$

Определяем максимальный ток небаланса в цепях дифференциальной защиты обусловленный максимальным значением броска пускового тока электродвигателя с учетом значения коэффициента отстройки $k_{\text{отс}}$:

$$I_{\text{раб.пуск}} \geq k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб.пуск}} = 1,2 \cdot 404 = 484,8 \text{ А,}$$

где $k_{\text{отс}} = 1,2$ – коэффициент отстройки.

Выполняем расчет коэффициента торможения защиты:

$$k_{\text{торм}} \geq \frac{I_{\text{раб.пуск}}}{I_{\text{бр.пуск}}} = k_{\text{отс}} \cdot (\varepsilon_1 + \gamma + \delta) = 1,2 \cdot (0,1 + 0,05 + 0,025) = 0,21.$$

Определим значение уставки срабатывания дифференциальной токовой отсечки с учётом отстройки от максимального тока небаланса при максимальном броске пускового тока электродвигателя, соответствующее $I_{\text{бр.пуск}}$ с учетом значения коэффициента торможения:

$$I_{\text{ДТО}} = k_{\text{торм}} \cdot I_{\text{бр.пуск}} = 0,21 \cdot 2308,5 \approx 484,8 \text{ А.}$$

Определяем максимальное значение тока небаланса при номинальном токе двигателя:

$$I_{\text{нб.min.расч}} = (\varepsilon_2 + \gamma + \delta) \cdot I_{\text{ном.дв}} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 225 = 39,38 \text{ А.}$$

Определяем значение уставки $I_{\text{ДЗТ}}$:

$$I_{\text{ДЗТ}} \geq k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб.min.расч}} = 1,2 \cdot 39,38 = 47,26 \text{ А.}$$

$I_{ДЗТ}$ выбирается меньше либо больше номинального тока электродвигателя в зависимости от типа потребителя. Рекомендуемое значение $I_{ДЗТ} = (0,3 \div 1,2) \cdot I_{дв.ном.}$

$I_{ДЗТ}$ выбираем меньше номинального тока электродвигателя. Поскольку полученное минимально возможное значение $I_{ДЗТ} < 0,3 \cdot I_{ном.дв.}$

$$I_{ДЗТ} = 0,3 \cdot I_{ном.дв} = 0,3 \cdot 225 = 67,5 \text{ А.}$$

Для построения характеристики ДЗТ, определяем значение тока торможения, при котором выполняется излом характеристики дифференциальной защиты $I_{торм1}$:

$$I_{торм.1} = \frac{I_{ДЗТ}}{k_{торм}} = \frac{67,5}{0,21} = 321,4 \text{ А.}$$

Выдержки времени ДЗТ ДТО принимаются нулевыми.

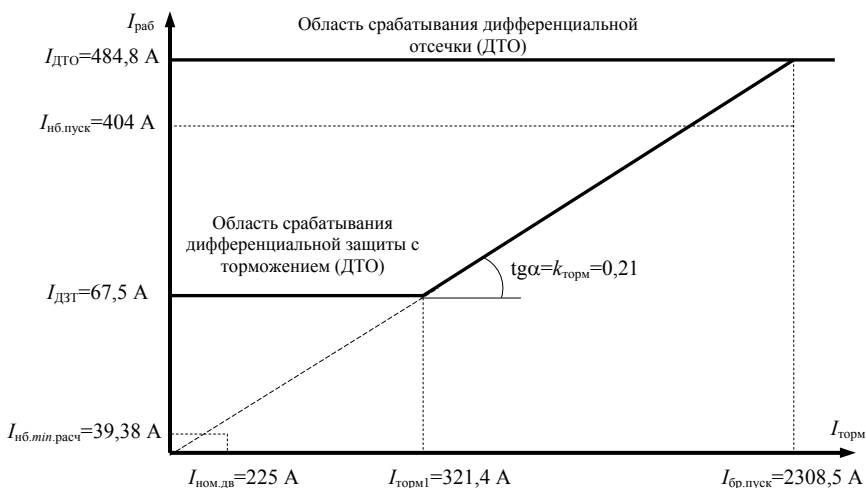


Рис. 13.1. Характеристика дифференциальной защиты

Для проверки чувствительности ДЗТ определяем коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз}}^{(2)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{8660}{67,5} = 128,3.$$

Поскольку коэффициент чувствительности больше 2, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Строим характеристику работы защиты (рис. 13.1).

13.2. Пример расчета защиты от замыканий на землю для синхронного двигателя

Требуется определить параметры защиты от междуфазных замыканий синхронного электродвигателя серии СДН, работающего в сети с изолированной нейтралью.

Данные для расчета:

- мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 2000$ кВт;
- коэффициент мощности: $\cos\varphi = 0,9$;
- напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 6$ кВ;
- КПД: $\eta = 0,952$;
- кратность пускового тока: $k_{\text{п}} = 5,0$;
- значение тока трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя: $I_{\text{кз}}^{(3)} = 5$ кА;
- синхронная скорость вращения двигателя, $n = 1000$ об/мин;
- электродвигатель подключен медным кабелем с бумажной изоляцией сечением 120 мм^2 длиной $L = 50$ метров;
- суммарное значение тока ОЗЗ сети на вводах питания СД, в которой работает этот СД, составляет $I_{\text{ОЗЗ}\Sigma}^{(1)} = 1,5$ А;
- трансформатор тока нулевой последовательности применен типа ТЗР.

Определяем полную мощность двигателя:

$$S_{\text{ном.дв}} = \frac{P_{\text{ном.дв}}}{\cos \varphi \cdot \eta} = \frac{2,0}{0,9 \cdot 0,952} = 2,33 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Определим значение электрической емкости электродвигателя (двигатель является явнополусным):

$$\begin{aligned} C_{\text{дв}} &\approx \frac{40^4 \sqrt{S_{\text{ном.дв}}^3} \cdot 10^{-6}}{3 \cdot (U_{\text{ном.дв}} + 3600) \cdot \sqrt[3]{n}} = \\ &= \frac{40^4 \sqrt{2330^3} \cdot 10^{-6}}{3 \cdot (6000 + 3600) \cdot \sqrt[3]{1000}} = 4,66 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}. \end{aligned}$$

Значение емкостного тока двигателя:

$$I_{\text{емк.дв}} = 2\pi\sqrt{3} \cdot f \cdot C_{\text{дв}} \cdot U_{\text{ном.дв}} = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{3} \cdot 50 \cdot 4,66 \cdot 10^{-8} \cdot 6000 = 0,152 \text{ А}.$$

Результаты расчетов значения емкостного тока электродвигателя обоими способами одинаковы.

По таблице 5.2. определяем значение емкостного тока кабельной линии:

$$I_{\text{емк.лв}} = 1,0 \cdot \frac{50}{1000} = 0,05 \text{ А}.$$

Определяем первичное значение параметра срабатывания защиты по току от ОЗЗ:

$$3I_0 >= \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{возв}}} \cdot k_{\text{бр}} \cdot (I_{\text{емк.дв}} + I_{\text{емк.кл}}) = \frac{1,2}{0,95} \cdot 2 \cdot (0,152 + 0,05) = 0,51 \text{ А}.$$

Определяем коэффициент чувствительности защиты при ОЗЗ:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{ОЗЗ}\Sigma}^{(1)}}{3I_0 >} = \frac{1,4}{0,51} = 2,9.$$

Полученное значение коэффициента чувствительности соответствует требованиям ПУЭ (не менее 1,5).

Определяем вторичное значение тока срабатывания защиты с учетом коэффициента трансформации трансформатора тока нулевой последовательности типа ТЗР:

$$3I_{0.в} \geq \frac{3I_0}{k_{тр}} = \frac{0,51}{18} = 0,03 \text{ А.}$$

С целью повышения стабильности срабатывания защиты принимаем выдержку времени первой ступени защиты от замыканий на землю равной 0,1 с.

Определяем номинальный ток электродвигателя:

$$I_{ном.дв} = \frac{P_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.дв} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,952 \cdot 0,9} = 225 \text{ А.}$$

Определяем уставку срабатывания защиты от двойных замыканий на землю:

$$3I_{0>>} = k_{отс} \cdot k_{нес} \cdot I_{пуск.дв} = k_{отс} \cdot k_{нес} \cdot k_{пуск} \cdot I_{ном.дв} = 1,05 \cdot 0,015 \cdot 5,0 \cdot 225 = 17,7 \text{ А.}$$

Поскольку по требованиям ПУЭ уставка данной защиты должна быть выбрана из диапазона 50 ÷ 200 А, выбираем уставку срабатывания:

$$3I_{0>>} = 100 \text{ А.}$$

Вторая ступень защиты от замыканий на землю (защита от двойных замыканий на землю) работает без выдержки времени.

13.3. Пример расчета защиты от симметричных перегрузок двигателя

Данные для расчета:

- мощность на валу двигателя: $P_{ном.дв} = 2000 \text{ кВт}$;
- номинальный ток двигателя: $I_{ном.дв} = 225 \text{ А}$;
- напряжение: $U_{ном.дв} = 6 \text{ кВ}$;

- кратность пускового тока: $k_{п} = 5,0$;
- пуск СД прямой от напряжения питающей сети;
- время пуска: $t_{п} = 4$ с;
- охлаждение обмоток статора – косвенное. Вентилятор охлаждения закреплен на валу двигателя.

Определяем первичный ток срабатывания первой ступени защиты от симметричных перегрузок:

$$I_{с.з.1} = \frac{1,2 \cdot k_{\text{пуск}}}{k_{\text{в}}} \cdot I_{\text{ном.дв}} = \frac{1,2 \cdot 5,0}{0,95} \cdot 225 = 1421,1 \text{ А} = 6,32 \cdot I_{\text{ном.дв}}$$

Время срабатывания первой ступени максимальной токовой защиты принимаем $t_{сз} = 0,1$ с по условию отстройки от длительности броска пускового тока СД. Это необходимо для исключения неправильно действия защиты при подпитке двигателями КЗ на шинах или присоединениях питающей сети.

Вторая ступень защиты выполняется с инверсной характеристикой и работает с действием на отключение электродвигателя.

Первичный ток пуска второй ступени защиты составит:

$$I_{с.з.2} = \frac{1,08}{k_{\text{в}}} \cdot I_{\text{ном.дв}} = \frac{1,08}{0,95} \cdot 225 = 255,8 \text{ А} = 1,14 \cdot I_{\text{ном.дв}}$$

Время срабатывания защиты рассчитывается БМРЗ по формуле (9.2) в случае $A = 150$ с:

$$\text{при } k_* = 1,14 \quad t_{сз} = \frac{A}{k_*^2 - 1} = \frac{150}{1,14^2 - 1} = 500,7 \text{ с,}$$

$$\text{при } k_* = 6,32 \quad t_{сз} = \frac{A}{k_*^2 - 1} = \frac{150}{6,32^2 - 1} = 3,85 \text{ с.}$$

Третью ступень защиты выполняем с независимой характеристикой с действием на сигнализацию. Первичный ток срабатывания третьей ступени максимальной токовой защиты электродвигателя определяем по формуле (9.5):

$$I_{сз.3} = \frac{k_{отс}}{k_B} \cdot I_{ном.дв} = \frac{1,05}{0,95} \cdot 225 = 248,7 \text{ A} = 1,11 \cdot I_{ном.дв}.$$

СД не подвержен технологическим перегрузкам, а расчетное время пуска СД составляет $t_{пуск} = 4$ с. Из этих соображений выбираем время срабатывания третьей ступени защиты на сигнализацию $t_{сз} = 10$ с.

Характеристика защиты от симметричных перегрузок электродвигателя, выполненная по результатам расчета, приведена на рисунке 13.2.

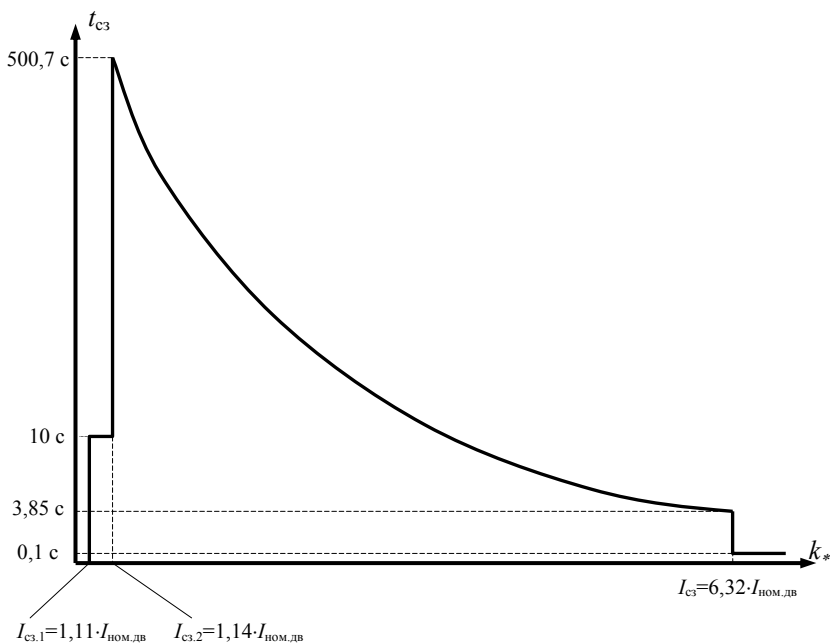


Рис. 13.2. Характеристика защиты от симметричных перегрузок электродвигателя

13.4. Пример расчета защиты синхронного двигателя от асинхронного режима

Требуется определить параметры защиты от потери возбуждения электродвигателя СДН-15-49-6.

Данные для расчета:

- мощность на валу двигателя: $P_{\text{ном.дв}} = 2000 \text{ кВт}$;
- полная мощность двигателя: $S_{\text{ном.дв}} = 2222 \text{ кВ}\cdot\text{А}$;
- напряжение: $U_{\text{ном.дв}} = 6 \text{ кВ}$;
- сверхпереходное сопротивление двигателя: $x_d'' = 17,2\%$;
- сопротивление двигателя: $x_d = 120,4\%$.

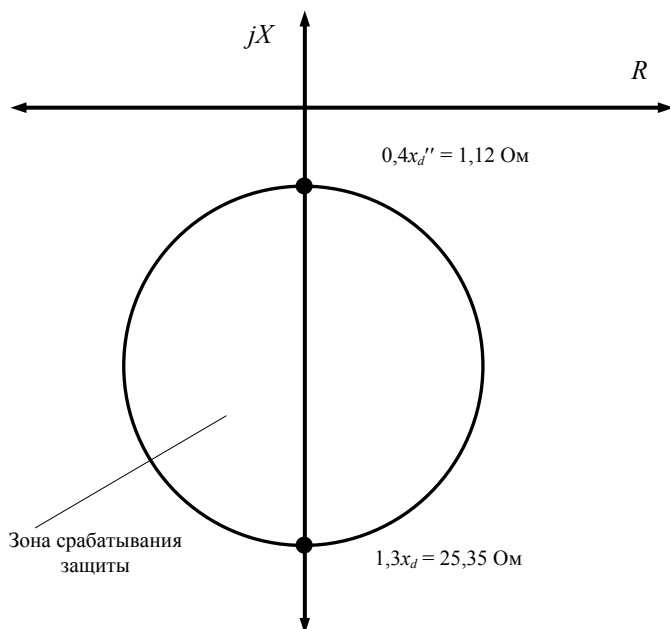


Рис. 13.3. Характеристика защиты двигателя от асинхронного режима

Определяем сверхпереходное сопротивление и сопротивление прямой последовательности двигателя, через базисное сопротивление:

$$z_6 = \frac{U_{\text{НОМ.ДВ}}^2}{S_{\text{НОМ.ДВ}}} = \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{2222 \cdot 10^3} = 16,2 \text{ Ом.}$$

Сверхпереходное сопротивление двигателя в именованных единицах получаем из формулы:

$$x_d'' = \frac{x_d''(\%) \cdot z_6}{100\%} = \frac{17,2 \cdot 16,2}{100\%} = 2,8 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление прямой последовательности СД в именованных единицах получаем из формулы:

$$x_d = \frac{x_d(\%) \cdot z_6}{100\%} = \frac{120,4 \cdot 16,2}{100\%} = 19,5 \text{ Ом.}$$

Строим характеристику защиты, рис. 13.3.

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная литература

1. *Абрамович Б.Н.* Электромеханические комплексы горного производства [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Б.Н. Абрамович, А.А. Круглый, Д.А. Устинов. - СПб.: СПГГУ, 2011. - 66 с. – Режим доступа: - http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=374&task=set_static_req&bns_string=NWPIB.ELC.ZAPIS&req_irb=<>I=%D0%90%2088179%2F%D0%90%2016%2D577196<> – Загл. с экрана.
2. *Абрамович Б.Н.* Проектирование и расчет систем электроснабжения горных предприятий [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Б. Н. Абрамович, Д. А. Устинов. - СПб.: Горн. ун-т, 2013. - 105 с. – Режим доступа: - http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=374&task=set_static_req&bns_string=NWPIB.ELC.ZAPIS&req_irb=<>I=%D013731<> – Загл. с экрана.
3. Электроснабжение предприятий [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Б.Н. Абрамович [и др.]. - СПб.: Горн. ун-т, 2015. - 299 с.: рис., табл. + 1 эл. опт. диск (CD-ROM). - Библиогр.: с. 294 – Режим доступа: - http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=374&task=set_static_req&bns_string=NWPIB.ELC.ZAPIS&req_irb=<>I=31%2E29%2D5%2F%D0%AD%2045%2D388495281<> – Загл. с экрана.
4. *Абрамович Б.Н.* Основы электроснабжения [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов. - СПб.: Горн. ун-т, 2013. - 91 с. – Режим доступа: - http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=374&task=set_static_req&bns_string=NWPIB.ELC.ZAPIS&req_irb=<>I=%D0390538<> – Загл. с экрана.
5. Электроэнергетика [Текст, электронный ресурс]: учеб.-метод. комплекс. - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009 - .Ч. 2: Релейная защита и автоматизация. Изоляция и перенапряжения / сост.: В.С. Гончар, С.И. Джаншиев, В.Н. Костин. - 2009. - 227 с. – Режим доступа: - http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=374&task=set_static_req&bns_string=NWPIB.ELC.ZAPIS&req_irb=<>I=%D0%9C%2D%2D20090216134122<> – Загл. с экрана.

Дополнительная литература

1. Методические указания по расчету уставок защит синхронных и асинхронных двигателей 6 – 10 кВ. ДИВГ.648228.001 ДЗ: метод. указания. – СПб.: ПЭИПК, ООО «НТЦ «Механостройка» / сост.: А.Л. Соловьев, М.Г. Пирогов, С.В. Михалев. 79 с.
2. <http://www.mtrele.ru>

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1 Рекомендации по применению защит

Таблица П.1
Рекомендации по применению защит

Вид потребителя	Вид защиты		
	ТО	ДЗТ	ДТО
Односкоростной АД	Необходима	Необходима при мощности двигателя более 5 МВт либо если ТО не удовлетворяет требованиям по чувствительности	Рекомендуется к применению всегда в качестве вспомогательного элемента при использовании ДЗТ
Двухскоростной АД	Необходима на каждую скорость		
СД	Необходима		

Продолжение таблицы П.1

Вид потребителя	Вид защиты		
	Защита от ЗЗ	ЗМН	ЗПП
Односкоростной АД	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.	Необходима, если двигатель не участвует в самозапуске	Не используется
Двухскоростной АД		Необходима, если двигатель не участвует в самозапуске, должна переводить двигатель на низшую скорость вращения	
СД		Неприменима	Необходима, если двигатель не участвует в самозапуске

Продолжение таблицы П.1

Вид потребителя	Вид защиты			
	ЗНР	ЗП	ЗАР	УРОВ
Односкоростной АД	Рекомендуется к применению всегда		Не применима	Рекомендуется к применению всегда
Двухскоростной АД				
СД			Необходима	

В таблице использованы следующие обозначения:

- ТО – токовая отсечка;
- ДЗТ – дифференциальная защита с торможением;
- ДТО – дифференциальная токовая отсечка;
- Защита от ЗЗ – защита от замыканий на землю;
- ЗМН – защита минимального напряжения;
- ЗПП – защита от потери питания;
- ЗНР – защита от неполнофазного режима;
- ЗП – защита от перегрузки;
- ЗАР – защита от асинхронной работы;
- УРОВ – устройство резервирования при отказе выключателя.

Приложение 2**Характеристики кабелей***Таблица П2.1***Технические характеристики кабеля с медными жилами с изоляцией из сшитого полиэтилена типа ПвБП**

Сечение рабочей жилы, мм ²	Длительная нагрузка, А	
	6 кВ	10 кВ
35	164	192
50	192	207
70	233	253
95	279	300
120	316	340
150	352	384
185	396	433
240	457	500

*Таблица П2.2***Технические характеристики кабеля ЭВТ**

Сечение рабочей жилы, мм ²	Активное сопротивление жилы, Ом/км	Индуктивное сопротивление, Ом/км	Длительная нагрузка, А	
			1140 В	6000 В
25	0,72	0,091	–	110
35	0,515	0,087	141	135
50	0,361	0,083	177	165
70	0,287	0,080	226	210
95	0,191	0,078	274	255
120	0,154	0,076	321	300

Характеристики трансформаторов тока

Общие сведения

Трансформаторы тока ТЛМ-10 предназначены для передачи сигнала измерительной информации измерительным приборам, устройствам защиты и управления в установках переменного тока.

Структура условного обозначения

ТЛМ-10-Х-0,5/10Р-Х/5 Х:

Т - трансформатор тока;

Л - литая изоляция;

М - малогабаритный;

10 - номинальное напряжение, кВ;

Х - конструктивный вариант исполнения (1 или 2);

0,5 - номинальный класс точности обмотки для измерения;

10Р - номинальный класс точности обмотки для защиты;

Х - номинальный первичный ток, А;

5 - номинальный вторичный ток, А;

Х - климатическое исполнение и категория размещения (УЗ, ТЗ) по ГОСТ 15150-69.

Условия эксплуатации

Верхнее рабочее значение температуры окружающего воздуха для умеренного климата - 50°C, для тропического климата - 55°C. Рабочее положение трансформатора в пространстве - любое. Требования безопасности по ГОСТ 12.2.007.3-75. Трансформаторы тока для внутригосударственных поставок соответствуют ТУ 16-517.893-80, для экспортных: - ГОСТ 7746-89. ТУ 16-517.893-80; ГОСТ 7746-89

Технические характеристики

Номинальное напряжение, кВ – 10.

Номинальный первичный ток, А – 50, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1500.

Номинальный вторичный ток, А – 5.

Частота тока, Гц – 50, 60.

Таблица ПЗ.1

Данные обмоток трансформатора тока

Обмотка	Назначение	Номинальная вторичная нагрузка при $\cos = 0,8$, В·А (Ом)	Класс точности	Номинальная предельная кратность вторичной обмотки для защиты для токов	
				50-800 А	1000, 1500 А
1	Измерение	10 (0,4)	0,5	–	–
2	Защита	15 (0,6)	10P	15	10
1 и 2*	Измерение и защита	15 (0,6)	0,5 – 10P	–	–

* только на токи 1000, 1500 А.

Таблица ПЗ.2

Значения термической и электродинамической стойкости

Номинальный первичный ток, А	50	100	150	200	300	400	600	800	1000	1500
Ток трехсекундной термической стойкости, кА	2,8	6,3	1,2	10,1	18,4		23,0		26,0	
Ток электродинамической стойкости, кА	17,6	35,2	52,0		100,0					

Варианты исходных данных

№ варианта	Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, кВ	x_d'' , %	x_d , %	$k_{\text{п}}$	$I_{\text{кз}}^{(3)}$, кА	$I_{\text{обз}}^{(1)}$, кА	L , м	$t_{\text{п}}$, с
1	СТД	630	6	14,68	181,0	5,66	4,5	1,2	50	5
2	СТД	800	6	14,25	188,0	5,58	5,0	1,3	60	5
3	СТД	1000	6	13,31	193,0	6,70	5,5	1,4	70	5
4	СТД	1250	6	13,76	163,0	6,48	6,0	1,5	80	5
5	СТД	1600	6	12,85	165,0	6,79	6,5	1,6	90	5
6	СТД	2000	6	13,44	186,7	6,91	4,5	1,7	100	5
7	СТД	2500	6	14,24	154,5	6,16	5,0	1,8	110	5
8	СТД	3200	6	14,04	169,0	6,63	5,5	1,9	120	5
9	СТД	4000	6	14,80	192,1	6,69	6,0	2,0	50	5
10	СТД	5000	6	13,70	196,4	7,22	6,5	2,1	60	5
11	СТД	6300	6	15,31	214,8	6,28	4,5	2,2	70	5
12	СТД	8000	6	14,32	219,0	6,93	5,0	2,3	80	5
13	СТД	10000	6	12,57	206,0	8,1	5,5	2,4	90	5
14	СТД	12500	6	12,00	218,4	8,86	6,0	2,5	100	5
15	СТД	630	10	14,25	175,0	5,66	6,5	2,5	110	5

Приложение 4 (продолжение)

№ варианта	Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, кВ	x_d'' , %	x_d , %	$k_{\text{п}}$	$I_{\text{кз}}^{(3)}$, кА	$I_{\text{обз}}^{(1)}$, кА	L , м	$t_{\text{п}}$, с
16	СТД	800	10	14,53	192,0	5,58	4,5	2,4	120	5
17	СТД	1000	10	12,76	183,8	6,70	5,0	2,3	50	5
18	СТД	1250	10	13,73	163,0	6,48	5,5	2,2	60	5
19	СТД	1600	10	13,39	171,6	6,79	6,0	2,1	70	5
20	СТД	2000	10	13,28	186,5	6,91	6,5	2,0	80	5
21	СТД	2500	10	15,05	163,6	6,16	4,5	1,9	90	5
22	СТД	3200	10	14,39	169,3	6,63	5,0	1,8	100	5
23	СТД	4000	10	14,29	185,1	6,69	5,5	1,7	110	5
24	СТД	5000	10	13,61	196,3	7,22	6,0	1,6	120	5
25	СТД	6300	10	15,54	218,5	6,28	6,5	1,5	100	5
26	СТД	8000	10	14,47	219,2	6,93	4,5	1,4	80	5
27	СТД	10000	10	12,91	219,4	8,1	5,0	1,3	70	5
28	СТД	12500	10	12,09	218,5	8,86	5,5	1,2	50	5

Принять $\cos\varphi = 0,9$, КПД = 0,95.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. НЕОБХОДИМЫЕ ВИДЫ ЗАЩИТ, УСТАНОВЛИВАЕМЫЕ НА ДВИГАТЕЛИ	4
2. РАСЧЕТ УСТАВОК ЗАЩИТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СВЫШЕ 1 КВ 11	
2.1. Методика расчета уставок токовой отсечки	11
3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ДВИГАТЕЛЯ.....	14
4. МЕТОДИКА ВЫБОРА И РАСЧЕТА УСТАВОК ЗАЩИТ ДВИГАТЕЛЯ С ПЛАВНЫМ ПУСКОМ.....	20
5. ЗАЩИТА ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ	22
5.1. Защита от однофазного замыкания на землю	22
5.2. Расчет уставок защиты от двойных замыканий на землю.....	28
5.3. Направленная токовая защита от однофазных замыканий на землю	29
6. РАСЧЕТ ЗАЩИТ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ.....	33
6.1. Требования ПУЭ к защитами минимального напряжения электродвигателей.....	33
6.2. Исполнение защиты минимального напряжения с применением блоков БМРЗ.....	34
7. ЗАЩИТА ОТ ПОТЕРИ ПИТАНИЯ.....	35
7.1. Общие сведения.....	35
7.2. Выполнение защиты от потери питания синхронных электродвигателей на базе блоков БМРЗ	36
8. ЗАЩИТА ОТ НЕПОЛНОФАЗНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ.....	38
8.1. Требования ПУЭ к защите двигателей от неполнофазных режимов работы	38
8.2. Исполнение защиты от неполнофазного режима на базе блоков БМРЗ и выбор её уставок	38
9. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ПЕРЕГРУЗОК.....	39
9.1. Требования ПУЭ к защите электродвигателей от перегрузок	39
9.2. Исполнение защиты двигателей от перегрузок на базе блоков БМРЗ.....	40
9.3. Методика расчета уставок защиты от симметричных перегрузок.....	41
9.4. Методика выбора уставок защиты от затянутого пуска	44
9.5. Методика расчета уставок тепловой защиты электродвигателей.....	45

10. РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА.....	51
10.1. Требования ПУЭ к защите синхронных двигателей от асинхронного режима	51
10.2. Выполнение защиты синхронных двигателей от асинхронного режима (потери возбуждения) на базе терминалов БМРЗ.....	53
11. ВЫБОР УСТАВОК УСТРОЙСТВА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ПРИ ОТКАЗЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ.....	56
12. ЗАЩИТА МИНИМАЛЬНОГО ТОКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ	57
13. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА УСТАВОК ЗАЩИТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	58
13.1. Пример расчета защиты от междуфазных замыканий для синхронного двигателя (с применением ДЗТ с током срабатывания больше номинального тока электродвигателя)	58
13.2. Пример расчета защиты от замыканий на землю для синхронного двигателя.....	62
13.3. Пример расчета защиты от симметричных перегрузок двигателя	64
13.4. Пример расчета защиты синхронного двигателя от асинхронного режима.....	67
РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	69
ПРИЛОЖЕНИЯ	70
Приложение 1	70
Рекомендации по применению защит	70
Приложение 2	72
Характеристики кабелей.....	72
Приложение 3	73
Характеристики трансформаторов тока.....	73
Приложение 4	75
Варианты исходных данных	75

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ
ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ 6-10 кВ

*Методические указания к самостоятельной работе
для студентов специальности 21.05.04*

Сост.: *Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
электроэнергетики и электромеханики

Ответственный за выпуск *Д.А. Устинов*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 17.01.2019. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 4,5. Усл.кр.-отг. 4,5. Уч.-изд.л. 4,0. Тираж 100 экз. Заказ 23. С 14.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2