

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СТО ДИВГ-046-2012

**ТЕРМИНАЛЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
СИНХРОННЫХ И АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ 6-10 кВ**

Расчет уставок

Методические указания

**Санкт-Петербург
2012**

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 года №184 ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения стандартов организаций – ГОСТ Р.1.4-2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения».

В настоящем стандарте приведены имеющие рекомендательный характер методические указания по расчету уставок защит синхронных и асинхронных электродвигателей напряжением 6 - 10кВ.

1 РАЗРАБОТАН ООО «НТЦ «Механотроника»

Научно-технический руководитель работы:

Заведующий кафедрой Релейной защиты и автоматики электрических станций, сетей и систем
Петербургского Энергетического института повышения квалификации
к.т.н. СОЛОВЬЁВ А. Л.

Научный редактор:

Заместитель начальника управления качеством
Захаров О.Г.

Исполнители:

Начальник отдела системотехники
ПИРОГОВ М. Г.
Ведущий инженер-системотехник
МИХАЛЁВ С. В.

2 ВВЕДЕН ВЗАМЕН СТО ДИВГ-046-2011

Настоящий стандарт является объектом охраны в соответствии с международным и российским законодательствами об авторском праве.

Любое несанкционированное использование стандарта, включая копирование, тиражирование и распространение, но не ограничиваясь этим, влечёт применение к виновному лицу гражданско-правовой ответственности, а также уголовной ответственности в соответствии со статьёй 146 УК РФ и административной ответственности в соответствии со статьёй 7.12 КоАП РФ.

Содержание

1. Общие сведения	1
2. Нормативные ссылки.....	2
3. Обозначения и сокращения	2
4. Защиты электродвигателей от междуфазных замыканий.....	3
4.1 Требования ПУЭ к защитам от междуфазных замыканий.....	3
4.2 Расчет уставок максимальной токовой отсечки.....	5
4.3 Дифференциальная защита электродвигателей.....	7
4.4 Расчет уставок дифференциальной защиты	8
4.5 Расчет уставок защит электродвигателя с плавным пуском	13
5 Примеры расчета уставок защит от междуфазных замыканий	14
5.1 ДЗТ с очувствлением для АД	14
5.2 ДЗТ с уставкой меньше номинального тока АД	19
5.3 ДЗТ с уставкой меньше номинального тока СД	22
5.4 ДЗТ с уставкой меньше номинального тока СД	25
с реакторным пуском	25
5.5 Токовая отсечка для двухскоростного АД.....	29
5.6 ДЗТ с током срабатывания больше номинального	
тока АД с плавным пуском.....	31
6 Защиты от однофазных замыканий на землю	
6.1 Требования ПУЭ к защитам от ОЗЗ	36
6.2 Защита от ОЗЗ в терминалах БМРЗ	37
6.3 Расчет уставок защиты от ОЗЗ.....	38
6.4 Защита от двойных замыканий на землю	42
6.5 Направленная токовая защита от ОЗЗ.....	43
6.6 Неселективная защита от замыканий на землю и	45
алгоритм «селектор направления ОЗЗ»	45
6.7 Примеры расчета защит от ОЗЗ	46
6.7.1 Токовая защита от замыканий на землю.....	46
6.7.2 Направленная токовая защита от замыканий на землю	48
7 Защиты минимального напряжения	50
7.1 Требования ПУЭ к ЗМН	50
7.2 ЗМН в терминалах БМРЗ	51
8 Защита от потери питания	52
8.1 Назначение ЗПП.....	52
8.2 Требования ПУЭ к ЗПП.....	52
8.3 Характеристика алгоритмов ЗПП	52
8.4 ЗПП в терминалах БМРЗ.....	53
9 Защита электродвигателя от неполнофазных режимов	54
9.1 Требования ПУЭ к защите от неполнофазных режимов	54
9.2 Защита от неполнофазных режимов в терминалах БМРЗ	54
10 Защита электродвигателей от перегрузок	55
10.1 Требования ПУЭ к защите от перегрузок	55
10.2 Защиты двигателей от перегрузок в терминалах БМРЗ	55
10.3 Расчет уставок защиты от симметричных перегрузок	56
10.4 Выбор уставок защиты от затянутого пуска	59

10.5 Расчет уставок тепловой защиты электродвигателей	59
10.6 Примеры расчета защит от перегрузок.....	64
10.6.1 Защита АД от симметричных перегрузок	64
10.6.2 Защита АД с помощью тепловой модели	66
10.7 Определение постоянных времени тепловой модели.....	67
11 Защиты СД от асинхронного режима.....	70
11.1 Требования ПУЭ к защите СД от асинхронного режима	70
11.2 Защита СД от асинхронного режима в терминалах БМРЗ	71
11.3 Пример расчета защиты СД от асинхронного режима	73
12 Выбор уставок для алгоритма УРОВ	74
13 Минимальная токовая защита электродвигателя.....	75
14 Алгоритм «функция опережающего отключения»	76
14.1 Назначение алгоритма ФОО	76
14.2 Устойчивость узлов нагрузки с СД.....	76
14.3 Алгоритм ФОО в терминалах БМРЗ-ДС	82
14.4 Расчет уставок алгоритма ФОО	83
15 Защита от колебаний нагрузки.....	84
16 Рекомендации по применению защит.....	86
Список литературы	91

Листов 94
Формат А4

**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ
ТЕРМИНАЛЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
СИНХРОННЫХ И АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ 6 – 10 кВ**

**Расчет уставок
Методические указания**

1. Общие сведения

В настоящем стандарте приведены имеющие рекомендательный характер методические указания (МУ) по расчету уставок защит синхронных и асинхронных электродвигателей напряжением 6 – 10 кВ.

МУ составлены в соответствии с требованиями и рекомендациями, изложенными в ПУЭ [1]¹, с учётом особенностей построения и функционирования цифровых устройств релейной защиты БМРЗ, а так же опыта их эксплуатации. При разработке МУ учитывался подход и практика, принятая в отечественной электроэнергетике.

В МУ дан комплексный подход к расчету уставок:

- защит от междуфазных замыканий;
- максимальной токовой отсечки;
- защиты от однофазных замыканий на землю;
- тепловой модели;
- защиты от обрыва фазы;
- защиты от блокировки ротора;
- защиты от неполнофазных режимов;
- защиты минимального напряжения;
- минимальной токовой защиты;
- алгоритма «функция опережающего отключения»;
- защиты от колебаний нагрузки;
- алгоритма резервирования при отказе выключателя.

МУ содержат подробные примеры расчета уставок асинхронного двигателя, синхронного двигателя с прямым пуском, синхронного двигателя с реакторным пуском, двухскоростного двигателя, блока трансформатор-электродвигатель, рассмотрена защита двигателей, работающих с устройствами плавного пуска.

Расчет уставок выполнен в первичных значениях. После окончания расчета все значения уставок переводят во вторичные значения, используя единицы измерения уставок защиты конкретного изделия, приведенные в соответствующих руководствах по эксплуатации.

Для обеспечения надёжной работы алгоритмов защит и автоматики электродвигателей необходимо предварительно выполнить расчётную проверку работы трансформаторов тока в диапазоне погрешности, не превышающей 10 % ($\varepsilon \leq 10\%$) при номинальном токе двигателя.

Перед вводом уставок блока необходимо убедиться в том, что трансформаторы тока, применяемые в цепях релейной защиты удовлетворяют

¹ См. главы 3.2 и 5.3

требованиям, изложенным в РД 153-34.0-35.301-2002 [2].

2. Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на документы:

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

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

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

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

3. Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте приняты следующие обозначения и сокращения:

АВР – автоматический ввод резерва;
АГП – автомат гашения поля;
АД – асинхронный двигатель;
АПВ – автоматическое повторное включение;
ДЗТ – дифференциальная защита с торможением;
ДТО – дифференциальная токовая отсечка;
ЗАР – защита от асинхронного режима;
ЗКН – защита от колебаний нагрузки;
ЗМН – защита минимального напряжения;
ЗНР – защита от неполнофазного режима;
ЗПП – защита от потери питания;
КЗ – короткое замыкание;
КПД – коэффициент полезного действия;
ЛЗШ – логическая защита шин;
МинТЗ – минимальная токовая защита;
МУ – методические указания;
ОЗЗ – однофазное замыкание на землю;
ОКЗ – отношение короткого замыкания;
ПУЭ – Правила устройства электроустановок;
РЭ – руководство по эксплуатации;
СД – синхронный двигатель;
СНОЗЗ – алгоритм «селектор направления ОЗЗ»;
ТН – трансформатор напряжения;
ТО – токовая отсечка;
ТТ – трансформатор тока;

ТТП – трансформатор тока нулевой последовательности;
 УПП – устройство плавного пуска;
 УРОВ – алгоритм «Резервирование при отказе выключателя»;
 ФОО – алгоритм «Функция опережающего отключения»;
 ЦОС – цифровая обработка сигналов;
 ЭДС – электродвижущая сила.

4. Защиты электродвигателей от междупазных замыканий

4.1 Требования ПУЭ к защита от междупазных замыканий

4.1.1 Согласно ПУЭ [1] для защиты электродвигателей от междупазных замыканий в случаях, когда не применяют предохранители, могут быть предусмотрены:

а) токовая однорелейная отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах, с реле прямого или косвенного действия, включенными на разность токов двух фаз;

Применение микропроцессорного терминала БМРЗ делает выполнение отсечки в виде однорелейной схемы, предусмотренной в ПУЭ, нецелесообразным

б) токовая двухрелейная отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах, с реле прямого или косвенного действия;

в) продольная дифференциальная токовая защита.

4.1.2 Для электродвигателей мощностью менее 2 МВт защиту по 4.1.1 а) применяют в тех случаях, когда она отвечает требованиям чувствительности. Если защита по 4.1.1 а) не обеспечивает требуемого коэффициента чувствительности, применяют защиту по 4.1.1 б).

4.1.3 Защиту по 4.1.1 б) используют для электродвигателей мощностью более 2 МВт, имеющих действующую на отключение защиту от однофазных замыканий на землю, а также в том случае, когда применение двухрелейной отсечки оказывается целесообразной по исполнению комплектной защиты или применяемого привода с реле прямого действия.

4.1.4 При отсутствии защиты от однофазных замыканий на землю токовую отсечку электродвигателей мощностью 2 МВт и более следует выполнять трехрелейной, с тремя трансформаторами тока.

В терминалах БМРЗ программно реализовано необходимое количество цифровых реле максимального тока для каждой фазы.

Срабатывание ТО в терминалах БМРЗ происходит по максимальному значению одного из фазных токов электродвигателя.

4.1.5 Продольную дифференциальную защиту следует применять для электродвигателей мощностью 5 МВт и более.

При наличии защиты от замыканий на землю можно использовать двухфазную дифференциальную защиту, а при отсутствии такой защиты следует применять трёхфазную дифференциальную защиту.

При наличии защиты от двойных замыканий на землю, выполненной

с помощью токового реле и трансформатора тока нулевой последовательности, допускается использовать двухфазную дифференциальную защиту.

4.1.6 Для защиты электродвигателей мощностью 5 МВт и более, имеющих 3 или 4 вывода обмотки статора, следует предусматривать токовую отсечку.

4.1.7 Для блоков трансформатор (автотрансформатор) – электродвигатель должна быть предусмотрена одна из указанных ниже общих защит от многофазных замыканий:

а) токовая отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах;

б) дифференциальная отсечка в двухрелейном исполнении, отстроенная от бросков тока намагничивания трансформатора;

в) продольная дифференциальная токовая защита в двухрелейном исполнении с промежуточными насыщающимися трансформаторами тока.

4.1.8 Защиту по 4.1.7 а) применяют для блоков с электродвигателями мощностью до 2 МВт.

При схеме соединения обмоток трансформатора звезда - треугольник отсечку следует выполнять на трех токовых реле - двух включенных на фазные токи и одного включенного на сумму этих токов.

Если установка трех реле (например, при ограниченном числе реле прямого действия) невозможна, допускается применить схему с двумя реле, включенными на соединенные треугольником вторичные обмотки трех трансформаторов тока.

4.1.9 Защиту по 4.1.7 б) применяют для блоков с электродвигателями мощностью более 2 МВт, а также для блоков с электродвигателями менее 2 МВт, если токовая отсечка без выдержки времени не отвечает требованиям чувствительности при междуфазном КЗ на выводах электродвигателя.

4.1.10 Продольную дифференциальную защиту применяют для блоков с электродвигателями мощностью более 5 МВт, а также для блоков с электродвигателями меньшей мощности в тех случаях, если защиты по 4.1.8 а), 4.1.8 б) не удовлетворяет требованиям чувствительности.

4.1.11 Коэффициент чувствительности защит от междуфазных замыканий проверяют при КЗ на вводах питания электродвигателя.

Согласно ПУЭ [1] коэффициент чувствительности дифференциальных защит, определяют как отношение расчетного значения дифференциального тока при металлическом КЗ в пределах защищаемой зоны к дифференциальному току, при котором происходит срабатывание защиты.

Коэффициент чувствительности для ТО - отношение расчетного значения фазного тока при металлическом КЗ в пределах защищаемой зоны к фазному току, при котором происходит срабатывание защиты.

Значение коэффициента чувствительности защит от междуфазных замыканий должно быть не менее 2,0.

4.2 Расчет уставок максимальной токовой отсечки

4.2.1 Для защиты электродвигателей от междуфазных замыканий следует применять ТО без выдержки времени. При обоснованной необходимости использования дифференциальной защиты от междуфазных замыканий рекомендуется всегда использовать ТО в качестве резервной защиты.

4.2.2 Отстройку ТО выполняют от:

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

4.2.3 В случае расчета уставок для синхронного двигателя следует учитывать, что пуск машины происходит в асинхронном режиме. Когда частота вращения приближается к синхронной, обмотки возбуждения переключают на напряжение возбуждения, выводя резистор и двигатель втягивается в синхронизм. Бросок пускового тока определяют аналогично тому, как это делают для асинхронного электродвигателя.

4.2.4 В случае, если номинальный ток двигателя $I_{ном.дв}$, А, не приведен в паспортных данных, его определяют по формуле:

$$I_{ном.дв} = \frac{P_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.дв} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} , \quad (1)$$

где $P_{ном.дв}$ - номинальная мощность электродвигателя, кВт;

$U_{ном.дв}$ - номинальное линейное действующее напряжение двигателя, кВ;

η - номинальный коэффициент полезного действия (далее КПД) электродвигателя;

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

ТТ, устанавливаемые со стороны питания электродвигателя, должны иметь такой коэффициент трансформации, чтобы вторичный ток не превышал 5 А (рекомендуемый диапазон от 1 до 4 А) при номинальном первичном токе двигателя.

По [4] или по паспортным данным трансформатора тока необходимо определить предельную кратность тока, при которой трансформатор сохраняет погрешность, не превышающую 10 %.

4.2.5 Принято считать, что процесс пуска машины завершен, когда пусковой ток станет ниже значения $1,25 \cdot I_{ном. дв.}$ (рисунок 1)

4.2.6 **В случае прямого пуска двигателя** максимальный бросок пускового тока электродвигателя $I_{бр.пуск}$, А, с учётом апериодической составляющей определяют по формуле:

$$I_{бр.пуск} = k_{апер} \cdot k_{пуск} \cdot I_{ном.дв} , \quad (2)$$

где $k_{апер}$ - коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую пускового тока машины, принимают равным 1,8;

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

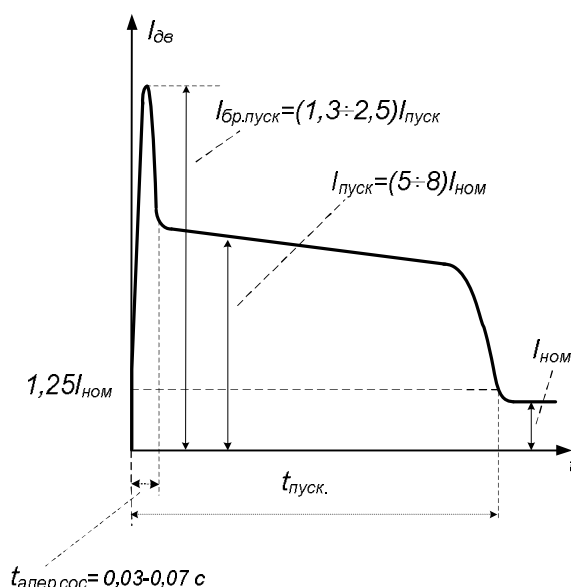


Рисунок 1 - Пусковая характеристика электродвигателя

4.2.7 **В случае реакторного пуска двигателя** максимальный бросок пускового тока электродвигателя $I_{бр.прям.пуск}$, А, с учётом апериодической составляющей определяют по формуле, аналогичной (2):

$$I_{бр.прям.пуск} = k_{апер} \cdot k_{пуск} \cdot I_{ном.дв} \quad (3)$$

где $k_{апер}$ - коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую пускового тока машины, принимают равным 1,8;

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

Определяем полное пусковое индуктивное сопротивление двигателя x_d , Ом, [5]¹ по формуле:

$$x_d = \frac{U_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot I_{бр.прям.пуск}} \quad (4)$$

Максимальный бросок пускового тока двигателя при реакторном пуске $I_{бр.пуск}$, А, определяют по формуле:

$$I_{бр.пуск} = \frac{U_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot (x_c + x_d + x_p)} \quad (5)$$

где x_c - индуктивное сопротивление сети,

x_p - индуктивное сопротивление реактора.

4.2.8 **При участии двигателя в самозапуске** значение тока $I_{бр.пуск}$ необходимо увеличить в 1,4 раза, поскольку напряжение на двигателе

¹ См. с. 22

после включения резервного питания может превышать номинальное в 1,3 - 1,4 раза.

4.2.9 Выбираем уставку срабатывания ТО, превышающую $I_{бр.пуск}$, А

$$I_{>>>} \geq I_{бр.пуск} . \quad (6)$$

4.2.10 При токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>}$ трансформаторы тока должны обеспечивать погрешность, не превышающую 10 % (см. [1]¹).

Если погрешность выбранных трансформаторов тока превышает это значение, необходимо выбрать другой трансформатор тока или уменьшить сопротивление токовых цепей.

4.2.11 Значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя $I_{кз}^{(2)}$, А, и коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_{\chi}^{(2)}$ определяют по формулам:

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{кз}^{(3)} , \quad (7)$$

$$k_{\chi}^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{>>>}} , \quad (8)$$

где $I_{кз}^{(3)}$ - ток трехфазного короткого замыкания на вводах питания электродвигателя.

Защита от междофазных КЗ работает без выдержки времени.

4.2.12 Расчет уставок ТО для многоскоростных двигателей осуществляют отдельно для каждой частоты вращения, аналогично расчетам уставок для односкоростных двигателей.

4.3 Дифференциальная защита электродвигателей

4.3.1 На практике нашли применение два варианта выполнения дифференциальной защиты электродвигателей:

- с током срабатывания меньше номинального тока защищаемого электродвигателя. Такой вариант выполнения защиты применяют для минимизации объема повреждений в электродвигателях при внутренних междофазных коротких замыканиях в статорной обмотке машины. Этот вариант допускает неправильное действие защиты при обрыве и неисправности токовых цепей, или при неисправности одного из трансформаторов тока дифференциальной защиты электродвигателя. Вариант рекомендован к применению на объектах, где есть обслуживающий персонал;

- с током срабатывания больше номинального тока защищаемого электродвигателя. Такой вариант выполнения защиты рекомендован к применению на ответственных объектах и обеспечивает правильную работу защиты при обрыве и неисправности токовых цепей, или при неисправно-

¹ См. п.3.2.29

сти одного из трансформаторов тока дифференциальной защиты электродвигателя.

4.3.2 Оба варианта дифференциальной защиты работают **без выдержки времени**.

4.3.3 Основным элементом дифференциальной защиты – дифференциальная защита с торможением ДЗТ.

Дифференциальная токовая отсечка ДТО должна всегда применяться с ДЗТ в качестве вспомогательного элемента.

4.4 Расчет уставок дифференциальной защиты

4.4.1 Характеристики дифференциальных защит ДТО и ДЗТ приведены на рисунке 2.

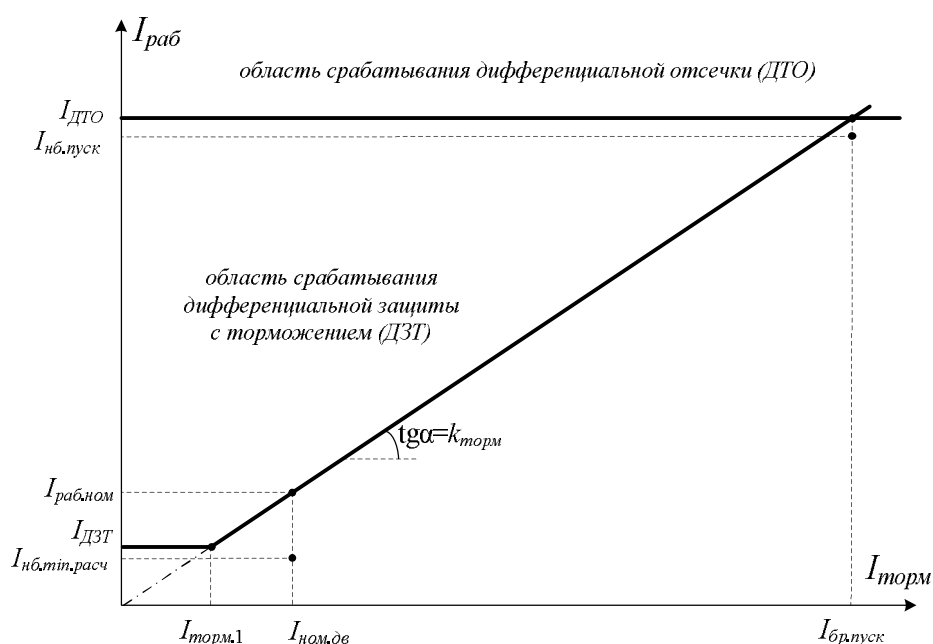


Рисунок 2 - Характеристики дифференциальной защиты

4.4.2 Если номинальный ток двигателя $I_{ном.дв}$, А, не приведен в паспортных данных, определяем его по формуле, аналогичной (1):

$$I_{ном.дв} = \frac{P_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.дв} \cdot \eta \cdot \cos \varphi}, \quad (9)$$

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

$U_{ном.дв}$ – номинальное линейное действующее напряжение двигателя, кВ;

η – номинальный к.п.д. электродвигателя;

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

По номинальному току электродвигателя выбирают трансформаторы тока с таким коэффициентом трансформации, чтобы вторичный ток не превышал 5 А. Желательно, чтобы при номинальном первичном токе

двигателя вторичный ток ТТ находился в диапазоне от 1 до 4 А.

Для повышения чувствительности защиты и снижения дифференциального тока небаланса рекомендуется выбирать ТТ одинакового типа, как со стороны питания, так и со стороны нейтрали.

По данным, приведенным в [4] либо по паспортным данным ТТ определяем предельную кратность тока, при которой ТТ сохраняет погрешность не более 10 %.

4.4.3 Максимальный бросок пускового тока электродвигателя $I_{бр.пуск}$, А, **в случае прямого пуска двигателя** определяют с учётом апериодической составляющей по формуле, аналогичной (2):

$$I_{бр.пуск} = k_{апер} \cdot k_{пуск} \cdot I_{ном.дв} \quad (10)$$

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

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

4.4.4 **В случае реакторного пуска двигателя** сначала определяют максимальный бросок пускового тока для прямого пуска $I_{бр.прям.пуск}$, А, электродвигателя с учётом апериодической составляющей по формуле, аналогичной (3):

$$I_{бр.прям.пуск} = k_{апер} \cdot k_{пуск} \cdot I_{ном.дв}, \quad (11)$$

где $k_{апер}$ - коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую пускового тока машины, принимают равным 1,8;

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

Полное пусковое индуктивное сопротивление двигателя x_d , Ом, [5]¹ определяют по формуле, аналогичной (4):

$$x_d = \frac{U_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot I_{бр.прям.пуск}}. \quad (12)$$

Максимальный бросок пускового тока двигателя $I_{бр.пуск}$, А, при реакторном пуске определяют по формуле, аналогичной (5):

$$I_{бр.пуск} = \frac{U_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot (x_c + x_d + x_p)}. \quad (13)$$

4.4.5 Значение тока $I_{бр.пуск}$, рассчитанное по формулам (10) и (13), необходимо увеличить в 1,4 раза, если **электродвигатель участвует в процессе самозапуска**.

¹ См. с. 22

4.4.6 Определяем следующие полные относительные погрешности трансформаторов тока ТТ, установленных со стороны нейтрали электродвигателя:

ε_1 - в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей;

ε_2 - при номинальном токе электродвигателя.

Значения этих погрешностей могут быть найдены известными методами, например, по типовой кривой намагничивания для электротехнической стали (рисунок 3).

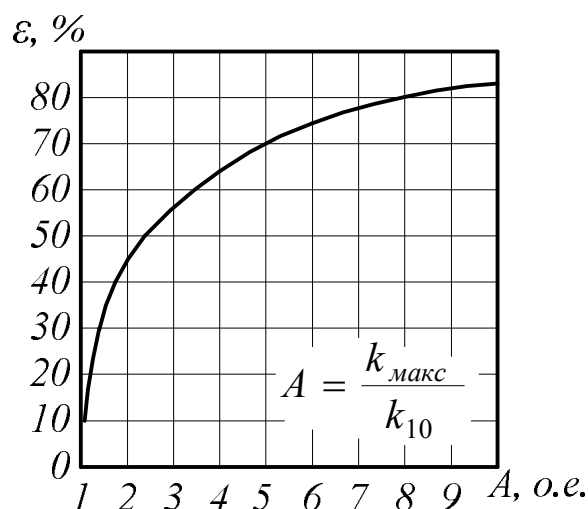


Рисунок 3 - Типовая кривая намагничивания по [6]¹

На рисунке приняты такие обозначения:

k_{\max} - максимальная кратность измеряемого тока по отношению к номинальному току трансформатора тока;

k_{10} - допустимая кратность измеряемого тока для $\varepsilon = 10\%$.

4.4.7 Расчетное значение максимального тока небаланса $I_{\text{нб.пуск}}$, A , соответствующее максимальному броску пускового тока электродвигателя $I_{\text{бр.пуск}}$, определяют по формуле:

$$I_{\text{нб.пуск}} = (\varepsilon_1 + \gamma + \delta) \cdot I_{\text{бр.пуск}}, \quad (14)$$

где γ - **основная** относительная погрешность измерения терминалом дифференциального тока, определяемая суммой погрешностей двух токовых каналов (погрешность каждого канала - 2,5 %);

δ - технологический запас, обусловленный наличием **дополнительной** погрешности измерения терминала. Принимают равным половине основной погрешности измерения дифференциального тока γ (2,5%).

4.4.8 Максимальный ток небаланса в цепях дифференциальной

¹ См. с. 23, рис. 12,б

защиты $I_{\text{раб.пуск}}$, А, зависит от значения максимального броска пускового тока электродвигателя при коэффициенте отстройки $k_{\text{отс}} = 1,2$.

Для его вычисления используют формулу:

$$I_{\text{раб.пуск}} \geq k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб.пуск}}. \quad (15)$$

4.4.9 Расчет коэффициента торможения защиты $k_{\text{торм}}$ выполняют по формуле:

$$k_{\text{торм}} \geq \frac{I_{\text{раб.пуск}}}{I_{\text{бр.пуск}}} = k_{\text{отс}} \cdot (\varepsilon_1 + \gamma + \delta). \quad (16)$$

Полученный по формуле (16) результат округляют в большую сторону до сотых долей.

4.4.10 Уставку срабатывания дифференциальной токовой отсечки $I_{\text{ДТО}}$, А, определяют по формуле (17), учитывающей необходимость отстройки от максимального тока небаланса $I_{\text{ДТО}} \geq I_{\text{нб.пуск}}$ при максимальном броске пускового тока электродвигателя:

$$I_{\text{ДТО}} = k_{\text{торм}} \cdot I_{\text{бр.пуск}}. \quad (17)$$

4.4.11 Максимальное значение тока небаланса $I_{\text{нб. min. расч}}$, А, при номинальном токе двигателя находят по формуле:

$$I_{\text{нб. min. расч}} = (\varepsilon_2 + \gamma + \delta) \cdot I_{\text{ном. дв}}. \quad (18)$$

4.4.12 Уставку $I_{\text{ДЗТ}}$, А, вычисляют по формуле, в которой $k_{\text{отс}} = 1,2$:

$$I_{\text{ДЗТ}} \geq k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб. min. расч}}. \quad (19)$$

Значение уставки $I_{\text{ДЗТ}}$ выбирают из диапазона от $0,3 \cdot I_{\text{ном}}$ до $1,2 \cdot I_{\text{ном}}$ в зависимости от рекомендаций, изложенных в 4.3.1.

При выборе уставки $I_{\text{ДЗТ}}$, превышающей номинальный ток двигателя, следует применять сигнализацию небаланса (для сигнализации о неисправности измерительных цепей) с уставкой $K_{\text{НБ}}$ от 0,4 до 0,6.

Срабатывание сигнализации происходит при превышении дифференциальным током уставки $K_{\text{НБ}} \cdot I_{\text{ДЗТ}}$.

4.4.13 В терминале БМРЗ-УЗД предусмотрен алгоритм ДЗТ с очувствлением¹ (рисунок 4). При использовании этого алгоритма необходимо ввести две уставки – $I_{\text{ДЗТ_ГРУБ}}$ и $I_{\text{ДЗТ_ЧУВСТ}}$. Значение уставки $I_{\text{ДЗТ_ГРУБ}}$ выбирают больше номинального тока двигателя, а уставки $I_{\text{ДЗТ_ЧУВСТ}}$ – меньше номинального тока двигателя.

¹ Авторы алгоритма Пирогов М.Г, Михалев С.В.

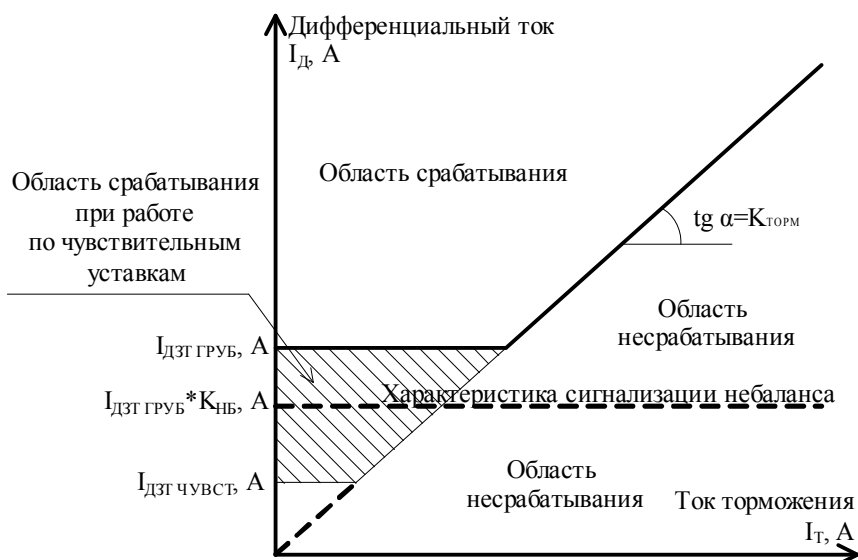


Рисунок 4 - Характеристики ДЗТ с очувствлением

Данный алгоритм постоянно работает по грубым уставкам. При превышении аварийной составляющей любого из фазных токов стороны питания значения $3,5 \cdot I_{\text{ДЗТ_ГРУБ}}$ данный алгоритм переходит на работу по чувствительным уставкам.

Если функцию очувствления не используют, то в качестве уставки $I_{\text{ДЗТ}}$ принимают $I_{\text{ДЗТ_ГРУБ}}$.

4.4.13.1 Использование алгоритма ДЗТ с очувствлением позволяет избежать отключений электродвигателя при:

- обрывах (одного, двух или нескольких проводов в измерительных цепях;
- различных видах замыканий в измерительных цепях;
- повреждении одного или нескольких измерительных трансформаторов тока.

4.4.14 Для построения характеристики ДЗТ, значение тока торможения $I_{\text{торм.1}}$, А, которому соответствует точка излома характеристики дифференциальной защиты, находим по формуле:

$$I_{\text{торм.1}} = \frac{I_{\text{ДЗТ}}}{k_{\text{торм}}} \quad (20)$$

4.4.15 Выдержки времени для алгоритмов ДЗТ и ДТО принимают равными нулю.

4.4.16 Коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя $k_q^{(2)}$, определяют по формуле:

$$k_q^{(2)} = \frac{I_{\text{КЗ}}^{(2)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{КЗ}}^{(3)}}{I_{\text{ДЗТ}}} \quad (21)$$

4.4.17 Для многоскоростных двигателей расчет уставок токовой отсечки осуществляют для каждой частоты вращения отдельно, аналогично расчету уставок для односкоростных двигателей.

4.5 Расчет уставок защит электродвигателя с плавным пуском

4.5.1 В настоящее время не существует отечественных стандартов и правил, регламентирующих построение защит двигателя с плавным пуском.

Предлагаемый ниже вариант исполнения защит базируется на практическом опыте авторов и оценке ими различных вариантов исполнения указанных защит. Окончательное решение о применении того или иного исполнения защит принимает организация, осуществляющая проектирование защиты и расчет уставок.

ВНИМАНИЕ! ПРИ ВЫБОРЕ ВАРИАНТА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТЫ ДВИГАТЕЛЯ С ПЛАВНЫМ ПУСКОМ СЛЕДУЕТ В ПЕРВУЮ ОЧЕРЕДЬ УЧИТЫВАТЬ РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЯ УСТРОЙСТВА ПЛАВНОГО ПУСКА.

4.5.2 При использовании для запуска двигателя устройства плавного пуска УПП (рисунок 5), рекомендуется применение в качестве защит от междупазных замыканий:

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

4.5.3 Расчет уставок ТО, ДЗТ и ДТО, установленных в ячейке питания двигателя от сети, выполняют аналогично расчету уставок защит для прямого пуска, при необходимости защита должна быть отстроена от тока самозапуска (см.4.4.3, 4.4.5).

4.5.4 Дифференциальная защита в ячейке питания от сети, во избежание ложного срабатывания, **должна** быть выведена на время пуска электродвигателя, например, блокироваться при снижении максимального из трёх фазных токов со стороны питания электродвигателя ниже значения, равного 75 % холостого хода электродвигателя.

4.5.5 После выполнения пуска электродвигателя от УПП и завершения перевода питания электродвигателя на ячейку питания от сети, рекомендуется дифференциальную защиту ячейки УПП выводить из работы.

4.5.6 При организации защит и цепей автоматики ячейки питания УПП должны быть учтены рекомендации производителя УПП.

В ячейке питания УПП рекомендуется применять токовую отсечку и, при необходимости, дифференциальную токовую отсечку.

4.5.6.2 Уставку срабатывания ДТО ячейки УПП $I_{ДТО}$, А, при использовании УПП определяют по формуле:

$$I_{ДТО} = 1,1 \cdot k_{УПП} \cdot I_{ном.дв} , \quad (22)$$

где $k_{УПП}$ - предельная кратность пускового тока, задаваемая при настройке УПП (как правило, от 3 до 4).

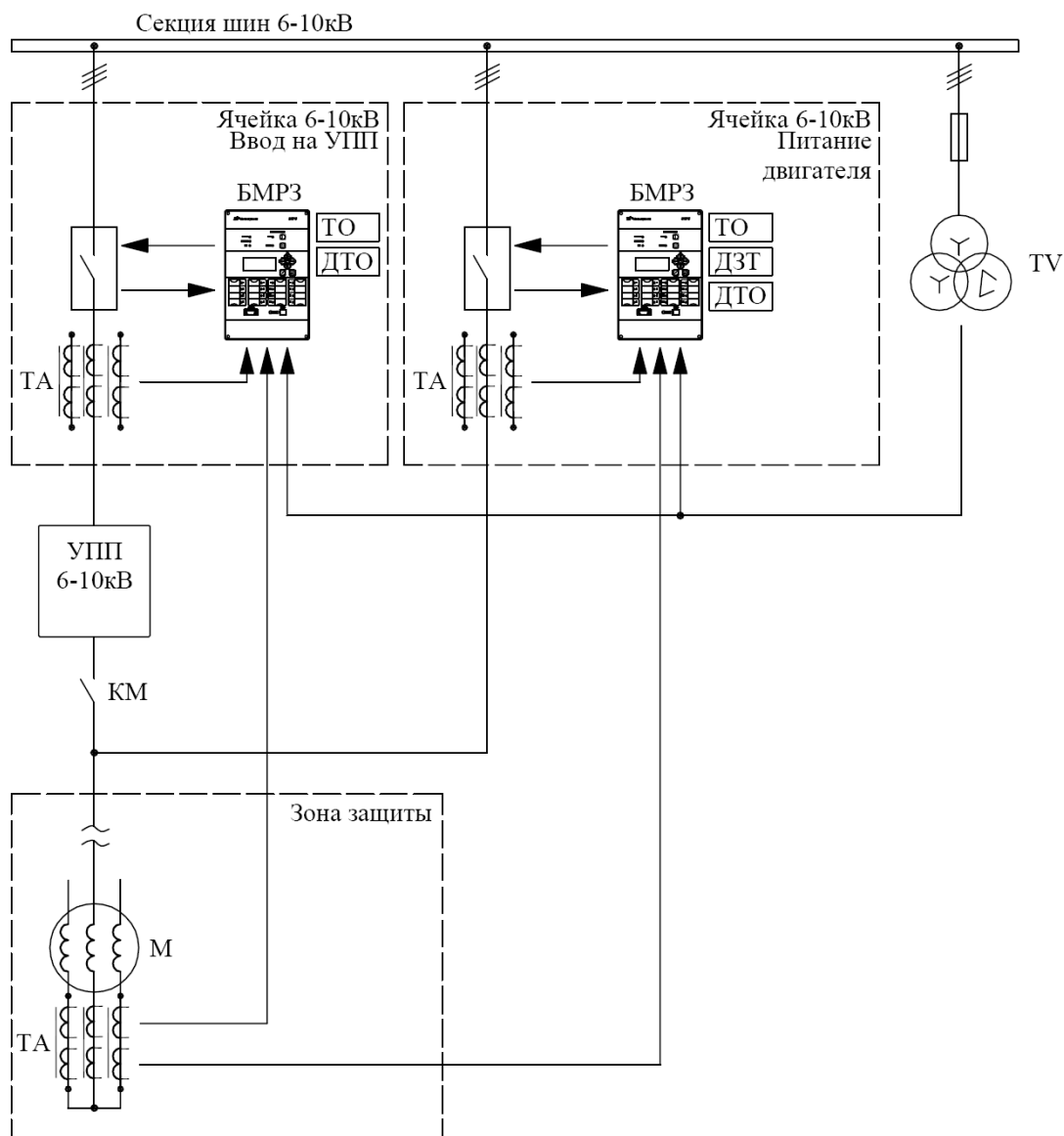


Рисунок 5 – Схема защиты двигателя с плавным пуском от междуфазных КЗ

4.5.6.3 Применение ДЗТ в ячейке питания УПП нецелесообразно.

5 Примеры расчета уставок защит от междуфазных замыканий

5.1 ДЗТ с очувствлением для АД

5.1.1 Требуется определить параметры защиты от междуфазных замыканий для асинхронного электродвигателя серии А4.

Пуск двигателя прямой от напряжения питающей сети.

Двигатель участвует в самозапуске.

Для защиты двигателя использован терминал БМРЗ-УЗД.

Исходные данные для расчета:

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

коэффициент мощности, $\cos\varphi$ 0,89
 напряжение, $U_{ном.дв}$ 6 кВ
 КПД, η 0,955
 кратность пускового тока, $k_{пуск}$ 5,7
 значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД, $I_{ш}^{(3)}$ 3,5 кА
 максимальное сопротивление токовых цепей со стороны:
 - питания электродвигателя (по проекту), не более.....0,5 Ом
 - нейтрали электродвигателя (по проекту), не более.....1,0 Ом

5.1.2 Подставив в формулу (1) исходные данные найдем значение номинального тока электродвигателя $I_{ном.дв}$:

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

Выбираем для стороны питания электродвигателя трансформаторы тока ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р и коэффициентом трансформации $k_{тр} = 150/5$.

Трансформатор тока ТЛМ10-5-82 имеет погрешность не более 10 % при кратности тока до 17 (до 2250 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом [4]¹.

5.1.3 Максимальный бросок пускового тока электродвигателя $I_{бр.пуск}$ участвующего в процессе самозапуска, определим по формуле (2) с учетом изложенного в 4.2.8:

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

5.1.4 Ток срабатывания ТО $I_{>>>}$ принимаем равным 1650 А.

5.1.5 Так как трансформаторы тока при токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>} = 1815$ обеспечивают погрешность не более 10%, они пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки.

5.1.6 Значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя $I_{кз}^{(2)}$, и коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_{ч}^{(2)}$ определяем по формулам (7), (8):

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

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

5.1.7 Выдержку времени защиты устанавливаем нулевую.

¹См. с. 118, рис. П2-6

5.1.8 В связи с тем, что значение коэффициента чувствительности ТО оказалось меньше 2, для защиты данного двигателя от междуфазных замыканий необходимо дополнительно применить дифференциальную защиту.

5.1.9 Для этой защиты используем со стороны нейтрали электродвигателя такие же трансформаторы тока ТЛМ10-5-82, которые были выбраны ранее для стороны питания.

Погрешность трансформаторов тока ТЛМ10-5-82 не превышает 10 % при кратности тока до 12 (до 1800 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом [4].

В связи с тем, что погрешность выбранных ТТ не превышает 10 %, они удовлетворяют требованиям [1]¹, предъявляемым к ним при использовании в цепях дифференциальной защиты.

5.1.10 По типовой кривой намагничивания для электротехнической стали (см. рисунок 3) определяем полные относительные погрешности ТТ, установленных со стороны нейтрали электродвигателя:

$\varepsilon_1 = 0,1$ - в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей;

$\varepsilon_2 = 0,1$ - при номинальном токе электродвигателя.

5.1.11 Расчетное значение максимального тока небаланса $I_{нб.пуск}$, соответствующее максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей $I_{бр.пуск}$ найдем по формуле (14), подставив в неё исходные значения величин:

$$I_{нб.пуск} = (\varepsilon_1 + \gamma + \delta) \cdot I_{бр.пуск} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 1626 \approx 285 \text{ А.}$$

5.1.12 Максимальный ток небаланса в цепях дифференциальной защиты $I_{раб.пуск}$, соответствующий максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учетом коэффициента отстройки $k_{отс} = 1,2$, находим по формуле (15):

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

5.1.13 Коэффициент торможения защиты $k_{торм}$ находим, используя формулу (16):

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

Используя полученное значение коэффициента торможения, найдем по формуле (17) уставку дифференциальной токовой отсечки $I_{дто}$, обеспечивающую отстройку от максимального тока небаланса при максимальном броске пускового тока электродвигателя $I_{бр.пуск}$:

¹ См. п.3.2.29

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

5.1.14 По формуле (18) определяем максимальное значение тока небаланса $I_{\text{нб. min. расч}}$, при номинальном токе двигателя:

$$I_{\text{нб. min. расч}} = (\varepsilon_2 + \gamma + \delta) \cdot I_{\text{ном.дв}} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 113,2 = 19,81 \text{ А.}$$

5.1.15 Минимальное значение уставки $I_{ДЗТ}$ находим по соотношению (19):

$$I_{ДЗТ} \geq k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб. min. расч}} = 1,2 \cdot 0,175 \cdot I_{\text{ном.дв}} = 0,21 \cdot I_{\text{ном.дв}}$$

По условию расчета, значение $I_{ДЗТ}$ выбираем больше номинального тока электродвигателя:

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

5.1.16 По формуле (20) находим значение тока торможения $I_{\text{торм1}}$, соответствующее точке излома характеристики дифференциальной защиты:

$$I_{\text{торм.1}} = \frac{I_{ДЗТ}}{k_{\text{торм}}} = \frac{135,8}{0,21} = 647 \text{ А.}$$

5.1.17 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимаем равными нулю.

5.1.18 Для проверки чувствительности ДЗТ по формуле (21) определяем коэффициент чувствительности защиты $k_{\text{ч}}^{(2)}$ при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя:

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

Поскольку коэффициент чувствительности больше 2, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

5.1.19 По результатам выполненных расчетов строим характеристику работы защиты (рисунок 6).

5.1.20 При использовании для защиты двигателя терминала БМРЗ-УЗД, для повышения чувствительности защиты и исключения излишнего её срабатывания при неисправности токовых цепей имеется возможность использовать алгоритм очувствления ДЗТ.

5.1.20.1 В качестве уставки $I_{ДЗТ_ГРУБ}$ используем вычисленное в п. 5.1.15 значение $I_{ДЗТ} \approx 135,8 \text{ А.}$

5.1.20.2 Выбираем уставку $I_{ДЗТ_ЧУВСТ}$ меньше номинального тока двигателя:

$$I_{ДЗТ_ЧУВСТ} = 0,3 \cdot I_{\text{ном.дв}} \approx 34 \text{ А.}$$

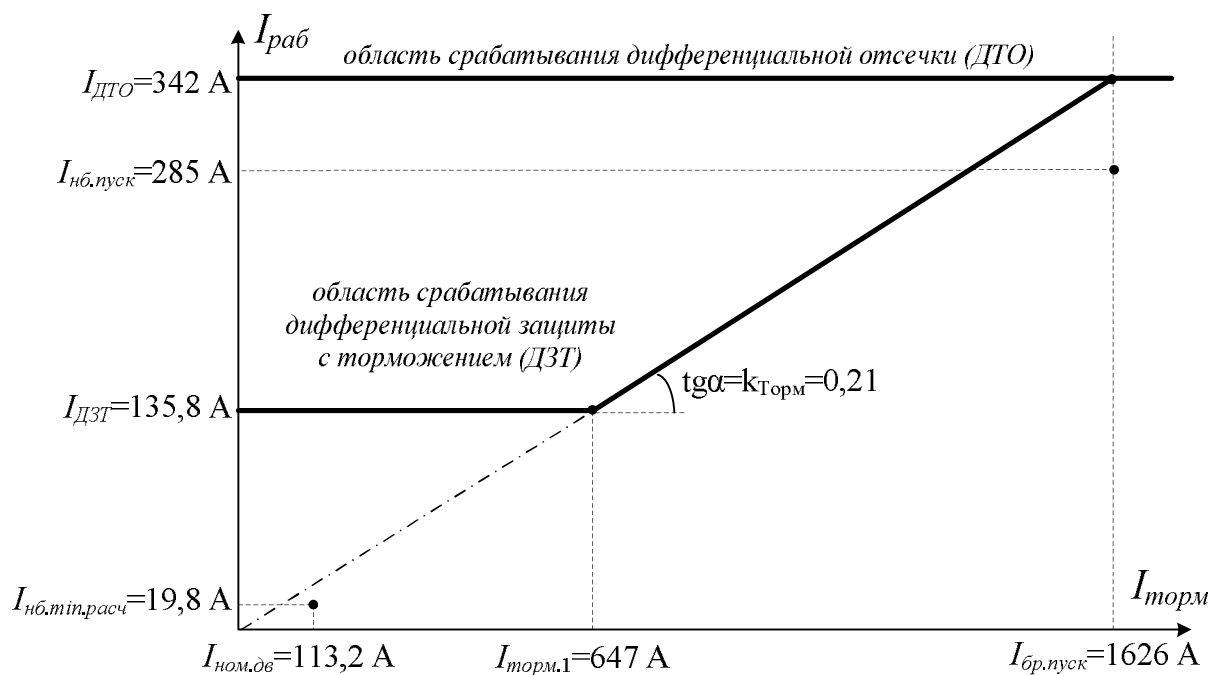


Рисунок 6 – Расчетная характеристика дифференциальной защиты АД серии А4 мощностью 1000 кВт

5.1.21 По результатам расчета строим характеристику работы защиты терминала БМРЗ-УЗД (рисунок 7).

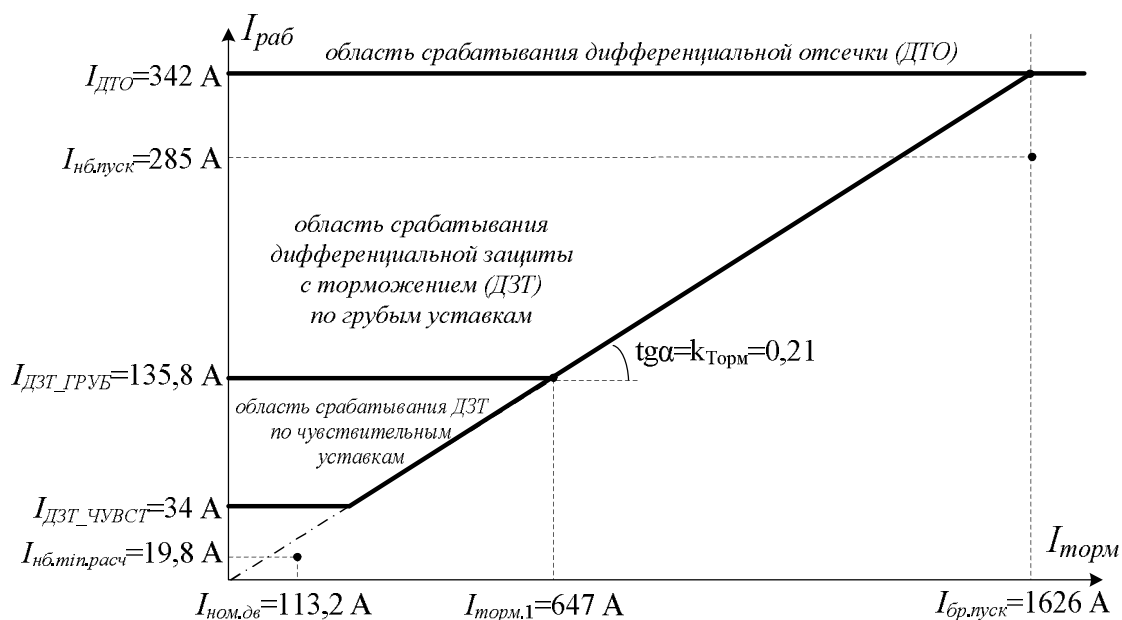


Рисунок 7 – Расчетная характеристика дифференциальной защиты двигателя серии А4 мощностью 1000 кВт (ДЗТ с очувствлением)

5.2 ДЗТ с уставкой меньше номинального тока АД

5.2.1 Требуется определить параметры защиты от междуфазных замыканий асинхронного электродвигателя ДАЗО-2000-6.

Пуск двигателя прямой от напряжения питающей сети.

Двигатель в самозапуске не участвует

Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{ном.дв}$	2000 кВт
коэффициент мощности, $\cos \varphi$	0,9
напряжение, $U_{ном.дв}$	6 кВ
КПД, η	0,961
кратность пускового тока, $k_{пуск}$	7
значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД, $I_{ш}^{(3)}$	5 кА
максимальное сопротивление токовых цепей со стороны:	
- питания электродвигателя (по проекту), не более	0,5 Ом
- нейтрали электродвигателя (по проекту), не более	1,0 Ом

5.2.2 По формуле (1) определяем значение номинального тока электродвигателя $I_{ном.дв}$:

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

Для стороны питания электродвигателя выбираем трансформаторы тока ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р и коэффициентом трансформации $k_{тр} = 300/5$.

Погрешность выбранных ТТ при кратности тока до 17 (до 5100 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом не превышает 10 % [4]¹.

5.2.3 По формуле (2) определяем максимальный бросок пускового тока $I_{бр.пуск}$ электродвигателя, не участвующего в процессе самозапуска:

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

5.2.4 Выбираем ток срабатывания ТО $I_{>>>} = 2810 \text{ А.}$

5.2.5 Выбранные нами ТТ пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки, поскольку при токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>} = 3091 \text{ А}$ их погрешность не превышает 10 %.

5.2.6 Ток двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя $I_{кз}^{(2)}$ и коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_q^{(2)}$ находим по формулам (7) и (8):

¹ См. с.118, рис. П2-6

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

$$k_q^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{>>>}} = \frac{4330}{2810} \approx 1,54.$$

5.2.7 Выдержку времени защиты устанавливаем нулевую.

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

5.2.9 Для установки со стороны нейтрали электродвигателя выбираем ТТ аналогичные ТТ, устанавливаемым со стороны питания.

При кратности тока до 12 (до 3600 А при номинальном токе 300 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом эти ТТ имеют погрешность не превышающую 10 % [4]¹.

ТТ удовлетворяют требованиям ПУЭ для применения в цепях дифференциальной защиты (см. [1]²), так как их погрешность не превышает 10 % при номинальном токе двигателя.

5.2.10 Полные относительные погрешности ТТ, установленных со стороны нейтрали электродвигателя, находим по типовой кривой намагничивания для электротехнической стали (см. рисунок 3):

$\varepsilon_1 = 0,1$ - в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей;

$\varepsilon_2 = 0,1$ - при номинальном токе электродвигателя.

5.2.11 Максимальный ток небаланса $I_{нб.пуск}$ соответствующий максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей $I_{бр.пуск}$, А, находим по формуле (14):

$$I_{нб.пуск} = (\varepsilon_1 + \gamma + \delta) \cdot I_{бр.пуск} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 2804 \approx 491 \text{ А}.$$

5.2.12 Максимальный ток небаланса в цепях дифференциальной защиты, обусловленный максимальным значением броска пускового тока электродвигателя при коэффициенте отстройки $k_{отс} = 1,2$ находим по формуле (15):

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

5.2.13 Коэффициент торможения $k_{торм}$ находим по формуле (16) и округляем до сотых в большую сторону:

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

¹См. с.118, рис. П2-6.

² См. п.3.2.29

Используя полученное значение коэффициента торможения, найдем по формуле (17) уставку дифференциальной токовой отсечки $I_{ДТО}$, обеспечивающую отстройку от максимального тока небаланса при максимальном броске пускового тока электродвигателя $I_{бр.пуск}$:

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

5.2.14 Максимальный ток небаланса $I_{нб. min. расч}$ при номинальном токе двигателя находим по формуле (18):

$$I_{нб. min. расч} = (\varepsilon_2 + \gamma + \delta) \cdot I_{ном.дв} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 222,5 = 38,94 \text{ А.}$$

5.2.15 Минимальную уставку $I_{ДЗТ}$ находим по соотношению (19):

$$I_{ДЗТ} \geq k_{отс} \cdot I_{нб. min. расч} = 1,2 \cdot 0,175 \cdot I_{ном.дв} = 0,21 \cdot I_{ном.дв}.$$

В связи с тем, что минимальное значение $I_{ДЗТ} < 0,3 I_{ном.дв}$, принимаем:

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

5.2.16 Для построения характеристики ДЗТ (рисунок 8) определяем по формуле (20) ток торможения $I_{торм.1}$, соответствующий точке её излома:

$$I_{торм.1} = \frac{I_{ДЗТ}}{k_{торм}} = \frac{66,75}{0,21} \approx 318 \text{ А.}$$

5.2.17 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимаем равными нулю.

5.2.18 Для проверки ДЗТ, определяем по формуле (21) коэффициент чувствительности защиты $k_{\chi}^{(2)}$ при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя:

$$k_{\chi}^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{ДЗТ}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{кз}^{(3)}}{I_{ДЗТ}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{5000}{66,75} \approx 64,9$$

Поскольку коэффициент чувствительности больше 2, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

5.2.19 По результатам выполненных расчетов строим характеристику работы защиты (рисунок 8).

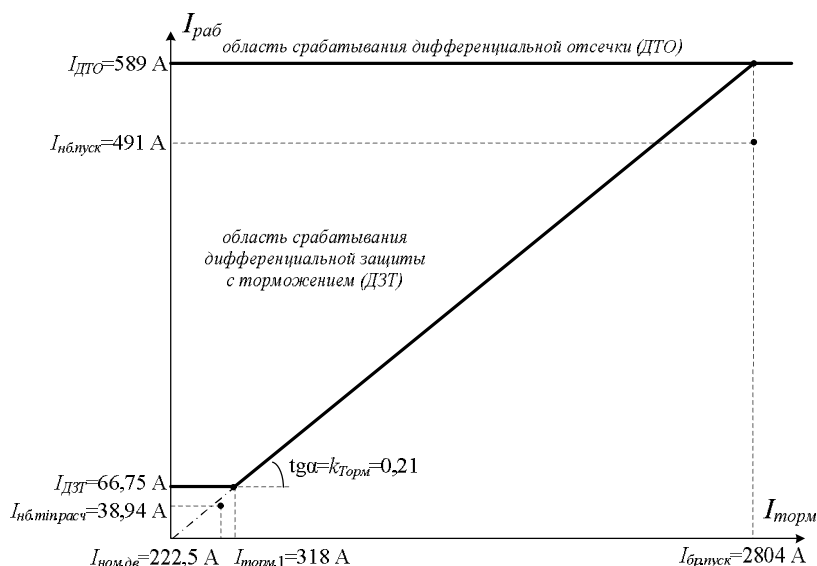


Рисунок 8 – Расчетная характеристика дифференциальной защиты электродвигателя ДАЗО-2000-6

5.3 ДЗТ с уставкой меньше номинального тока СД

5.3.1 Требуется определить параметры защиты от междуфазных замыканий синхронного электродвигателя СДНЗ.

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

Двигатель в процессе самозапуска не участвует.

Для защиты СД использован БМРЗ-УЗД.

Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{ном.дв}$	6300 кВт
коэффициент мощности, $\cos \varphi$ (см. ГОСТ Р 52776-2007)	0,9
напряжение, $U_{ном.дв}$	10 кВ
кпд, η	0,964
кратность пускового тока, $k_{пуск}$	6
значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД, $I_{ш}^{(3)}$	10 кА
максимальное сопротивление токовых цепей со стороны:	
- питания электродвигателя (по проекту), не более	0,5 Ом
- нейтрали электродвигателя (по проекту), не более	1,0 Ом

5.3.2 Поскольку мощность двигателя более 5 МВт, требуется применение дифференциальной защиты.

Выполняем расчет ТО, поскольку планируем применить её в качестве резервной защиты.

5.3.3 По формуле (1) определяем значение номинального тока электродвигателя $I_{ном.дв}$:

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

Для установки со стороны питания электродвигателя выбираем трансформаторы тока ТЛМ-10 с сердечником типа Р и коэффициентом трансформации $k_{тр} = 500/5$.

Данные ТТ при кратности тока до 22 (до 11000 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом имеют погрешность не превышающую 10 % [4]¹.

5.3.4 Максимальный бросок пускового тока электродвигателя, не участвующего в процессе самозапуска, $I_{бр.пуск}$ находим по формуле (2):

$$I_{бр.пуск} = k_{анер} \cdot k_{пуск} \cdot I_{номдв} = 1,8 \cdot 6 \cdot 419 \approx 4525 \text{ А.}$$

5.3.5 Выбираем ток срабатывания ТО $I_{>>>} = 4600 \text{ А.}$

5.3.6 При токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>} = 5060 \text{ А}$ погрешность ТТ не превышает 10 %, поэтому они пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки.

5.3.7 Ток двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя $I_{кз}^{(2)}$ и коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_q^{(2)}$ находим по формулам (7), (8):

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

$$k_q^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{>>>}} = \frac{8660}{4600} \approx 1,88.$$

5.3.8 Выдержку времени защиты принимаем равной нулю.

5.3.9 Для установки со стороны нейтрали электродвигателя применим ТТ аналогичные выбранным ранее.

Погрешность трансформаторов типа ТЛМ – 10 при кратности тока до 15 (до 7500 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не превышающем 1 Ом не превосходит 10 % [4]², следовательно ТТ этого типа удовлетворяют требованиям ПУЭ [1]³ по установке в цепях дифференциальной защиты.

5.3.10 По типовой кривой намагничивания для электротехнической стали (см. рисунок 3) определяем полные относительные погрешности ТТ, установленных со стороны нейтрали электродвигателя:

$\varepsilon_1 = 0,1$ - в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей;

¹ См. с.118, рис. П2-6

² См. стр.118, рис. П2-6

³ См. п.3.2.29

$\varepsilon_2 = 0,1$ - при номинальном токе электродвигателя.

5.3.11 Расчетное значение максимального тока небаланса $I_{нб.пуск}$ соответствующее максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом аperiодической составляющей $I_{бр.пуск}$ находим по формуле (14):

$$I_{нб.пуск} = (\varepsilon_1 + \gamma + \delta) \cdot I_{бр.пуск} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 4525 \approx 792 \text{ А.}$$

5.3.12 Максимальный ток небаланса в цепях дифференциальной защиты, обусловленный максимальным значением броска пускового тока электродвигателя при коэффициенте отстройки $k_{отс} = 1,2$ находим по формуле (15):

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

5.3.13 Коэффициент торможения $k_{торм}$ найдем по формуле (16):

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

Используя полученное значение коэффициента торможения, найдем по формуле (17) уставку дифференциальной токовой отсечки $I_{ДТО}$, обеспечивающую отстройку от максимального тока небаланса при максимальном броске пускового тока электродвигателя $I_{бр.пуск}$:

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

5.3.14 Максимальное значение тока небаланса $I_{нб.min.расч}$ при номинальном токе двигателя находим по формуле (18):

$$I_{нб.min.расч} = (\varepsilon_2 + \gamma + \delta) \cdot I_{ном.дв} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 419 = 73,33 \text{ А.}$$

5.3.15 Минимальную уставку $I_{ДЗТ}$ находим по соотношению (19):

$$I_{ДЗТ} \geq k_{отс} \cdot I_{нб.min.расч} = 1,2 \cdot 0,175 \cdot I_{ном.дв} = 0,21 \cdot I_{ном.дв}$$

В связи с тем, что минимальное значение $I_{ДЗТ} < 0,3 I_{ном.дв}$, принимаем:

$$I_{ДЗТ} = 0,3 I_{ном.дв} = 0,3 \cdot 419 = 125,7 \text{ А.}$$

5.3.16 Для построения характеристики ДЗТ (рисунок 9), определяем по формуле (20) значение тока торможения $I_{торм.1}$ соответствующее точке излома характеристики дифференциальной защиты:

$$I_{торм.1} = \frac{I_{ДЗТ}}{k_{торм}} = \frac{125,7}{0,21} \approx 599 \text{ А.}$$

5.3.17 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимаем равными нулю.

5.3.18 По формуле (21) определяем коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя $k_{\chi}^{(2)}$:

$$k_{\chi}^{(2)} = \frac{I_{\text{кз}}^{(2)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{кз}}^{(3)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{10000}{125,7} \approx 68,9$$

Данная защита удовлетворяет требованиям ПУЭ, так как коэффициент чувствительности больше 2.

5.3.19 По результатам выполненных расчетов строим характеристику работы защиты (рисунок 9).

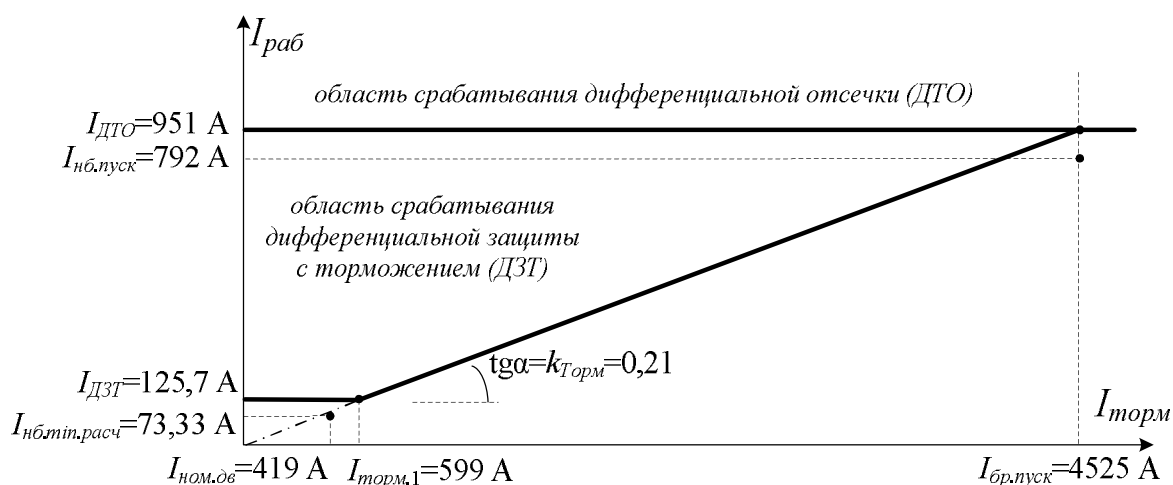


Рисунок 9 – Расчетная характеристика дифференциальной защиты электродвигателя СДНЗ мощностью 6300 кВт

5.4 ДЗТ с уставкой меньше номинального тока СД с реакторным пуском

5.4.1 Требуется определить параметры защиты от междуфазных замыканий синхронного электродвигателя СД-3200-2 с токоограничивающим бетонным реактором типа БР-10-1000-035.

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

Двигатель в процессе самозапуска не участвует.

Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{\text{ном.дв}}$ 3200 кВт
 коэффициент мощности, $\cos \varphi$ (см. ГОСТ Р 52776-2007) 0,9
 напряжение, $U_{\text{ном.дв}}$ 10 кВ
 КПД, η 0,972
 кратность пускового тока, $k_{\text{пуск}}$ 6,63
 значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД, $I_{\text{ш}}^{(3)}$ 1,7 кА
 максимальное сопротивление токовых цепей со стороны:

- питания электродвигателя (по проекту), не более 0,5 Ом
- нейтрали электродвигателя (по проекту), не более 1,0 Ом
- длительно допустимый ток реактора 1000 А
- номинальное индуктивное сопротивление реактора 0,35 Ом

5.4.2 По формуле (1) определяем значение номинального тока электродвигателя $I_{ном.дв}$:

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

Для установки со стороны питания электродвигателя выбираем ТТ типа ТЛМ10-5-82 с коэффициентом трансформации $k_{тр} = 300/5$ и сердечником типа Р. Эти ТТ при кратности тока до 17 (до 5100 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом имеют погрешность не более 10 % (см. [4]¹).

5.4.3 Максимальный бросок пускового тока электродвигателя при прямом пуске $I_{бр.прям.пуск}$ находим по формуле (2):

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

5.4.4 Полное пусковое индуктивное сопротивление двигателя x_d найдем по формуле (4):

$$x_d = \frac{U_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot I_{бр.прям.пуск}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 2518} = 2,29 \text{ Ом.}$$

5.4.5 Вычисляем по формуле (23) индуктивное сопротивление сети x_c необходимое для определения максимального броска пускового тока:

$$x_c \approx z_c = \frac{U_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot I_{ш}^{(3)}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 1700} = 3,4 \text{ Ом.} \quad (23)$$

5.4.6 Подставив найденные значения в формулу (5) вычислим максимальный бросок пускового тока электродвигателя при реакторном пуске $I_{бр.пуск}$ по формуле:

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

5.4.7 Выбираем ток срабатывания ТО $I_{>>>} = 1000 \text{ А.}$

5.4.8 Так как при токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>} = 1100 \text{ А}$ погрешность ТТ не превышает 10 %, они пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки [1]².

¹ См. с.118, рис. П2-6.

² См. п.3.2.29

5.4.9 Ток двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя $I_{кз}^{(2)}$ и коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_q^{(2)}$ найдем по формулам (7), (8):

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{кз}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1700 \text{ А} \approx 1472 \text{ А},$$

$$k_q^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{>>>}} = \frac{1472}{1000} \approx 1,47.$$

5.4.10 Выдержку времени защиты принимаем равной нулю.

5.4.11 В связи с тем, что коэффициент чувствительности ТО оказался меньше 2, для защиты данного двигателя от междофазных замыканий дополнительно необходимо применить дифференциальную защиту.

5.4.12 Для установки со стороны нейтрали электродвигателя выбираем ТТ, аналогичные устанавливаемым со стороны питания.

Трансформаторы тока ТЛМ10-5-82 удовлетворяют требованиям ПУЭ [1]¹ по установке в цепях дифференциальной защиты, так как при кратности тока до 12 (до 3600 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом имеют погрешность не превышающую 10 % [4]².

5.4.13 По типовой кривой намагничивания для электротехнической стали (см. рисунок 3) определяем полные относительные погрешности ТТ, установленных со стороны нейтрали электродвигателя:

$\varepsilon_1 = 0,1$ - в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей;

$\varepsilon_2 = 0,1$ - при номинальном токе электродвигателя.

5.4.14 Максимальный ток небаланса $I_{нб.пуск}$ соответствующий максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей $I_{бр.пуск}$ найдем по формуле (14):

$$I_{нб.пуск} = (\varepsilon_1 + \gamma + \delta) \cdot I_{бр.пуск} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 956 \approx 167,3 \text{ А}.$$

5.4.15 Максимальный ток небаланса в цепях дифференциальной защиты $I_{раб.пуск}$ обусловленный максимальным значением броска пускового тока электродвигателя при коэффициенте отстройки $k_{отс} = 1,2$ найдем по формуле (15):

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

5.4.16 Коэффициент торможения $k_{торм}$ найдем по формуле (16):

¹ См. п.3.2.29

² См. с.118, рисунок П2-6

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

Используя полученное значение коэффициента торможения, найдем по формуле (17) уставку дифференциальной токовой отсечки $I_{\text{ДТО}}$, обеспечивающую отстройку от максимального тока небаланса при максимальном броске пускового тока электродвигателя $I_{\text{бр.пуск}}$:

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

5.4.17 Максимальное значение тока небаланса при номинальном токе $I_{\text{нб. min. расч}}$ находим по формуле (18):

$$I_{\text{нб. min. расч}} = (\varepsilon_2 + \gamma + \delta) \cdot I_{\text{ном.дв}} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 211 = 37 \text{ А.}$$

5.4.18 Минимальную уставку $I_{\text{ДЗТ}}$ находим по соотношению (19):

$$I_{\text{ДЗТ}} \geq k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб. min. расч}} = 1,2 \cdot 0,175 \cdot I_{\text{ном.дв}} = 0,21 \cdot I_{\text{ном.дв}}$$

В связи с тем, что минимальное значение $I_{\text{ДЗТ}} < 0,3 I_{\text{ном.дв}}$, принимаем:

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

5.4.19 Для построения характеристики ДЗТ (рисунок 10), определяем по формуле (20) ток торможения $I_{\text{торм.1}}$ соответствующий точке излома характеристики дифференциальной защиты:

$$I_{\text{торм.1}} = \frac{I_{\text{ДЗТ}}}{k_{\text{торм}}} = \frac{63,3}{0,21} \approx 302 \text{ А.}$$

5.4.20 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимаем равными нулю.

5.4.21 По формуле (21) определяем коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}^{(2)}$ при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя,:

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

Защита удовлетворяет требованиям ПУЭ, так коэффициент чувствительности больше 2.

5.4.20 По результатам выполненных расчетов строим характеристику работы защиты (рисунок 10).

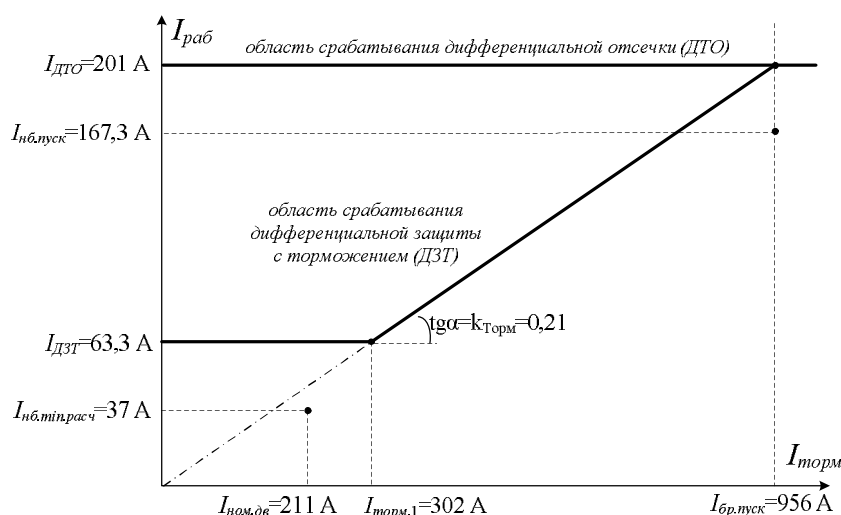


Рисунок 10 – Расчетная характеристика дифференциальной защиты электродвигателя СТД-3200-2 с реакторным пуском

5.5 Токовая отсечка для двухскоростного АД

5.5.1 Требуется определить параметры защиты от междуфазных замыканий двухскоростного асинхронного электродвигателя АДО-1600/1000-10/12 (таблица 1).

Пуск двигателя прямой, с низшей частоты вращения.

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

Исходные данные для расчета:

напряжение, $U_{ном.дв}$ 6 кВ

значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД, $I_{ш}^{(3)}$.. 8 кА

максимальное сопротивление токовых цепей со стороны питания АД (по проекту), не более 0,5 Ом

Таблица 1.

Характеристики электродвигателя	Частота вращения ¹	
	низшая	высшая
номинальная мощность на валу, кВт	$P_{ном.дв.1}$ 1000	$P_{ном.дв.2}$ = 1600
коэффициент мощности	$\cos \varphi_1$ = 0,53	$\cos \varphi_2$ = 0,8
кпд	η_1 = 0,92	η_2 = 0,95
кратность пускового тока	$k_{пуск1}$ = 6,7	$k_{пуск2}$ = 6,5

¹ В инженерной практике часто используют нестандартизированные термины «первая скорость» и «вторая скорость».

5.5.2 Расчет ТО для низшей частоты вращения

5.5.2.1 Номинальный ток электродвигателя для низшей частоты вращения $I_{ном.дв1}$ находим по формуле (1):

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

Выбираем трансформаторы тока ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р и коэффициентом трансформации $k_{тр} = 200/5$.

Погрешность ТТ этого типа не превышает 10 % при кратности тока до 17 (до 3400 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом [4]¹.

5.5.2.2 По формуле (2) с учетом изложенного в 4.2.8 определяем максимальный бросок пускового тока электродвигателя $I_{бр.пуск1}$ для низшей частоты вращения при условии, что он участвует в самозапуске:

$$I_{бр.пуск1} = 1,4 \cdot k_{анер} \cdot k_{пуск1} \cdot I_{номдв1} = 1,4 \cdot 1,8 \cdot 6,7 \cdot 197,3 \approx 3331 \text{ А.}$$

5.5.2.3 Выбираем ток срабатывания ТО $I_{>>>1} = 3350 \text{ А.}$

5.5.2.4 Выбранные ТТ непригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки потому, что при токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>1} = 3685 \text{ А}$ их погрешность превышает 10 %.

Для замены выбираем трансформаторы тока ТЛМ10-5-82 с коэффициентом трансформации 300/5.

Погрешность этих ТТ при кратности тока до 17 (до 5100 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом составляет не более 10 %.

5.5.2.5 По формулам (7), (8) находим ток двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя $I_{кз}^{(2)}$ и коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_{ч1}^{(2)}$:

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

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

5.5.2.6 Выдержку времени защиты устанавливаем равную нулю.

5.5.2.7 Так как коэффициент чувствительности ТО больше 2, то при- менять дополнительно дифференциальную защиту для защиты данного двигателя от междуфазных коротких замыканий не нужно.

5.5.3 Расчет ТО для высшей частоты вращения

5.5.3.1 Номинальный ток электродвигателя $I_{ном.дв2}$ для высшей частоты

¹ См. с.118, рисунок П2-6

вращения находим по формуле (1):

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

Для установки со стороны питания электродвигателя выбираем трансформаторы тока ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р и коэффициентом трансформации $k_{тр} = 300/5$.

Погрешность этих ТТ при кратности тока до 17 (до 5100 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом не превышает 10% [4]¹.

5.5.3.2 По формуле (2) с учетом изложенного в п. 4.2.8 определяем максимальный бросок пускового тока электродвигателя $I_{бр.пуск2}$ для высшей частоты вращения при условии, что он участвует в самозапуске:

$$I_{бр.пуск2} = 1,4 \cdot k_{анер} \cdot k_{пуск2} \cdot I_{номдв2} = 1,4 \cdot 1,8 \cdot 6,5 \cdot 202,6 \approx 3319 \text{ А.}$$

5.5.3.3 Выбираем ток срабатывания ТО $I_{>>>2} = 3350 \text{ А.}$

5.5.3.4 Так как при токе $1,1 \cdot I_{>>>2} = 3685 \text{ А}$ погрешность выбранных ТТ не превышает 10 %, они пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки.

5.5.3.5 По формулам (7), (8) определяем ток двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя $I_{кз}^{(2)}$ и коэффициент чувствительности при двухфазном КЗ $k_{ч2}^{(2)}$:

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

$$k_{ч2}^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{>>>1}} = \frac{6928}{3350} \approx 2,1.$$

5.5.3.6 Выдержку времени защиты устанавливаем равную нулю.

5.5.3.7 Расчетное значение коэффициента чувствительности ТО больше 2, поэтому применять дополнительно дифференциальную защиту нет необходимости.

5.6 ДЗТ с током срабатывания больше номинального тока АД с плавным пуском

5.6.1 Требуется определить параметры защиты от междуфазных замыканий асинхронного электродвигателя АДО-3150-6000

Пуск двигателя плавный. В соответствии с настройками УПП максимальная кратность пускового тока: $k_{уIII} = 4$.

Двигатель участвует в самозапуске (в том числе и после

¹ См. с.118, рисунок П2-6

переключения на питание от сети).

Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{ном.дв}$ 3150 кВт
 коэффициент мощности, $\cos\varphi$ 0,83
 напряжение, $U_{ном.дв}$ 6 кВ
 КПД, η 0,968
 кратность пускового тока, $k_{пуск}$ 5,5
 значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД, $I_{ш}^{(3)}$ 8 кА
 максимальное сопротивление токовых цепей со стороны:
 - питания электродвигателя (по проекту), не более 0,5 Ом
 - нейтрали электродвигателя (по проекту), не более 1,0 Ом

5.6.2 Выбираем схему защиты двигателя в соответствии с рисунком 5.

5.6.3 Расчет уставок защит ячейки питания двигателя от сети

5.6.3.1 По формуле (1) и исходным данным определяем номинальный ток электродвигателя:

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

Для установки со стороны питания электродвигателя выбираем трансформаторы тока ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р и коэффициентом трансформации $k_{тр} = 400/5$.

Погрешность этих ТТ при кратности тока до 22 (до 8800 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом не превышает 10% [4]¹.

5.6.3.2 По формуле (2) с учетом изложенного в 4.2.8 определяем максимальный бросок пускового тока электродвигателя $I_{бр.пуск}$ при условии, что он участвует в самозапуске:

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

5.6.3.3 Выбираем ток срабатывания ТО $I_{>>>} = 5250 \text{ А.}$

5.6.3.4 Выбранные ТТ пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки, так как при токе $1,1 \cdot I_{>>>} = 5775 \text{ А}$ их погрешность не превышает 10 %.

5.6.3.5 По формулам (7), (8) определяем ток двухфазного КЗ на вводах питания УПП $I_{кз}^{(2)}$ и коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_{ч}^{(2)}$:

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

¹ См. с.118, рисунок П2-6

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

5.6.3.6 Выдержку времени защиты устанавливаем равной нулю.

5.6.3.7 Для защиты данного двигателя от междуфазных замыканий необходимо применить дифференциальную защиту, так как расчетное значение коэффициента чувствительности ТО меньше 2.

5.6.3.8 Для установки со стороны нейтрали выбираем ТТ, аналогичные выбранным для установки со стороны питания.

Погрешность трансформаторов тока ТЛМ10-5-82 при кратности тока до 15 (до 6000 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом не превышает 10% [4]¹.

5.6.3.9 По типовой кривой намагничивания для электротехнической стали (см. рисунок 3) определяем полные относительные погрешности ТТ, установленных со стороны нейтрали электродвигателя:

$\varepsilon_1 = 0,1$ - в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей;

$\varepsilon_2 = 0,1$ - при номинальном токе электродвигателя.

5.6.3.10 Расчетное значение максимального тока небаланса $I_{\text{нб.пуск}}$ соответствующее максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей $I_{\text{бр.пуск}}$ находим по формуле (14):

$$I_{\text{нб.пуск}} = (\varepsilon_1 + \gamma + \delta) \cdot I_{\text{бр.пуск}} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 5229 \approx 915 \text{ А.}$$

5.6.3.11 Максимальный ток небаланса в цепях дифференциальной защиты, обусловленный максимальным значением броска пускового тока электродвигателя, с учетом значения коэффициента отстройки $k_{\text{отс}} = 1,2$ находим по формуле (15):

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

5.6.3.12 По формуле (16) находим коэффициент торможения и округляем его в большую сторону до сотых:

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

Используя полученное значение коэффициента торможения, найдем по формуле (17) уставку дифференциальной токовой отсечки $I_{\text{ДТО}}$, обеспечивающую отстройку от максимального тока небаланса при максимальном броске пускового тока электродвигателя $I_{\text{бр.пуск}}$:

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

¹ См. с.118, рисунок П2-6

5.6.3.13 По формуле (18) определяем максимальное значение тока небаланса $I_{нб. min. расч}$, А, при номинальном токе двигателя:

$$I_{нб. min. расч} = (\varepsilon_2 + \gamma + \delta) \cdot I_{ном. дв} = (0,1 + 0,05 + 0,025) \cdot 377,3 = 66 \text{ А.}$$

5.6.3.14 Используя формулу (19) найдем уставку $I_{ДЗТ}$:

$$I_{ДЗТ} \geq k_{отс} \cdot I_{нб. min. расч} = 1,2 \cdot 0,175 \cdot I_{ном. дв} = 0,21 \cdot I_{ном. дв}$$

По условиям расчёта значение $I_{ДЗТ}$, А, выбираем равным:

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

5.6.3.15 Для построения характеристики ДЗТ (рисунок 11), определяем по формуле (20) значение тока торможения $I_{торм.1}$ соответствующее точке излома характеристики дифференциальной защиты:

$$I_{торм.1} = \frac{I_{ДЗТ}}{k_{торм}} = \frac{453}{0,21} \approx 2157 \text{ А.}$$

Выбранные для цепей данной защиты ТТ удовлетворяют требованиям, установленным в ПУЭ [1]¹, поскольку их погрешность не превышает 10 % при токе двигателя равном $I_{торм.1}$.

5.6.3.16 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимаем равными нулю.

5.6.3.17 **Вводим блокирование дифференциальных защит при снижении максимального из трёх фазных токов стороны питания электродвигателя ниже 75 % тока холостого хода ЭД.**

5.6.3.18 Для проверки ДЗТ находим по формуле (21) коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя:

$$k_{\chi}^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{ДЗТ}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{кз}^{(3)}}{I_{ДЗТ}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{8000}{453} \approx 15,3.$$

Защита удовлетворяет требованиям ПУЭ, так как расчетное значение коэффициента чувствительности больше 2.

5.6.3.19 По результатам выполненных расчетов строим характеристику работы защиты (рисунок 11).

5.6.4 Расчет уставок защит ячейки питания УПП

5.6.4.1 Для стороны питания УПП и стороны нейтрали электродвигателя выбираем ТТ, аналогичные использованным в сетевой ячейке, т.е. ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р и коэффициентом трансформации $k_{тр} = 400/5$.

Погрешность ТТ этого типа при кратности тока до 15 (до 6000 А) и

¹ См. п.3.2.29

максимальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом не превышает 10 % [4]¹.

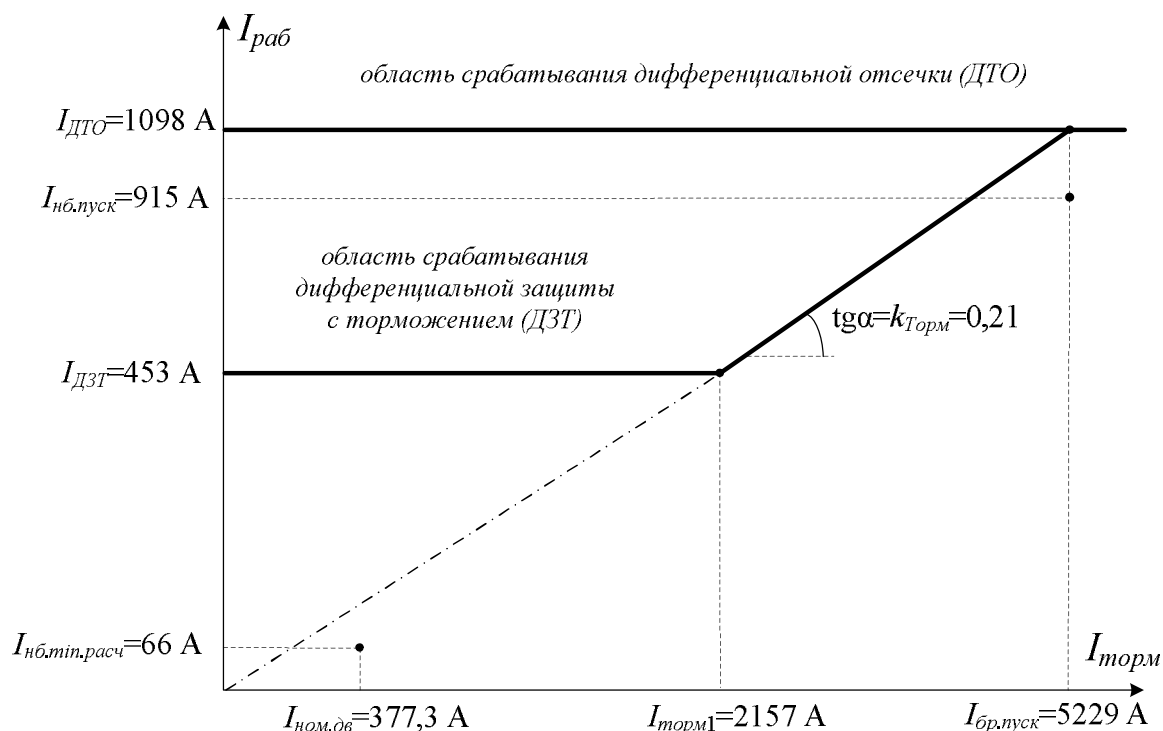


Рисунок 11 – Ячейка питания электродвигателя АДО-3150-6000 от сети.
Расчетная характеристика дифференциальной защиты.

5.6.4.2 Максимальный бросок пускового тока электродвигателя $I_{бр.пуск}$ при прямом пуске (двигатель участвует в процессе самозапуска, в том числе при переключении ячеек питания) находим по формуле (2) с учетом изложенного в п. 4.2.8:

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

5.6.4.3 Выбираем ток срабатывания ТО $I_{>>>} = 5250 \text{ А.}$

5.6.4.4 Выбранные ТТ пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки, так как при токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>} = 5775 \text{ А}$ их погрешность не превышает 10%.

5.6.4.5 По формулам (7), (8) находим ток двухфазного КЗ на вводах питания УПП $I_{кз}^{(2)}$ и коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ $k_q^{(2)}$:

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

¹ См. с.118, рисунок П2-6

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

5.6.4.6 Выдержку времени защиты устанавливаем равную нулю.

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

5.6.4.8 Максимальный бросок пускового тока электродвигателя при плавном пуске $I_{\text{бр.ПП}}$ определяем по формуле (24):

$$I_{\text{бр.ПП}} = k_{\text{УПП}} \cdot I_{\text{ном.дв}} = 4 \cdot 377,3 = 1509 \text{ А} \quad (24)$$

5.6.4.9 По формуле (22) находим уставку срабатывания ДТО $I_{\text{ДТО}}$:

$$I_{\text{ДТО}} = 1,1 \cdot k_{\text{УПП}} \cdot I_{\text{ном.дв}} = 1,1 \cdot I_{\text{бр.ПП}} = 1,1 \cdot 1509 = 1660 \text{ А}$$

5.6.4.10 Выбранные ТТ удовлетворяют требованиям ПУЭ [1]¹, так как их погрешность не превышает 10 % при токе, соответствующем уставке срабатывания ДТО $I_{\text{ДТО}}$.

5.6.4.11 Выдержку времени ДТО принимаем равной нулю.

5.6.4.12 Учитывая изложенное в п. 4.3.8, в ячейке питания УПП не используем ДЗТ.

5.6.4.13 По формуле (8) определяем коэффициент чувствительности ДТО при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя:

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

Защита удовлетворяет требованиям ПУЭ, так как расчетное значение коэффициента чувствительности больше 2.

5.6.4.14 По результатам проведенных расчетов строим характеристику работы ДТО (рисунок 12).

6 Защиты от однофазных замыканий на землю

6.1 Требования ПУЭ к защита от ОЗЗ

6.1.1 В ПУЭ[1] предусмотрено, что защита электродвигателей от ОЗЗ должна применяться при:

- **отсутствии компенсации**, когда токи замыкания на землю превышают 10 А (электродвигатели номинальной мощностью до 2 МВт) или 5 А (электродвигатели номинальной мощностью свыше 2 МВт);
- **наличии компенсации**, когда остаточный (суммарный) ток превышает 10А (электродвигатели номинальной мощностью до 2 МВт) или 5 А (электродвигатели номинальной мощностью свыше 2 МВт).

¹ См. п.3.2.29

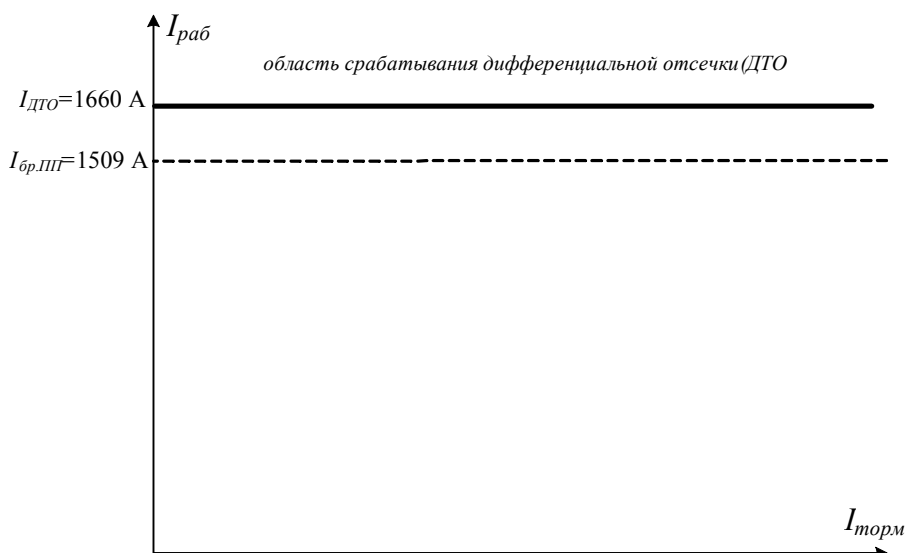


Рисунок 12 Ячейка питания УПП электродвигателя АДО-3150-6000.
Расчетная характеристика ДТО

Ток срабатывания защит электродвигателей от ОЗЗ не должен превышать 10 А (электродвигатели мощностью до 2 МВт) или 5 А (электродвигатели мощностью более 2 МВт). В ПУЭ рекомендовано использовать меньшие токи срабатывания, если это не приводит к усложнению защиты от ОЗЗ.

Для защиты от ОЗЗ рекомендуется использовать трансформаторы тока нулевой последовательности, устанавливаемые, как правило, в распределительном устройстве.

Трансформаторы тока нулевой последовательности допускается устанавливать у выводов электродвигателя в фундаментной яме, если их установка в распределительном устройстве невозможна или может привести к увеличению выдержки времени срабатывания защиты.

Действие защиты электродвигателей от ОЗЗ следует предусматривать без выдержки времени, кроме тех электродвигателей, для которых требуется замедление защиты по условию отстройки от переходных процессов.

Если для отстройки защиты от переходных процессов необходимо вводить выдержку времени, то для отключения двойных замыканий на землю в различных точках должно быть установлено дополнительное токовое реле с первичным током срабатывания, выбираемым из диапазона от 50 до 200 А.

Защита от ОЗЗ должна действовать на отключение электродвигателя. В схемах защиты от ОЗЗ синхронных электродвигателей необходимо предусмотреть действие защиты на устройство автоматического гашения поля АГП (при его наличии).

6.2 Защита от ОЗЗ в терминалах БМРЗ

6.2.1 В терминалах БМРЗ предусмотрены двухступенчатые алгоритмы защиты от ОЗЗ.

Первая ступень алгоритма обеспечивает защиту электродвигателя при возникновении однофазного замыкания на землю.

Вторая ступень алгоритма обеспечивает защиту от двойных замыканий на землю и используется в тех случаях, когда для отстройки от переходных процессов первая ступень защиты действует с выдержкой времени.

6.3 Расчет уставок защиты от ОЗЗ

6.3.1 Принцип работы защиты от ОЗЗ поясняет рисунок 13.

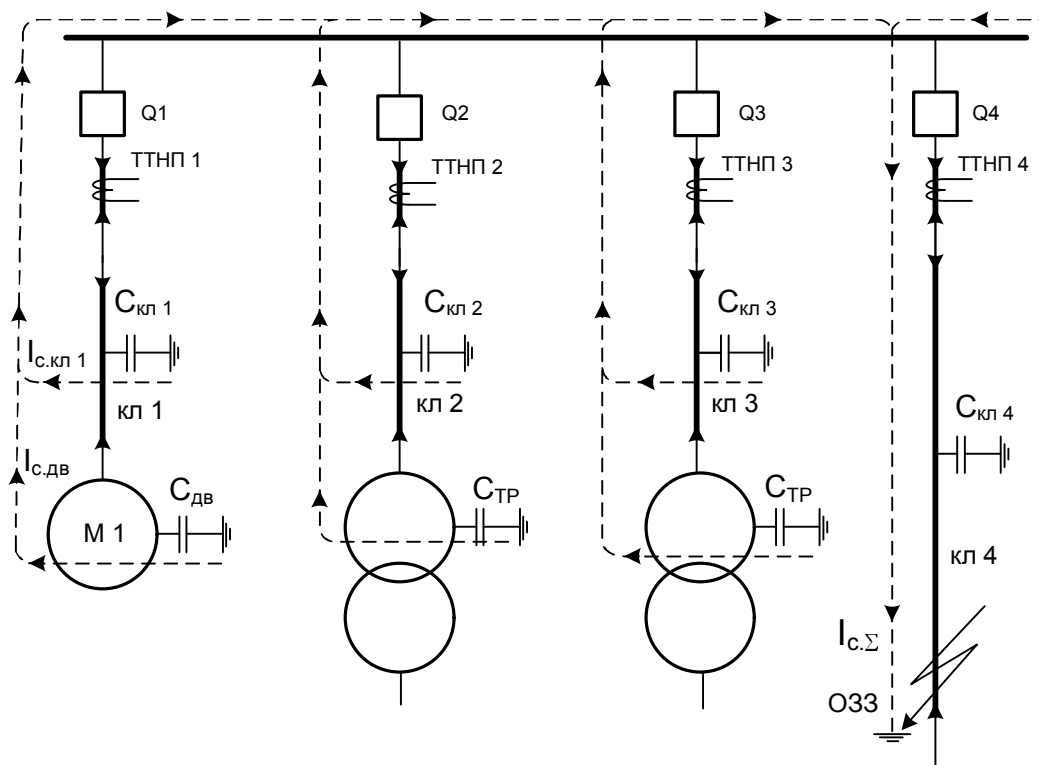


Рисунок 13 – ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью

6.3.2 Пусть в кабельной линии 4 возникло ОЗЗ. После окончания переходного процесса, связанного с перезарядом емкостей сети, весь остаточный (суммарный) емкостной ток двух неповрежденных фаз этой сети будет протекать через точку ОЗЗ.

Через те присоединения, где нет ОЗЗ, будет протекать только емкостной ток защищаемых присоединений в направлении места ОЗЗ.

Применительно к электродвигателю *M1* этот ток равен сумме емкостных токов кабельной линии $I_{с.кп.1}$ и двигателя $I_{с.дв.}$

Защита от ОЗЗ не должна срабатывать при токах меньших или равных емкостному току любого присоединения, т.е. защита от ОЗЗ должна быть отстроена от собственного ёмкостного тока присоединения.

6.3.3 В зависимости от значения тока $I_{с.Σ}$ защита от ОЗЗ может быть выполнена с действием на:

- сигнализацию (при токах срабатывания меньших, чем установленные в ПУЭ);
- отключение поврежденного электродвигателя [1].

6.3.4 Рекомендуется устанавливать нулевое значение времени срабатывания защиты от ОЗЗ.

6.3.5 Для повышения чувствительности защиты от ОЗЗ или отстройки от переходных процессов возможно задание времени срабатывания защиты равным 0,1 с.

При введении задержки на срабатывание ОЗЗ необходимо использовать защиту от двойных замыканий на землю, работающую без выдержки времени (вторая ступень алгоритма ОЗЗ в блоках БМРЗ).

6.3.6 Уставку срабатывания защиты электродвигателя от ОЗЗ по току $3I_{0>}$, А, определяем по формуле:

$$3I_{0>} = \frac{k_{отс}}{k_{возврат}} \cdot k_{бр} \cdot (I_{емк.дв} + I_{емк.кл}), \quad (25)$$

где $k_{отс}$ – коэффициент отстройки защиты от ОЗЗ;

$k_{возврат}$ – коэффициент возврата защиты от ОЗЗ;

$k_{бр}$ – коэффициент броска емкостного тока, обусловленного перезарядом емкостей электрической сети при ОЗЗ;

$I_{емк.дв}$ – емкостной ток¹ защищаемого электродвигателя, А;

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

Значения этих коэффициентов для терминалов БМРЗ – $k_{отс} = 1,2$; $k_{возврат} = 0,95$; $k_{бр} = 2$.

Ранее при расчетах защит от ОЗЗ, выполненных на электромеханических реле, использовали другие значения коэффициентов: $k_{отс} = 1,3$;

$k_{бр}$ – от 3 до 5.

Меньшее значение коэффициента $k_{бр}$ для терминалов БМРЗ показывает, что цифровые фильтры терминала обеспечивают более эффективное ослабление броска апериодической составляющей емкостного тока.

6.3.7 В некоторых сетях собственные емкостные токи отдельных присоединений велики и соизмеримы с суммарным емкостным током сети. Использование ненаправленной токовой защиты от ОЗЗ в таких сетях невозможно и поэтому рекомендуем применять направленную защиту.

В этом случае ток срабатывания направленной токовой защиты от ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью определяют по приведенной выше формуле (25), в которой значение $k_{бр}$ принимают равным единице.

6.3.8 Для расчётов используют ёмкость статорной обмотки электродвигателя, указанную в его паспорте.

Значения электрической ёмкости статорной обмотки некоторых типов электродвигателей приведены в таблице 2 [5].

¹ Например, на рисунке 13 емкостные токи присоединения 1 обозначены как $I_{с.кл.1}$ (кабельная линия) и $I_{с.дв}$ (электродвигатель).

Таблица 2

Электродвигатель		Ёмкость трех фаз статорной обмотки, мкФ, при номинальном напряжении	
Тип	Мощность, кВт	6 кВ	10 кВ
СТД - 5000 - 2	5000	0,085	0,11
СТД - 6300 - 2	6300	0,11	0,11
СТД - 8000 - 2	8000	0,11	0,17
СТД - 10000 - 2	10000	0,15	0,17
СТД - 12500 - 2	12500	0,15	0,22

6.3.9 При отсутствии информации в паспорте двигателя, ёмкостной ток электродвигателя $I_{емк.дв}$, А, можно определить по соотношениям (26) – (28), заимствованным из [7]:

– для АД с номинальным напряжением 6 кВ:

$$I_{емк.дв} \approx 0,017 \cdot S_{ном.дв} . \quad (26)$$

– для АД с номинальным напряжением 10 кВ:

$$I_{емк.дв} \approx 0,03 \cdot S_{ном.дв} . \quad (27)$$

В формулах (26) и (27) $S_{ном.дв}$, МВА – полная мощность АД.

6.3.10 Если паспорте электродвигателя не указана его полная мощность $S_{ном.дв}$, МВА, её можно найти, используя формулу (28):

$$S_{ном.дв} = \frac{P_{ном.дв}}{\cos \varphi \cdot \eta} . \quad (28)$$

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

Остальные обозначения в формуле (28) аналогичны приведенным выше.

6.3.11 Значение ёмкостного тока синхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ можно найти, используя формулы (29) – (31), приведенные в [8].

Ёмкостной ток СД при ОЗЗ $I_{емк.дв}$, А, вычисляют по формуле:

$$I_{емк.дв} = 2\pi \cdot f_{ном} \cdot \sqrt{3} \cdot C_{дв} \cdot U_{ном.дв} . \quad (29)$$

где $C_{дв}$ – электрическая ёмкость двигателя, Ф;

$U_{ном.дв}$ – номинальное напряжение двигателя, В;

$f_{ном}$ – номинальная частота напряжения питающей сети, Гц.

Ёмкость статорных обмоток явнополюсного СД $C_{дв}$, Ф, находят по формуле:

$$C_{\text{дв}} \approx \frac{40^4 \sqrt{S_{\text{ном.дв}}^3} \cdot 10^{-6}}{3 \cdot (U_{\text{ном.дв}} + 3600) \cdot \sqrt[3]{n}} \quad (30)$$

где $S_{\text{ном.дв}}$ – полная мощность электродвигателя, кВА;

$U_{\text{ном.дв}}$ – номинальное междуфазное напряжение двигателя, В;

n – синхронная частота вращения двигателя, об/мин;

Ёмкость обмоток одной фазы неявнополюсных синхронных и асинхронных электродвигателей $C_{\text{дв}}$, Ф, можно найти по формуле:

$$C_{\text{дв}} \approx \frac{0,0187 \cdot S_{\text{ном.дв}} \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{U_{\text{ном.дв}} \cdot (1 + 0,08 \cdot U_{\text{ном.дв}})}} \quad (31)$$

где $S_{\text{ном.дв}}$ – полная мощность электродвигателя, МВА;

$U_{\text{ном.дв}}$ – номинальное междуфазное напряжение двигателя, кВ.

6.3.11 Для нахождения удельного емкостного тока кабельной линии $I_{\text{с.кл}}$ с бумажной изоляцией можно использовать таблицу 3 [7].

Таблица 3

Площадь сечения жил кабеля, мм ²	Удельный ёмкостной ток $I_{\text{с}}$, 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

6.3.12 При отсутствии информации об удельной ёмкости кабеля, ёмкостной ток $I_{\text{емк.кл}}$, А, кабельной линии можно определить по приближенной формуле, приведенной в [7]:

$$I_{\text{емк.кл}} \approx \frac{U_{\text{ном.кл}} \cdot l}{10}, \quad (32)$$

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

l – длина кабельной линии, км.

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

6.3.13 ПУЭ допускает использовать изолированную нейтраль в тех

случаях, когда суммарный емкостной ток I_{Σ} не превышает 30 А (для сети напряжением 6 кВ) или 20 А (для напряжением сети 10 кВ) [1].

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

$$I_{\Sigma}^{(1)} = \sqrt{I_{c,\Sigma}^2 + I_R^2}, \quad (33)$$

где $I_{c,\Sigma}$ – суммарное значение емкостного тока сети;

I_R – активный ток, протекающий через резистор заземления нейтрали.

6.3.14 Для машин небольшой мощности и коротких кабельных линий, с помощью которых подключен электродвигатель, расчетное значение уставки срабатывания защиты может оказаться меньше минимального тока срабатывания терминала. В этом случае уставку срабатывания защиты принимают равной минимальному току срабатывания защиты.

6.3.15 Оценку коэффициента чувствительности защиты при ОЗЗ $k_q^{(1)}$ выполняют по формуле:

$$k_q^{(1)} = \frac{I_{\Sigma}^{(1)}}{3I_0}, \quad (34)$$

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

Коэффициент чувствительности должен быть не меньше 1,5 [1].

6.3.16 Перед вводом уставки $3I_0$ в терминал БМРЗ, следует перевести её во вторичные значения в соответствии с коэффициентом трансформации ТТНП (таблица 4).

Таблица 4

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

6.3.17 Для реализации селективной защиты от ОЗЗ для двухскоростных двигателей рекомендуется применять отдельные ТТНП на каждую частоту вращения.

Информация о некоторых типах ТТНП приведена в таблице 4.

В терминалах БМРЗ-ДВА для этого предусмотрены два входа для токов нулевой последовательности.

Расчеты защиты от ОЗЗ для двухскоростного двигателя выполняют отдельно для каждой частоты вращения.

6.4 Защита от двойных замыканий на землю

6.4.1 При использовании защиты от ОЗЗ, работающей с выдержкой времени для отстройки от переходных процессов, необходимо применять

защиту от двойных замыканий на землю, работающую без выдержки времени. Согласно ПУЭ [1], уставку срабатывания этой защиты по току выбирают от 50 до 200 А.

Ток срабатывания защиты должен быть отстроен от максимального значения тока небаланса, соответствующего пусковому току электродвигателя.

Уставку срабатывания защиты от двойных замыканий на землю по току $3I_0 \gg$, А, определяют по формуле:

$$3I_0 \gg = k_{отс} \cdot k_{нес} \cdot I_{пуск.дв} = k_{отс} \cdot k_{нес} \cdot k_n \cdot I_{ном.дв} \quad (35)$$

где $k_{отс}$ – коэффициент отстройки;

$k_{нес}$ – коэффициент несимметрии¹;

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

k_n – коэффициент пуска;

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

Для сетей с изолированной нейтралью $k_{нес} = 0,015$. Для сетей с резистивным заземлением нейтрали $k_{нес} = 0,025$.

6.5 Направленная токовая защита от ОЗЗ

6.5.1 Направленную токовую защиту от ОЗЗ в сетях с изолированной или резистивно-заземленной нейтралью применяют для:

- обеспечения селективности защиты;
- повышения чувствительности защиты (как дополнительный способ).

Применение направленной защиты в сетях с изолированной нейтралью необходимо только в случаях, когда уставку срабатывания защиты от однофазных замыканий на землю $3I_0 >$ равна или больше суммарного значения тока ОЗЗ сети $I_{ОЗЗ\Sigma}^{(1)}$.

Необходимым условием для применения направленной защиты является обеспечение суммарного тока при ОЗЗ на защищаемом присоединении не менее 40 % от номинального тока трансформатора тока нулевой последовательности, тогда угловая погрешность ТТНП не превысит 36° (рисунок 14).

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

Для повышения чувствительности защиту выполняют с выдержкой времени 0,1 с. При этом время срабатывания токовой защиты от ОЗЗ $t_{с.з} = 0,1$ с выбрано по условию отстройки от длительности переходных процессов.

¹ Коэффициент, показывающий допустимое значение токов нулевой последовательности, обусловленных резистивным заземлением нейтрали при несимметрии напряжения питающей сети и разбросом индуктивных сопротивлений фазных обмоток электродвигателя

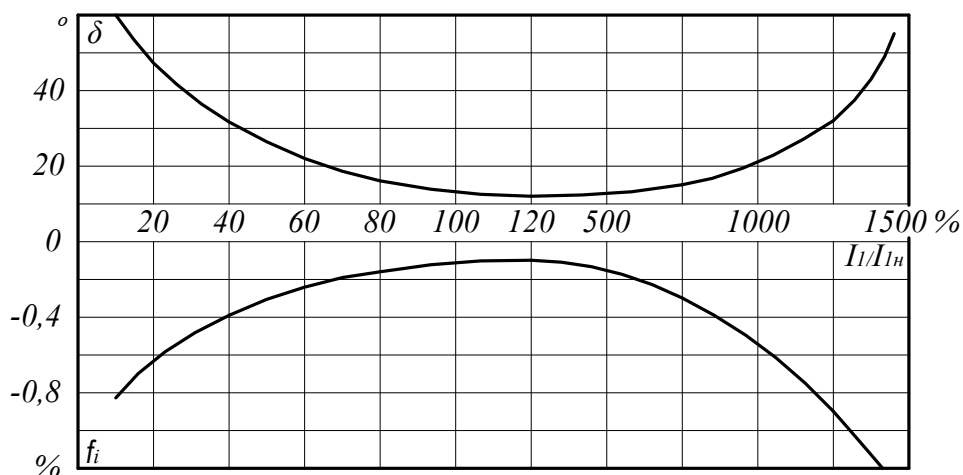


Рисунок 14 - Зависимость токовой f_i и угловой δ погрешности некомпенсированного ТТ в зависимости от кратности первичного тока I_1 к номинальному току I_{1H} (по [9])

Для обеспечения коэффициента чувствительности не менее 1,5, установка срабатывания направленной защиты от ОЗЗ $I_{с.з.}$, А, должна удовлетворять условию:

$$I_{с.з.} < \frac{I_{ОЗЗ\Sigma}^{(1)}}{1,5} \quad (36)$$

Характеристики¹ направленной защиты от ОЗЗ для сетей с изолированной и заземленной нейтралью приведены на рисунке 15.

В блоках БМРЗ предусмотрена возможность изменения угла $\varphi_{мч}$. Для сети с изолированной нейтралью рекомендуется устанавливать угол $\varphi_{мч}$ равным плюс 54° . Это обусловлено тем, что емкостной ток сети на поврежденном присоединении будет отставать от напряжения $3U_0$ на 90° , при этом возможные угловые погрешности ТНП компенсируются смещением характеристики на указанный угол.

Для сети с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор, рекомендуется устанавливать угол $\varphi_{мч}$ равным плюс 135° (см. рисунок 15, б). В этом случае рекомендуется проверить корректность работы реле направления мощности нулевой последовательности на основании расчета угла тока сети при ОЗЗ на поврежденном присоединении.

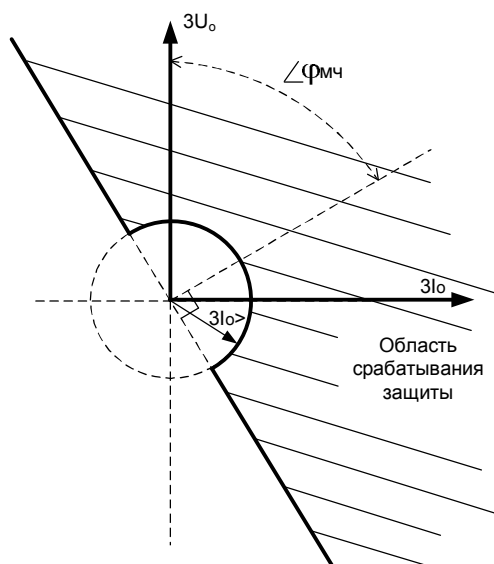
Расчет угла между вектором тока $3I_0$ и вектором напряжения $3U_0$ при ОЗЗ осуществляется на основании суммарного емкостного тока ОЗЗ сети и номинального сопротивления резистора нейтрали по формуле:

¹ В блоках БМРЗ выпущенных ранее 2012 года, характеристика направления мощности нулевой последовательности может отличаться от приведенной. В таком случае, следует руководствоваться характеристикой, приведенной в руководстве по эксплуатации на конкретный блок.

$$\varphi_{I_0 U_0} = 90^\circ + \arcsin\left(\frac{I_{акт}}{\sqrt{I_{емк}^2 + I_{акт}^2}}\right), \quad (37)$$

где $I_{акт}$, $I_{емк}$ – активная и ёмкостная составляющие тока ОЗЗ, А.

а)



б)

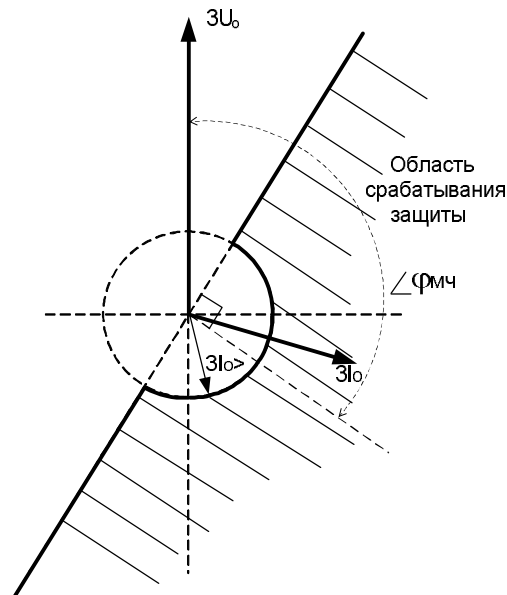


Рисунок 15 – Характеристики направленной защиты от ОЗЗ для сети с изолированной (а) и заземленной через высокоомный резистор (б) нейтралью

6.6 Неселективная защита от замыканий на землю и алгоритм «селектор направления ОЗЗ»

6.6.1 В тех случаях, когда невозможно обеспечить селективное действие защиты от ОЗЗ, применяют алгоритм неселективной защиты от ОЗЗ, срабатывающий при превышении напряжением $3U_0$ уставки $3U_0 >$.

Как правило, уставка $3U_0 >$ выбирается из диапазона от 10 до 20В (во вторичных значениях). **Алгоритм неселективной защиты от ОЗЗ всегда выполняют с действием на сигнализацию.**

6.6.2 При действии неселективной защиты на сигнал, обслуживающий персонал должен определить присоединение с ОЗЗ.

Чаще всего это выполняется последовательным отключением/включением присоединений с контролем напряжения нулевой последовательности. Для минимизации числа отключений/включений, выполняемых персоналом при поиске присоединения, в котором произошло ОЗЗ, в терминалах БМРЗ-УЗД и БМРЗ-ДВА реализован алгоритм «селектор направления ОЗЗ», также действующий на сигнализацию.

Работа алгоритма СНОЗЗ основана на контроле составляющих переходного процесса ОЗЗ в первый момент возникновения замыкания на землю. Пуск алгоритма происходит при скачкообразном увеличении напряже-

ния $3U_0$ сверх заданной уставки.

Одновременно алгоритм СНОЗЗ контролирует изменение направления полной мощности нулевой последовательности P_0 . При направлении P_0 в сторону защищаемого объекта, срабатывания алгоритма СНОЗЗ не происходит, а при направлении в сторону шин алгоритм СНОЗЗ фиксирует наличие однофазного замыкания на защищаемом присоединении и включает соответствующий светодиод на лицевой панели БМРЗ.

Наличие такой информации позволяет персоналу минимизировать количество отключений потребителей.

6.6.3 Для правильной работы алгоритма СНОЗЗ необходимо задать уставки:

- по напряжению нулевой последовательности $3U_0 >$ (используется уставка неселективной защиты от ОЗЗ);
- по аварийной составляющей напряжения нулевой последовательности $3U_0 >$ а.с. (рекомендуемое значение $3U_0 >$ а. с. - 10 В);
- по углу $\Phi_{мч}$ для реле направления мощности нулевой последовательности (выбирают в соответствии с рекомендациями раздела 6.5).

6.6.4 Для правильного определения терминалами БМРЗ-УЗД и БМРЗ-ДВА направления однофазного замыкания необходимо обеспечить правильное подключение трансформатора тока нулевой последовательности и трансформатора напряжения.

6.7 Примеры расчета защит от ОЗЗ

6.7.1 Токовая защита от замыканий на землю.

6.7.1.1 Требуется определить параметры защиты от замыканий на землю АД серии А4, работающего в сети с изолированной нейтралью.

Электродвигатель подключен кабелем с бумажной изоляцией и медными жилами сечением 185 мм^2 . Длина кабеля - 40 метров.

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

В схеме защиты применен ТТНП типа ТЗР

Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{\text{ном.дв}}$	630 кВт
коэффициент мощности, $\cos \varphi$	0,88
напряжение, $U_{\text{ном.дв}}$	6 кВ
кпд, η	0,952
кратность пускового тока, $k_{\text{пуск}}$	5,5
значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД, $I_{\text{ш}}^{(3)}$	5,5 кА

6.7.1.2 Полную мощность двигателя $S_{\text{ном.дв}}$ находим по формуле (28):

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

6.7.1.3 Ёмкостной ток двигателя $I_{\text{емк.дв}}$ вычисляем по формуле (26):

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

6.7.1.4 Используем для определения емкостного тока двигателя второй способ.

Электрическую ёмкость одной фазы электродвигателя $C_{\text{дв}}$ найдем по формуле (30):

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

Значение емкостного тока двигателя $I_{\text{емк.дв}}$ при известной ёмкости $C_{\text{дв}}$ вычисляем по формуле (29):

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

Результаты расчетов первым и вторым способом одинаковы.

6.7.1.5 Ёмкостной ток кабельной линии $I_{\text{емк.кл}}$ находим, используя данные, приведенные в таблице 3:

$$I_{\text{емк.кл}} \approx 1,25 \cdot \frac{40}{1000} = 0,05 \text{ А.} \quad (38)$$

6.7.1.6 Уставку срабатывания защиты от ОЗЗ по току $3I_0 >$ в первичных значениях найдем по формуле (25):

$$3I_0 > = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{возврат}}} \cdot k_{\text{бр}} \cdot (I_{\text{емк.дв}} + I_{\text{емк.кл}}) = \frac{1,2}{0,95} \cdot 2 \cdot (0,0128 + 0,05) \approx 0,159 \text{ А.}$$

6.7.1.7 Коэффициент чувствительности защиты от ОЗЗ $k_q^{(1)}$ вычисляем по формуле (34):

$$k_q^{(1)} = \frac{I_{\text{ОЗЗ}}^{(1)}}{3I_0 >} = \frac{1,4}{0,159} = 8,8$$

Защита соответствует требованиям, установленным в ПУЭ, так как расчетное значение коэффициента чувствительности превышает 1,5.

6.7.1.8 Ток срабатывания защиты $3I_{0\text{втор}}$ во вторичных значениях найдем учитывая коэффициент трансформации ТТП типа ТЗР, используя соотношение:

$$3I_{0\text{втор}} \geq \frac{3I_0}{k_{\text{мп}}} = \frac{0,159}{18} = 0,0088 \text{ А} \approx 0,01 \text{ А.} \quad (39)$$

6.7.1.9 Для повышения стабильности срабатывания защиты принимаем выдержку времени равной 0,1 с.

6.7.1.10 Номинальный ток электродвигателя находим по формуле (1):

$$I_{\text{ном.дв}} = \frac{P_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.дв}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,952 \cdot 0,88} \approx 72 \text{ А.}$$

6.7.1.11 Уставку срабатывания защиты от двойных замыканий на землю вычисляем по формуле (35):

$$3I_0 \gg = k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{нес}} \cdot I_{\text{пуск.дв}} = k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{нес}} \cdot k_n \cdot I_{\text{ном.дв}} = 1,05 \cdot 0,015 \cdot 5,5 \cdot 72 \approx 6,24 \text{ А.}$$

По требованиям ПУЭ уставка данной защиты должна быть выбрана из диапазона от 50 до 200А, поэтому принимаем уставку срабатывания:

$$3I_0 \gg = 100 \text{ А.}$$

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

6.7.2 Направленная токовая защита от замыканий на землю

6.7.2.1 Необходимо рассчитать защиту от замыканий на землю синхронного электродвигателя типа СТД-6300-2, работающего в сети с изолированной нейтралью.

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

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

Для отстройки от переходных режимов необходимо применить ОЗЗ с выдержкой времени.

Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{\text{ном.дв}}$ 6300 кВт
 коэффициент мощности, $\cos \varphi$ (см. ГОСТ Р 52776-2007) 0,9
 напряжение, $U_{\text{ном.дв}}$ 10 кВ
 КПД, η 0,975
 кратность пускового тока, $k_{\text{пуск}}$ 6,28

6.7.2.2 Ёмкость статорной обмотки этого двигателя выбираем из таблицы 2 и выполняем расчет значения емкостного тока электродвигателя $I_{\text{емк.дв}}$, по формуле (27):

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

6.7.2.3 По формуле (32) найдем емкостной ток $I_{\text{емк.кл}}$ трех кабельных линий длиной 100 м каждая:

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

6.7.2.4 Ток срабатывания защиты от ОЗЗ двигателя СТД-6300-2 в первичных значениях выбираем по формуле (25):

$$3I_0 > = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{возврат}}} \cdot k_{\text{бр}} \cdot (I_{\text{емк.дв}} + I_{\text{емк.кл}}) = \frac{1,2}{0,95} \cdot 2 \cdot (0,004 + 0,3) = 0,768 \text{ А.}$$

Ток срабатывания защиты от ОЗЗ $3I_0 >$ оказался больше суммарного емкостного тока сети $I_{\text{озз}\Sigma}^{(1)}$, поэтому необходимо применить направленную защиту от замыканий на землю.

6.7.2.5 Уставку срабатывания по току направленной защиты от ОЗЗ выбираем по соотношению (36):

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

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

6.7.2.6 Коэффициент чувствительности защиты вычисляем по (34):

$$k_q^{(1)} = \frac{I_{\text{озз}\Sigma}^{(1)}}{3I_0 >} = \frac{0,5}{0,3} = 1,67$$

Защита удовлетворяет требованиям ПУЭ, так как $k_q^{(1)} > 1,5$.

6.7.2.7 Поскольку двигатель работает в сети с изолированной нейтралью, характеристику работы направленной защиты от ОЗЗ выбираем в соответствии с рисунком 16.

6.7.2.8 Ток срабатывания защиты во вторичных значениях найдем по формуле (39), учитывающий коэффициент трансформации ТТНП нулевой последовательности типа ТЗР:

$$3I_{0 \text{ втор}} \geq \frac{3I_0}{k_{\text{тр}}} = \frac{0,3}{18} = 0,0167 \approx 0,01 \text{ А.}$$

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

6.7.2.10 Номинальный ток электродвигателя $I_{\text{ном.дв}}$ находим по (1):

$$I_{ном.дв} = \frac{P_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.дв} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,975 \cdot 0,9} \approx 415 \text{ А.}$$

6.7.2.11 Уставку срабатывания защиты от двойных замыканий на землю $3I_0 \gg$ находим по формуле (35):

$$3I_0 \gg = k_{отс} \cdot k_{нес} \cdot I_{пуск.дв} = k_{отс} \cdot k_{нес} \cdot k_n \cdot I_{ном.дв} = 1,05 \cdot 0,025 \cdot 7 \cdot 415 \approx 76 \text{ А.}$$

По требованиям ПУЭ уставка данной защиты должна быть выбрана из диапазона от 50 до 200 А, поэтому выбираем:

$$3I_0 \gg = 100 \text{ А.}$$

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

7 Защиты минимального напряжения

7.1 Требования ПУЭ к ЗМН

7.1.1 Для облегчения условий восстановления напряжения после отключения КЗ и обеспечения процесса самозапуска электродвигателей ответственных механизмов следует предусматривать отключение защит минимального напряжения электродвигателей неответственных механизмов.

Суммарная мощность отключаемых электродвигателей определяется возможностями источника питания и сети по обеспечению самозапуска.

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

7.1.2 Допускается использовать ЗМН для отключения неответственных синхронных электродвигателей, а также для предупреждения несинхронного включения отключенных двигателей, токи самозапуска которых превышают допустимые значения.

7.1.3 В тех случаях, когда в электроустановках промышленных предприятий 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 безопасности), следует применять отключение части таких ответственных механизмов. Автоматический повторный пуск таких механизмов выполняют после окончания процесса самозапуска первой группы электродвигателей.

Включение последующих групп может быть осуществлено по току, напряжению или времени.

7.1.4 В тех случаях, когда самозапуск механизмов после их останова

недопустим (по условиям технологического процесса или по условиям безопасности) и, кроме того, когда не может быть обеспечен самозапуск всех электродвигателей ответственных механизмов (см. 7.1.1), на электродвигателях ответственных механизмов следует устанавливать ЗМН с выдержкой времени не более 10 с и уставкой по напряжению не превышающей 50 % номинального напряжения (кроме случаев, приведенных в 7.1.1),

ЗМН следует использовать также для обеспечения пуска АВР электродвигателей взаиморезервируемых механизмов.

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

7.2 ЗМН в терминалах БМРЗ

7.2.1 Алгоритм ЗМН в терминалах БМРЗ выполняют двухступенчатым и применяют только для защиты АД.

Первая ступень защиты предназначена для отключения неответственных электродвигателей, не участвующих в самозапуске, что облегчает процесс самозапуска.

Уставку срабатывания по напряжению первой ступени $U <<$, выбирают из диапазона от $0,6 \cdot U_{\text{ном.дв}}$ до $0,7 \cdot U_{\text{ном.дв}}$.

Время срабатывания этой ступени $T_{\text{ЗМН}} <<$ выбирают из диапазона от 0,5 до 0,9 с.

7.2.2 Вторая ступень ЗМН предназначена для отключения всех электродвигателей при длительном исчезновении напряжения по условиям технологического процесса и техники безопасности.

Уставку срабатывания по напряжению $U <$, выбирают (по условию возврата при самозапуске электродвигателей) из диапазона от $0,4 \cdot U_{\text{ном.дв}}$ до $0,5 \cdot U_{\text{ном.дв}}$.

Время срабатывания второй ступени $T_{\text{ЗМН}} <<$ выбирают из диапазона от 3 до 9 с.

Значение времени срабатывания защиты выбирают в зависимости от скорости затормаживания основных АД.

Если присоединенные массы на валу АД большие, а электродвигатели затормаживаются медленно, время срабатывания защиты $T_{\text{ЗМН}} <<$ выбирают от 6 до 9 с. Если электродвигатели затормаживаются быстро, то время действия защиты выбирают менее 6 с.

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.

Список электродвигателей, участвующих в процессе самозапуска, всегда утверждает главный инженер предприятия.

8 Защита от потери питания

8.1 Назначение ЗПП

8.1.1 Защиту от потери питания применяют при наличии СД на секции для выявления режимов:

- потери питания СД;
- подпитки со стороны СД во внешнюю сеть.

ЗПП действует на отключение СД.

8.2 Требования ПУЭ к ЗПП

8.2.1 При наличии СД на секции, для ускорения действия АВР и АПВ (в тех случаях, когда напряжение на отключенной секции затухает медленно) может быть применено гашение поля СД ответственных механизмов с помощью:

- защиты минимальной частоты;
- других защит, обеспечивающих быстрейшую фиксацию потери питания.

Эти же защиты могут быть использованы для:

- отключения неответственных СД;
- предупреждения несинхронного включения отключенных СД, если токи их включения превышают допустимые значения.

8.3 Характеристика алгоритмов ЗПП

8.3.1 Известные алгоритмы ЗПП контролируют:

- снижение напряжения;
- снижение частоты;
- скорость снижения частоты;
- направление активной мощности;
- снижение частоты и направление мощности.

8.3.2 ЗПП, контролирующую снижение напряжения, применяют как вспомогательную. Вызвано это тем, что при потере питания на шинах длительное время существует напряжение, генерируемое СД.

8.3.3 ЗПП, контролирующую только снижение частоты, не применяют из-за того, что снижение частоты при потере питания невозможно отличить от снижения частоты при дефиците мощности в энергосистеме при системных авариях.

При использовании ЗПП с контролем снижения частоты отключение СД не только будет излишним, но и может усугубить дефицит реактивной мощности в энергосистеме.

8.3.4 ЗПП, контролирующие снижение частоты на разных секциях подстанции с СД возможно реализовать только при питании секций подстанции от разных вводов. Обычно такую ЗПП используют только для частотного пуска устройства АВР секционного выключателя.

8.3.5 ЗПП, реагирующую на скорость снижения частоты, применяют в тех случаях когда скорость снижения частоты при выбеге двигателя в 3-4 раза превышает скорость снижения частоты при аварийном дефиците мощности в энергосистеме.

При этом следует учитывать, что скорость снижения частоты при вы-

беге синхронных двигателей зависит от их нагрузки.

8.3.6 ЗПП, контролирующие направление активной мощности, не могут быть отстроены от качаний, поэтому возможно их ложное срабатывание.

Кроме этого, такие ЗПП имеют большую выдержку времени из-за необходимости её согласования с защитой от замыканий на землю смежных линий электропередачи, отходящих от шин, питающих подстанцию.

8.3.7 ЗПП, реагирующая на снижение частоты и изменение направления активной мощности, избавлена от недостатков предыдущих защит и является наиболее универсальной, поэтому именно такой алгоритм ЗПП применён в блоках БМРЗ.

Уставку срабатывания реле минимальной частоты $f_{с.з.}$ выбирают меньше уставки срабатывания первой ступени АЧР-1 [10] из диапазона от 48,3 до 48,4 Гц.

Блокирование по направлению мощности позволяет выполнить эту защиту быстродействующей.

Время срабатывания защиты $t_{с.з.}$ составляет от 0,3 с до 0,4 с (в соответствии с рекомендациями, приведенными в [10] и на основе опыта эксплуатации синхронных двигателей ОАО «Газпром»).

8.4 ЗПП в терминалах БМРЗ

8.4.1 Характеристика цифровых реле активной мощности, применяемых в терминалах БМРЗ, показана на рисунке 16.

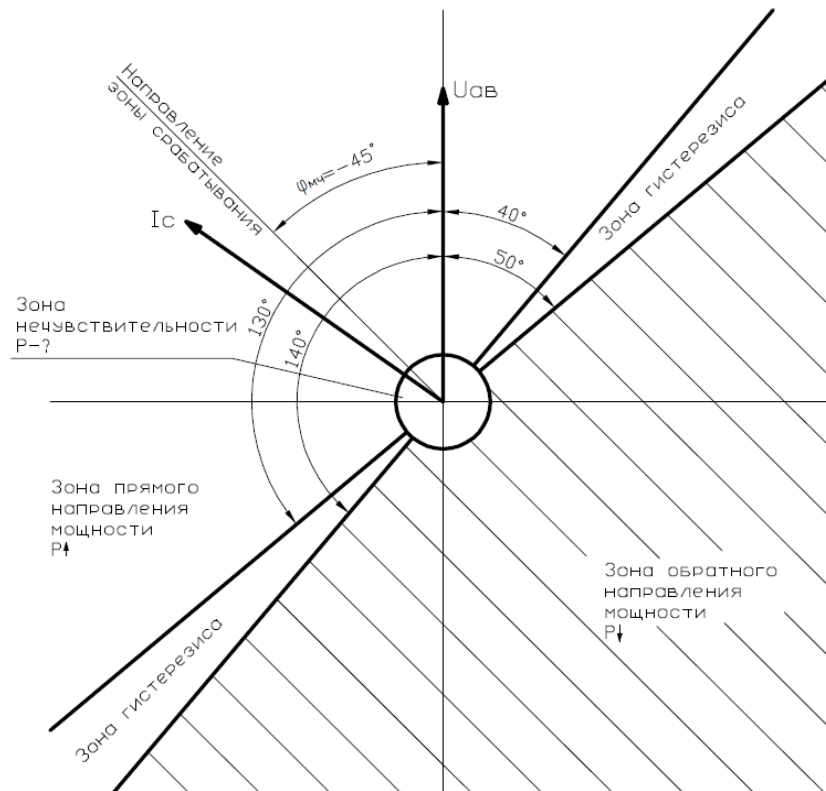


Рисунок 16 - Характеристика реле направления мощности

По состояниям цифровых реле направления мощности в терминале БМРЗ для каждой из пар входных сигналов I_A , U_{BC} и I_C , U_{AB} формируется один из двух сигналов:

- направление активной мощности P в присоединении;
- неправильная фазировка входных сигналов.

Так как цифровое реле направления мощности включено по 90-градусной схеме, значение уставки φ_{MC} выбирают из диапазона от минус 30° до минус 60° ¹ [11].

9 Защита электродвигателя от неполнофазных режимов

9.1 Требования ПУЭ к защите от неполнофазных режимов

9.1.1 Как известно, неполнофазные режимы работы трехфазных электродвигателей приводит к недопустимому разогреву зубцов ротора, пазовых клиньев и бандажных колец.

Согласно требованиям ПУЭ [1] для электродвигателей, которые защищены от токов КЗ предохранителями, не имеющими вспомогательных контактов для сигнализации об их перегорании, должна быть предусмотрена защита от перегрузки в двух фазах.

Защиту от неполнофазного режима рекомендуется применять для всех двигателей в связи с возможностью обрыва фазы на линии внешнего электроснабжения.

9.2 Защита от неполнофазных режимов в терминалах БМРЗ

9.2.1 При работе электродвигателя в неполнофазном режиме значения токов прямой и обратной последовательности равны, а ток в каждой из двух рабочих фаз в этом режиме составляет от 1,6 до 2,5 $I_{ном.дв}$.

Защита от неполнофазных режимов срабатывает при выполнении двух условий:

- токи в двух фазах питания двигателя превышают 1,6 $I_{ном.дв}$;
- значение тока обратной последовательности превышает 30% от тока прямой последовательности.

Время срабатывания защиты на отключение электродвигателя выбирают из диапазона от 0,5 с до 1 с и отстраивают от времени ликвидации неполнофазного режима системами защиты и автоматики внешнего электроснабжения.

В терминалах БМРЗ-ДА и БМРЗ-ДД значение тока I_2 определяется по значениям фазных токов. Для использования защиты от неполнофазных режимов, предусмотренных в этих терминалах, необходимо наличие ТТ в каждой фазе питания двигателя.

В терминалах БМРЗ-УЗД и БМРЗ-ДВА предусмотрена возможность вычисления тока I_2 по токам двух фаз и току $3I_0$. Таким образом, защиту от неполнофазного режима в этих терминалах можно реализовать при нали-

¹ В блоках БМРЗ выпущенных ранее 2012 года, характеристика направления фазной мощности может отличаться от приведенной. В таком случае, следует руководствоваться характеристикой, приведенной в руководстве по эксплуатации на конкретный блок.

чий ТТ в двух фазах питания двигателя.

Если значение тока I_2 превышает 30% от тока прямой последовательности, а значения фазных токов электродвигателя не превышают $1,6 I_{ном.дв}$, то это свидетельствует о наличии нарушений во вторичных токовых цепях ТТ.

10 Защита электродвигателей от перегрузок

10.1 Требования ПУЭ к защите от перегрузок

10.1.1 Данный вид защиты должен быть предусмотрен для электродвигателей:

- 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.

10.1.2 Защиту от перегрузки следует предусматривать в одной фазе с зависимой или независимой от тока выдержкой времени.

Выдержка времени должна быть отстроена от длительности пуска электродвигателя в нормальных условиях и при самозапуске, после действия АВР и АПВ.

Выдержка времени защиты от перегрузки СД, во избежание излишних срабатываний при длительной форсировке возбуждения, должна быть по возможности близкой к наибольшей допустимой по тепловой характеристике электродвигателя.

10.1.3 На электродвигателях, подверженных перегрузке по технологическим причинам, защиту, как правило, следует выполнять с действием на сигнал и автоматическую разгрузку механизма.

Действие защиты на отключение электродвигателя допускается для:

- механизмов, у которых отсутствует возможность своевременной разгрузки без останова, или работающих без постоянного дежурства персонала;
- механизмов с тяжелыми условиями пуска или самозапуска.

10.1.4 Для электродвигателей, которые защищены от токов КЗ предохранителями, не имеющими вспомогательных контактов для сигнализации об их перегорании, должна быть предусмотрена 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.

10.2 Защиты двигателей от перегрузок в терминалах БМРЗ

10.2.1 В терминалах БМРЗ предусмотрены следующие алгоритмы защиты от перегрузок:

- защита от симметричных перегрузок;
- тепловая защита.

Достоинством защиты от симметричных перегрузок, выполняемой по максимальному фазному току, является простота расчета уставок. К недос-

таткам данной защиты следует отнести отсутствие контроля температуры окружающей среды и повышения температуры статорной обмотки электродвигателя от ранее полученного теплового импульса.

Достоинством алгоритма, основанного на тепловой модели электродвигателя, является возможность учёта предыдущего нагрева и охлаждения двигателя, а также температуры окружающей среды (охладителя). Расчет уставок для алгоритма защиты, использующего тепловую модель, может потребовать дополнительной информации, получить которую можно только у производителя двигателей. К недостаткам алгоритма, использующего тепловую модель электродвигателя, можно также отнести невозможность точного учёта погрешности измерения, отсутствие обобщенного опыта применения такой защиты, а также то, что применяемые тепловые модели не учитывают отдельные индивидуальные особенности деталей электрических машин.

При наличии в термине входе для датчика измерения температуры окружающей среды, рекомендуется использование такого датчика, поскольку это позволит более полно использовать перегрузочные способности двигателя.

10.2.2 Защиту от симметричных перегрузок рекомендуется использовать с действием на отключение, а защиту, использующую тепловую модель - с действием на сигнализацию.

10.2.3 Решение о действии тепловой защиты на отключение должно приниматься совместно с технологическим персоналом и утверждаться главным инженером.

При подготовке решения должна быть учтена возможность возникновения опасности для жизни и здоровья людей, а также размеры возможного материального ущерба, в случае:

- повреждения электродвигателя вследствие его неотключения;
- неправильного отключения электродвигателя.

10.3 Расчет уставок защиты от симметричных перегрузок

10.3.1 Защиту электродвигателя от симметричных перегрузок выполняют трехступенчатой. Каждая ступень защиты может быть введена и выведена независимо от других.

Основной является вторая ступень, защищающая от любых перегрузок (рисунок 17). Она должна соответствовать перегрузочной характеристике двигателя (см. 10.3.3), имеет инверсный характер и действует на отключение электродвигателя.

Первая ступень имеет независимую от тока характеристику и предназначена для быстрого отключения двигателя в случае блокировки ротора (см. 10.3.2), а также выполняет функцию ближнего резервирования при отказе максимальной токовой отсечки.

Третью ступень защиты выполняют с независимой характеристикой. Эта ступень действует на сигнализацию при малой кратности перегрузки (см. 10.3.5) и предназначена для применения на объектах с дежурным персоналом.

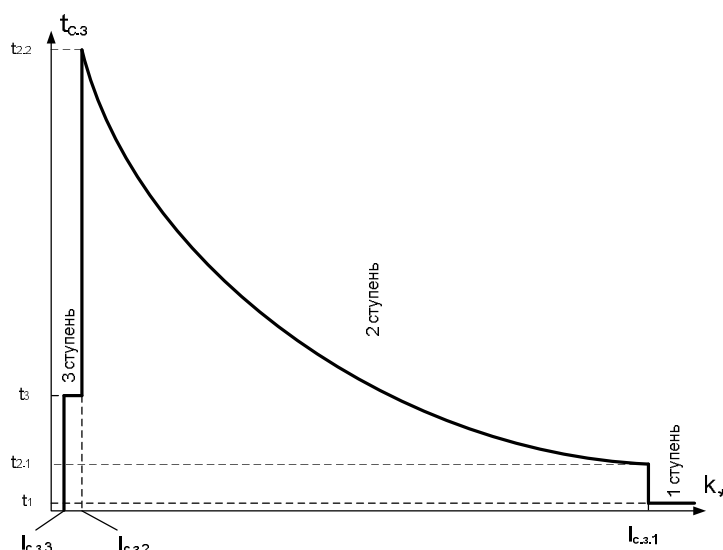


Рисунок 17 - Характеристика защиты от симметричных перегрузок электродвигателя

10.3.2 Ток срабатывания первой ступени защиты должен быть отстроен от пускового тока электродвигателя. Его значение $I_{с.з.1}$, А, находят по формуле:

$$I_{с.з.1} = \frac{1,2 \cdot k_{\text{пуск}}}{k_{\epsilon}} \cdot I_{\text{ном.дв}} \quad (45)$$

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

$k_{\epsilon} = 0,95$ - коэффициент возврата (уточняется в руководстве по эксплуатации на конкретное изделие);

$I_{\text{ном.дв}}$ - номинальный ток двигателя, А.

Время срабатывания первой ступени защиты $t_{с.з.1}$ принимают равным 0,1 с, что позволяет отстроить уставку срабатывания первой ступени от броска пускового тока электродвигателя.

10.3.3 Время срабатывания второй ступени защиты $t_{с.з.2}$, с, рассчитывает процессор БМРЗ по формуле:

$$t_{с.з.2} = \frac{A}{k_*^2 - 1} \quad (46)$$

где A - значение тепловой постоянной времени охлаждения статора для защищаемого электродвигателя. В зависимости от типа защищаемого двигателя значение A может находиться в диапазоне от 60 до 300 с¹;

k_* - кратность тока статорной обмотки двигателя.

¹ Программой терминалов БМРЗ-УЗД и БМРЗ-ДВА предусмотрен расчет значения A исходя из допустимого времени работы при заданной кратности тока в соответствии в 10.3.4.

Ток срабатывания второй ступени $I_{с.з.2}$ находят по формуле:

$$I_{с.з.2} = \frac{1,08}{k_6} \cdot I_{ном.дв} \text{ А,} \quad (47)$$

где $k_6 = 0,95$ - коэффициент возврата (указан в руководстве по эксплуатации на конкретное изделие).

Остальные обозначения соответствуют приведенным выше.

10.3.4 При отсутствии информации о значении тепловой постоянной времени охлаждения статора, в дальнейших расчетах можно использовать минимально допустимую постоянную времени охлаждения статора.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства изготавливают в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52776-2007 (введен с 01.01.2008), согласно которым трехфазные двигатели переменного тока мощностью не менее 0,55 кВт с косвенным охлаждением обмоток статора должны выдерживать в течение двух минут ток, равный 1,5 номинального тока.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства, изготовленные ранее 01.07.2010, как правило, соответствуют ГОСТ 183-74, в котором также содержится приведенное выше требование.

Исходя из этого требования, можно рассчитать минимально допустимую постоянную времени охлаждения статора A , по формуле, приведенной в [5]:

$$A = t_{дон} \cdot (k_*^2 - 1) = 120 \cdot (1,5^2 - 1) = 150 \text{ с,} \quad (48)$$

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

$t_{дон}$ - допустимое время работы при кратности тока k_* , с.

10.3.5 Ток срабатывания третьей ступени $I_{с.з.3}$, А, определяют по формуле:

$$I_{с.з.3} = \frac{k_{омс}}{k_6} \cdot I_{ном.дв} \text{ ,} \quad (49)$$

где $k_{омс} = 1,05$ - коэффициент отстройки защиты от симметричных перегрузок;

$k_6 = 0,95$ - коэффициент возврата (указан в руководстве по эксплуатации на конкретное изделие).

Если двигатель не подвержен технологическим перегрузкам, то время срабатывания 3-ей ступени защиты выбирают от 10 до 20 с (больше, чем время пуска электродвигателя). Для двигателя, подверженного перегрузкам, время выбирают большим, чем допустимое время технологической перегрузки, как правило, от 10 до 1800 с (должно быть также отстроено от времени пуска электродвигателя).

10.4 Выбор уставок защиты от затынутого пуска

10.4.1 Защита от затынутого пуска и блокировки ротора представляет собой вспомогательный элемент тепловой защиты и осуществляет резервирование защиты от симметричных перегрузок.

Уставка по времени защиты от затынутого пуска t_{Π} должна быть отстроена от максимального времени пуска (самозапуска) электродвигателя с учетом увеличения времени пуска на 10 % из-за возможного снижения напряжения (см. ГОСТ Р 52776-2007).

Уставку по току защиты от затынутого пуска и блокировки ротора выбирают меньше пускового тока электродвигателя, но больше максимально допустимого тока перегрузки двигателя.

Например, для двигателя с кратностью пускового тока $7 \cdot I_{ном.дв}$ и максимальным током перегрузки $1,5 \cdot I_{ном.дв}$, значение уставки может быть выбрано равным $5 \cdot I_{ном.дв}$.

10.5 Расчет уставок тепловой защиты электродвигателей

10.5.1 Тепловая защита электродвигателя предназначена для предотвращения повреждения изоляции электродвигателя вследствие теплового действия токов, обусловленных симметричными и несимметричными перегрузками (блокировкой ротора, затынувшимся пуском и самозапусками, обрывами 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.

10.5.2 Часто в высоковольтных электродвигателях устанавливаются датчики температуры в обмотки и активное железо статора, что позволяет осуществить тепловую защиту электродвигателя путем непосредственного измерения температуры. Следует отметить, что такая мера защиты, эффективная для низковольтных электродвигателей, часто оказывается менее эффективной для высоковольтных двигателей, из-за большой толщины изоляции и массы железа а, следовательно, и гораздо больших постоянных времени нагрева и охлаждения.

Поэтому для защиты двигателя от перегрева следует рекомендовать использование тепловой защиты на базе тепловой модели двигателя.

10.5.3 Нагрев электродвигателя ограничивается прежде всего температурой, которую может выдержать его изоляция.

При колебаниях температуры окружающей среды электродвигатель может допускать большую или меньшую перегрузку. Отметим, что стандарт ГОСТ Р 52776-2007 разрешает увеличение предельно допустимого значения перегрева не более чем на 40 °С (при температуре окружающей среды 0 °С; значение зависит от класса изоляции, см. ГОСТ Р 52776-2007, ГОСТ 8865-93).

Для более полного использования перегрузочных способностей двигателя рекомендуется, при наличии в термине возможности подключения датчика температуры окружающей среды, использование такого датчика.

10.5.4 Рассмотрим работу тепловой модели двигателя. Относитель-

ный перегрев статорных обмоток электродвигателя $E_{нагр, \%}$ (за 100 % принята относительная величина перегрева при длительной работе с номинальной нагрузкой. При 0 % - обмотки имеют температуру окружающей среды) за временной интервал работы (нагрева) электродвигателя $t_{нагр}$ определяет микропроцессорная система терминала по формуле:

$$E_{нагр, \%} = 100 \cdot \left(\frac{I_{экв}}{I_{ТМ}} \right)^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{нагр}}{T_{e1}}} \right) + E_{0, \%} e^{-\frac{t_{нагр}}{T_{e1}}} \quad (49)$$

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

$I_{ТМ}$ – расчетный¹ ток тепловой модели электродвигателя, А;

$t_{нагр}$ – время нагрева, мин;

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

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

10.5.5 В выражение (49) микропроцессорная система терминала подставляет рассчитанное значение эквивалентного тока $I_{экв}$ и время работы электродвигателя $t_{нагр}$ в минутах.

Таким образом, определяется текущее относительное значение температуры статорной обмотки электродвигателя, и, если расчётное относительное значение температуры превышает значение параметра срабатывания защиты, защита от тепловой перегрузки срабатывает.

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

$$I_{экв} = \sqrt{I_{фазн. макс.}^2 + K_2 \cdot I_2^2}, \quad (50)$$

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

K_2 – коэффициент учета тока обратной последовательности, учитывающий повышенное тепловое воздействие тока обратной последовательности по сравнению с током прямой последовательности;

I_2 – значение тока обратной последовательности, А.

10.5.6 Для использования алгоритма ТМ, предусмотренного в терминалах БМРЗ-ДА и БМРЗ-ДД необходимо наличие трансформаторов тока в каждой фазе питания двигателя.

В терминалах БМРЗ-УЗД и БМРЗ-ДВА предусмотрена возможность вычисления тока I_2 по значению токов двух фаз и тока $3I_0$, таким образом, в этих терминалах можно использовать алгоритм ТМ при наличии трансформаторов тока в двух фазах питания двигателя.

Коэффициент K_2 , задаваемый в терминалах БМРЗ-УЗД и БМРЗ-ДВА, рекомендуется принимать равным 4 для электродвигателей отечественного производства, и 6 – для двигателей для зарубежного производства.

10.5.7 Текущий перегрев при охлаждении остановленного электродвигателя $E_{охл, \%}$, %, может быть определен по формуле:

¹ В руководствах по эксплуатации блоков БМРЗ этот ток назван **штатным**

$$E_{охл, \%} = E_{0, \%} e^{-\frac{t_{охл}}{T_{e2}}}, \quad (51)$$

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

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

$t_{охл}$ – 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).

10.5.8 Характеристика работы защиты представлена на рисунке 18.

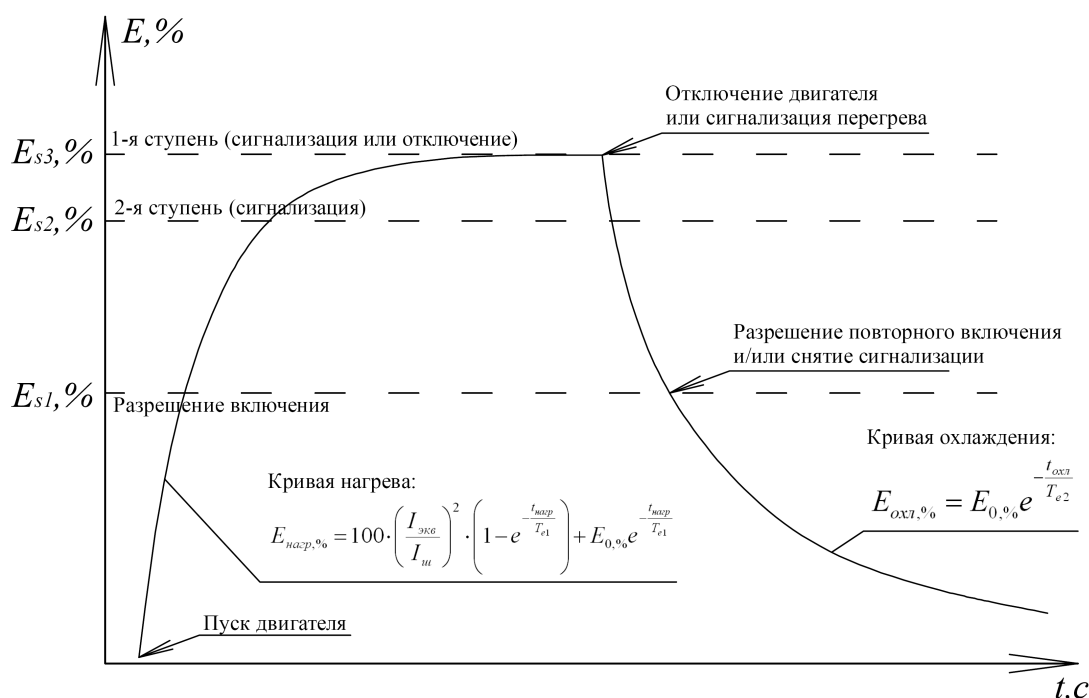


Рисунок 18 - Характеристика тепловой модели электродвигателя

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

10.5.10 Для настройки защиты используются следующие характеристики электродвигателя:

$I_{ТМ}$ – расчетный ток тепловой модели (выбирается равным номинальному току двигателя);

T_{e1} – постоянная времени нагрева электродвигателя¹, мин;

T_{e2} – постоянная времени охлаждения электродвигателя¹, мин;

E_{s1} – параметр разрешения включения электродвигателя после срабатывания защиты, %;

¹ При отсутствии данных, приводимых заводом-изготовителем в документации двигателя, определяют способами, приведенными в 10.5.11

E_{s2} - параметр пуска защиты на сигнализацию (вторая ступень), %;

E_{s3} - параметр пуска защиты на сигнализацию или отключение (первая ступень), %.

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

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства изготавливают 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 двух минут.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства, изготовленные ранее 01.07.2010, как правило, соответствуют требованиям ранее действовавшего ГОСТ 183-74 [12], где было установлено такое же требование, как и в ГОСТ Р 52776-2007.

Исходя из указанных требований, рассчитываем минимально допустимую постоянную времени охлаждения статора [5] по аналогии с (48):

$$A = t_{\text{дон}} \cdot (k_*^2 - 1) = 120 \cdot (1,5^2 - 1) = 150 \text{ с}, \quad (52)$$

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

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

Определим минимально допустимую постоянную времени нагрева электродвигателя T_{e1} , мин, по формуле, приведенной в [13]¹:

$$\frac{A}{T_{e1} \cdot 60} = \ln \left(\frac{k_*^2 - 1}{k_*^2 - k_{\text{max}}} \right) \quad (53)$$

После преобразования получим:

$$T_{e1} = \frac{A}{60 \cdot \ln \left(\frac{k_*^2 - 1}{k_*^2 - k_{\text{max}}} \right)} \quad (54)$$

где k_{max} – предельная кратность перегрева относительно перегрева при номинальном токе.

Коэффициент k_{max} может быть определен из таблицы 5, которая составлена основе ГОСТ 8865-93 с учетом следующего:

- при токах, не превышающих номинальный ток двигателя, изоляция

¹ См. с. 150

как правило используется по более низкому температурному классу (например, F с использованием по классу B);

- двигатель работает при температуре окружающей среды 40°C.

При других условиях работы электродвигателя требуется провести дополнительные расчеты.

Таблица 5

Класс изоляции	Предельно допустимая температура перегрева, °C	k_{\max}
A	65	-
E (исп. по A)	80	1,231
B (исп. по E)	90	1,125
F (исп. по B)	115	1,278
H (исп. по F)	140	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 частоты вращения вала, постоянные времени охлаждения и нагрева равны.

Если двигатель охлаждается вентилятором, закрепленным на валу, T_{e2} , как правило, от 2 до 4 раз больше постоянной времени нагрева.

10.5.12 Для более полного использования перегрузочных возможностей машины рекомендуется при проведении пуско-наладочных работ экспериментальное определение реальных постоянных времени нагрева и охлаждения в соответствии с изложенным в 10.7.

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

$$E_{\text{пуск}} = k_{\text{пуск}}^2 \cdot (1 - e^{-\frac{t_n}{T_{e1}}}) \cdot 100. \quad (55)$$

где $k_{\text{пуск}}$ - кратность пускового тока машины (как правило, от 3 до 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 разрешен пуск машины:

$$E_{S1} \leq 100\% - E_{\text{пуск}}. \quad (56)$$

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

$$E_{S2,3} = 100\% \cdot \left(\frac{I_{\text{дв}}}{I_{\text{дв.ном}}} \right)^2, \quad (57)$$

где $E_{S2,3} = 100\%$ - относительная температура нагрева двигателя, когда по его статорным обмоткам протекает номинальный ток;

$I_{\partial\partial}$ - ток, потребляемый электродвигателем, А;

$I_{\partial\partial.ном}$ - номинальное значение тока электродвигателя, А;

Для первой ступени (сигнализация или отключение) исходя из допустимой возможной длительной работы электродвигателя в сети с напряжением, составляющим 90 % от номинального (см. ГОСТ 13109-97) выбираем отношение токов, равным $\frac{I_{\partial\partial}}{I_{ном.дв}} = 1,10$. В соответствии с этим получаем значение

$E_{S3} = 100\% \cdot (1,10)^2 \approx 121\%$.

Для второй ступени (сигнализация) исходя из возможной длительной работы двигателя в сети с напряжением составляющим 110 % от номинального (см. ГОСТ 13109-97) выбираем отношение токов, равным

$$\frac{I_{\partial\partial}}{I_{ном.дв}} = 0,9.$$

В соответствии с этим получаем значение $E_{S2} = 100\% \cdot (0,9)^2 \approx 81\%$.

10.5.15 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 так, чтобы контролировать температуру окружающей среды, в которой работает двигатель.

10.6 Примеры расчета защит от перегрузок

10.6.1 Защита АД от симметричных перегрузок

10.6.2.1 Требуется определить параметры алгоритма защиты от симметричных перегрузок АД серии А4.

Пуск АД прямой от напряжения питающей сети.

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

АД соответствует требованиям ГОСТ 183-74.

Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{ном.дв}$	800 кВт
номинальный ток двигателя, $I_{ном.дв}$	57 А
напряжение, $U_{ном.дв}$	10 кВ
кпд, η	0,975
кратность пускового тока, $k_{пуск}$	5,5
время пуска $t_{пуск}$ (по проекту)	5 с

10.6.1.2 Ток срабатывания первой ступени защиты от симметричных перегрузок $I_{с.з.1}$, в первичных значениях определяем по формуле (45):

$$I_{с.з.1} = \frac{1,2 \cdot k_{пуск}}{k_g} I_{ном.дв} = \frac{1,2 \cdot 5,5}{0,95} \cdot 57 = 396 \text{ А} = 6,95 I_{ном.дв}.$$

Время срабатывания первой ступени защиты $t_{с.з.1}$ принимаем 0,1 с. Это необходимо для исключения неправильного действия защиты при подпитке двигателями КЗ на шинах или присоединениях питающей сети и для отстройки от длительности броска пускового тока АД.

10.6.1.3 Вторая ступень защиты от симметричных перегрузок имеет инверсную характеристику и работает с действием на отключение электродвигателя.

Пуск второй ступени защиты происходит при кратности тока $k_* = 1,08 I_{ном.дв}$. Значение тока пуска второй ступени защиты в первичных значениях найдем по соотношению (47):

$$I_{с.з.2} = \frac{1,08}{k_g} \cdot I_{ном.дв} = \frac{1,08}{0,95} \cdot 57 = 64,8 \text{ А} = 1,14 \cdot I_{ном.дв}.$$

Время срабатывания защиты рассчитывает процессор БМРЗ по формуле (46) при $A = 150$ с:

$$t_{с.з} = \frac{150}{k_*^2 - 1}.$$

10.6.1.4 Третью ступень защиты выполняем с независимой характеристикой с действием на сигнализацию (рисунок 19).

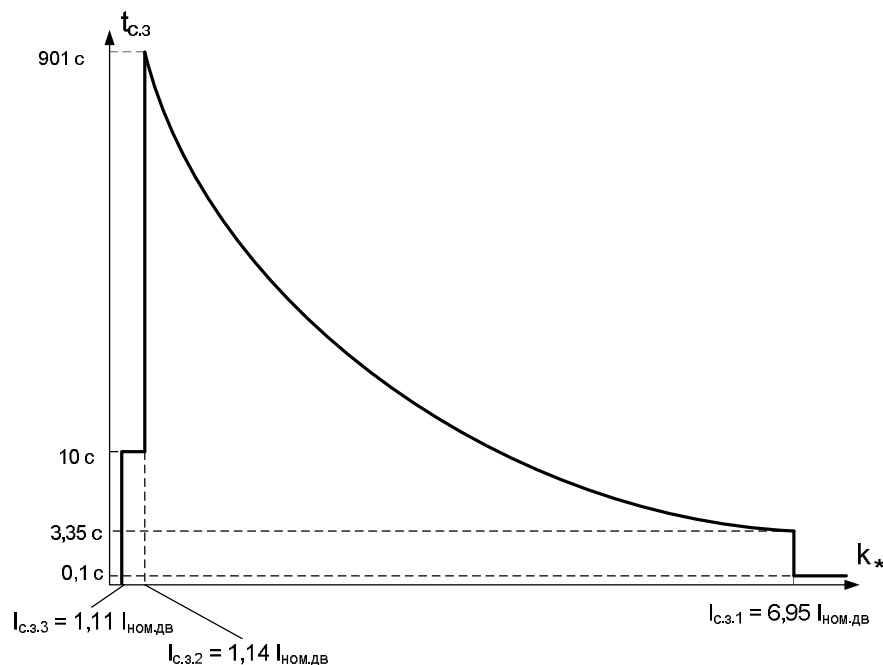


Рисунок 19 - Характеристика защиты от симметричных перегрузок электродвигателя серии А4 мощностью 800 кВт

Ток срабатывания третьей ступени максимальной токовой защиты электродвигателя определяем по формуле (48):

$$I_{с.з.3} = \frac{1,05}{k_g} \cdot I_{ном.дв} = \frac{1,05}{0,95} \cdot 57 = 63 А = 1,11 \cdot I_{ном.дв}$$

Так как АД не подвержен технологическим перегрузкам, а расчетное время его пуска составляет $t_{пуск} = 5 с$, выбираем время срабатывания третьей ступени защиты на сигнализацию $t_{с.з} = 10 с$.

10.6.2 Защита АД с помощью тепловой модели

10.6.2.1 Требуется определить параметры алгоритма тепловой защиты АД серии А4.

АД соответствует требованиям ГОСТ Р 52776-2007.

Пуск АД прямой от напряжения питающей сети.

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

Класс изоляции двигателя: F с использованием по классу В

Исходные данные для расчета:

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

10.6.2.2 Расчетный ток тепловой модели¹ выбираем равным номинальному току двигателя:

$$I_{TM} = I_{ном.дв} = 57 А.$$

10.6.2.3 Минимально допустимую постоянную времени охлаждения статора рассчитаем по формуле (52):

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

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

$t_{дон}$ – допустимое время работы двигателя при перегрузке k_* , поскольку двигатель соответствует требованиям ГОСТ Р 52776-2007, принимаем $t_{дон} = 120 с$, $k_i = 1,5$.

10.6.2.4 Минимально допустимую постоянную времени нагрева элек-

¹ В руководствах по эксплуатации блоков БМРЗ этот ток назван **штатным**

тродвигателя T_{e1} (двигатель соответствует ГОСТ Р 52776-2007) находим по формуле (54):

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

где k_{\max} - предельная кратность перегрева, определяемая классом изоляции двигателя при изоляции класса F, используемой по классу B.

По таблице 5 находим $k_{\max} = 1,278$.

10.6.2.5 Вентилятор охлаждения закреплен на валу двигателя, поэтому принимаем постоянную охлаждения двигателя равной:

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

10.6.2.6 Относительный расчётный нагрев двигателя за время пуска $E_{\text{пуск}}$ находим по формуле (55):

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

Зная допустимую относительную температуру двигателя, определяем максимально допустимое значение уставки E_{S1} :

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

Округляя полученное значение до целого числа принимаем:

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

10.6.2.7 В соответствии с рекомендациями, изложенными в 10.5.14 принимаем $E_{S2} = 81\%$, $E_{S3} = 121\%$ и по полученным результатам строим характеристику алгоритма (рисунок 20).

10.7 Определение постоянных времени тепловой модели

10.7.1 Постоянные времени нагрева T_{e1} и охлаждения T_{e2} могут быть определены экспериментально, путем оценки скорости нагрева и остывания двигателя.

Температуру двигателя можно определить с помощью встроенных тепловых датчиков (при их наличии) или косвенно, по температуре поверхности двигателя.

При проведении эксперимента температура окружающей двигатель среды должна, по возможности, оставаться постоянной.

Во время пуско-наладочных работ рекомендуется всегда проводить экспериментальное определение параметров тепловой модели.

10.7.2 Порядок экспериментального определения постоянных времени описан ниже.

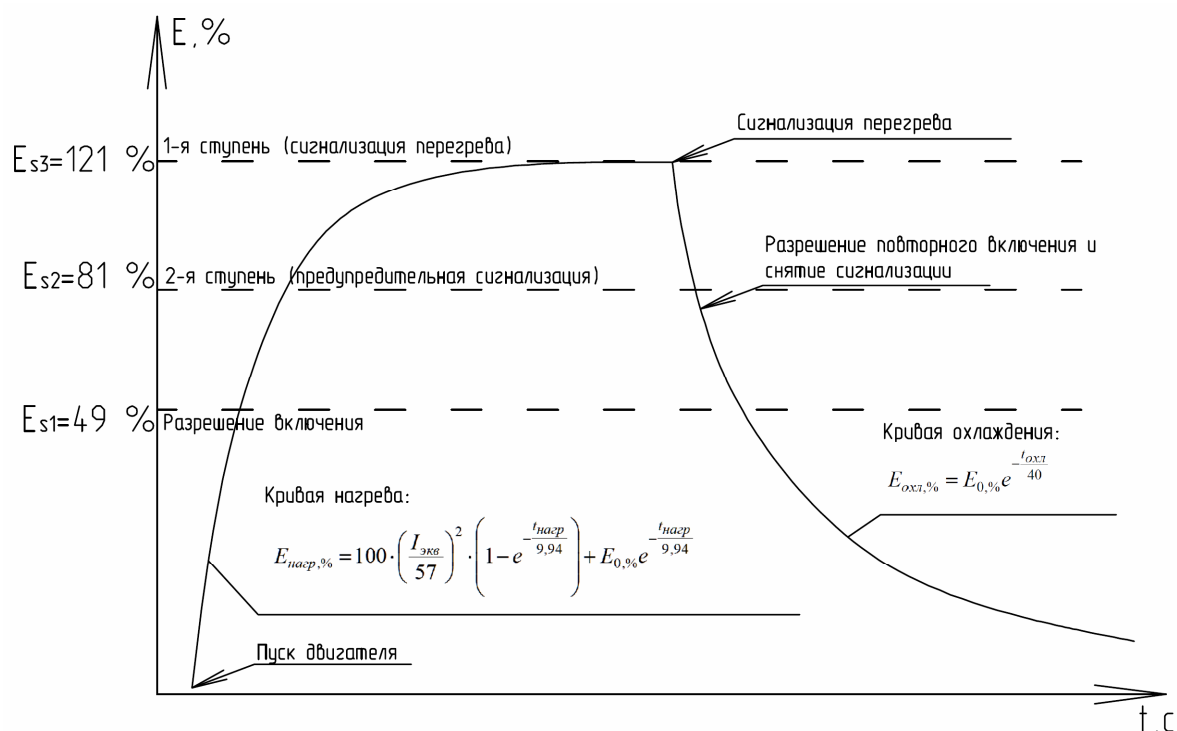


Рисунок 20 - Характеристика тепловой модели для двигателя серии А4 мощностью 800 кВт

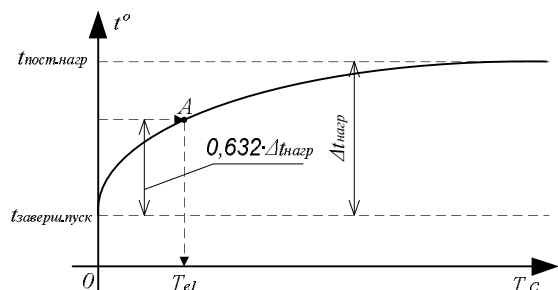
10.7.2.1 Электродвигатель необходимо остановить на время, необходимое для полного остывания, как внешней поверхности двигателя, так и его внутренних частей.

При отсутствии независимого охлаждения процесс остывания двигателя может, занять от 10 до 20 часов (зависит от конструкции двигателя). Наличие независимого охлаждения остановленного двигателя обеспечивает охлаждение за время, составляющее примерно от 1 до 2 часов.

После окончания процесса охлаждения производят измерение температуры двигателя, после чего двигатель запускают.

10.7.2.2 Начиная с момента пуска снимают график (рисунок 21, а)

а)



б)

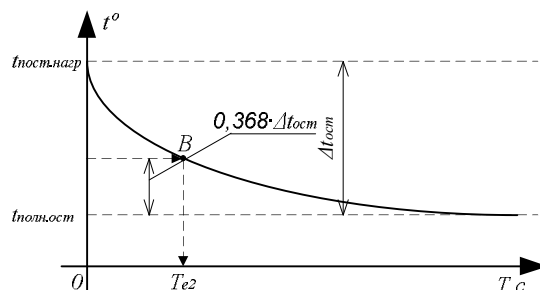


Рисунок 21 – Определение постоянных времени:

- T_{e1} - по графику нагрева двигателя (а);
- T_{e2} по графику охлаждения двигателя (б).

процесса нагрева электродвигателя. Измерения выполняют с интервалом 60 секунд. Нагрузка двигателя при этом должна оставаться постоянной - не менее 50 % от номинальной нагрузки двигателя.

Выполняют 120 измерений, или больше, если температура двигателя не достигла установившегося значения.

10.7.2.3 По полученному графику изменения температуры определяют установившееся значение температуры электродвигателя при постоянной нагрузке $t_{\text{пост.нагр}}$.

10.7.2.4 После остановки двигателя снимают график его охлаждения (рисунок 21, б). Независимые средств охлаждения должны находиться в таком состоянии (включены или отключены), в каком они будут находиться при остановленном двигателе в процессе эксплуатации.

10.7.2.5 По построенному графику определяют установившееся значение температуры остановленного двигателя (должна соответствовать температуре двигателя до пуска) $t_{\text{полн.ост}}$.

10.7.2.6 Находим $\Delta t_{\text{нагр}}$ - разность температур двигателя через 60 с после запуска из холодного состояния $t_{\text{заверш.пуск}}$ и при постоянной нагрузке $t_{\text{пост.нагр}}$:

$$\Delta t_{\text{нагр}} = t_{\text{пост.нагр}} - t_{\text{заверш.пуск}} \quad (58)$$

Графически (рисунок 21, а) определяем время T_{e1} , с, прошедшее от начала нагрева до достижения температурой значения $(t_{\text{заверш.пуск}} + \Delta t_{\text{нагр}} \cdot 0,632)$.

T_{e1} – постоянная времени нагрева этого электродвигателя.

10.7.2.8 Находим $\Delta t_{\text{ост}}$ - разность температур двигателя при постоянной нагрузке и в полностью остывшем состоянии:

$$\Delta t_{\text{ост}} = t_{\text{пост.нагр}} - \Delta t_{\text{полн.ост}}, \quad (59)$$

Графически (рисунок 21, б) находим время T_{e2} (постоянная времени охлаждения этого электродвигателя), прошедшее с момента остановки двигателя до момента достижения им температуры $(t_{\text{полн.ост}} + \Delta t_{\text{ост}} \cdot 0,368)$.

Как правило, постоянная времени охлаждения T_{e2} от 2 до 4 раз больше, чем постоянная времени нагрева T_{e1} .

10.7.3 После задания в терминале БМРЗ найденных постоянных времени T_{e1} , T_{e2} и расчетного тока двигателя I_{TM} (принимают равным номинальному току двигателя во вторичных значениях) необходимо проверить правильность работы тепловой модели.

Проверка осуществляется аналогично описанному в 10.7.2.1 – 10.7.2.4, при этом каждые 60 секунд фиксируют текущее значение температуры двигателя и значение перегрева, индицируемое на дисплее БМРЗ.

10.7.4 После завершения эксперимента на основе полученных значений строится график процессов нагрева и охлаждения, где установившееся значение перегрева, индицируемое БМРЗ, приравнивается к установившейся температуре двигателя при постоянной нагрузке.

10.7.6 По графику определяют погрешность тепловой модели в каждой точке измерения по формуле:

$$\Delta t = \frac{t_{TM,\%} \cdot t_{\text{двиг.уст.}}}{t_{TM\text{уст.}}} - t_{\text{двиг}} \quad (60)$$

где: $t_{TM,\%}$ - текущее значение перегрева, индицируемое на дисплее терминала БМРЗ, %;

$t_{\text{двиг.уст.}}$ - установившееся значение повышения температуры двигателя относительно температуры полностью остывшего двигателя, °С;

$t_{TM\text{уст.}}$ - установившееся значение перегрева, индицируемое на дисплее БМРЗ, %;

$t_{\text{двиг}}$ - текущее значение повышения температуры двигателя относительно температуры полностью остывшего двигателя, °С.

Настройка тепловой модели считается успешной, если погрешность не превышает ± 5 °С.

10.7.7 На результат настройки тепловой модели существенное влияние оказывают условия охлаждения двигателя (изменение температуры окружающей среды, наличие ветра при его наружной установке и т.п.).

Если погрешность тепловой модели превышает ± 5 °С, необходимо повторить эксперимент по определению постоянных времени. При невозможности настройки модели путем повторного эксперимента, а также при существенном отличии полученных характеристик нагрева и охлаждения двигателя от представленных на рисунке 21, рекомендуем обратиться за помощью в ООО «НТЦ «Механотроника».

11 Защиты СД от асинхронного режима

11.1 Требования ПУЭ к защите СД от асинхронного режима

11.1.1 Для СД должна предусматриваться защита от асинхронного режима, которая может быть совмещена с защитой от токов перегрузки.

Защита СД от асинхронного режима может быть осуществлена при помощи реле, реагирующего на увеличение тока в обмотках статора. Такая защита 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 короткого замыкания более 1.

При выполнении схемы защиты необходимо принять меры по предотвращению отказа защиты при биениях тока, характерных для асинхронного режима. Допускается применение других способов защиты, обеспечивающих надежное действие защиты при возникновении асинхронного режима.

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

- ресинхронизацию;

- ресинхронизацию с автоматической кратковременной разгрузкой¹ механизма до такой нагрузки, при которой обеспечивается втягивание электродвигателя в синхронизм;
- отключение электродвигателя и его повторный автоматический пуск;
- отключение электродвигателя².

11.2 Защита СД от асинхронного режима в терминалах БМРЗ

11.2.1 Длительная работа СД в асинхронном режиме при потере 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, работающие с технологическими перегрузками. Поэтому целесообразно всегда выполнять защиту СД от работы в асинхронном режиме аналогично защите синхронных генераторов - с использованием реле сопротивления [14].

11.2.2 Проанализируем изменение сопротивления на выводах питания двигателя, используя материал, изложенный в [15] (рисунок 22).

В 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). 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 [15], сопротивление на выводах синхронной машины при потере возбуждения может изменяться в диапазоне от $F \cdot x''_d$, где x''_d – сверхпереходное сопротивление СД, Ом до $G \cdot x_d$, где индуктивное сопротивление прямой последовательности СД, Ом.

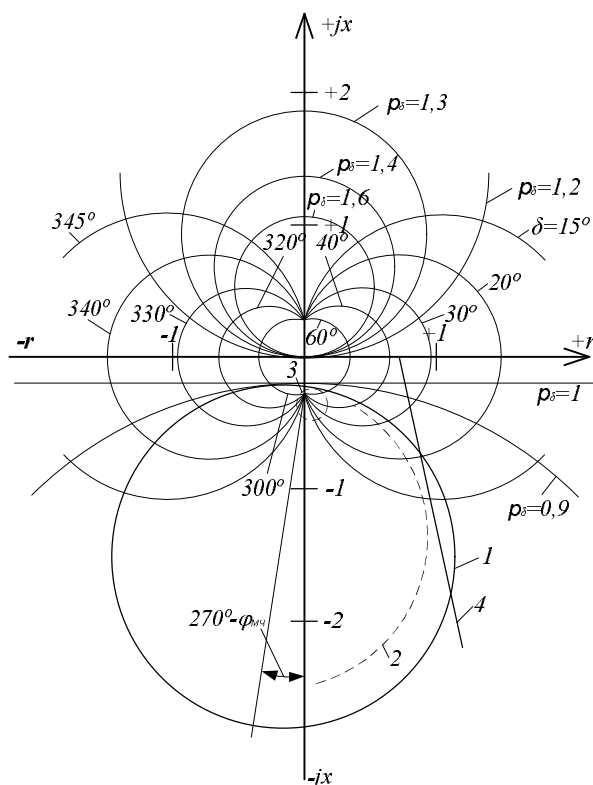
В свою очередь множитель F принимает значения от 0,3 до 0,5, а множитель G – от 1,1 до 1,4.

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 $F x''_d$ и $G x_d$ (рисунок 23).

Положительным направлением токов для двигателя принято считать направление «в двигатель» (для генератора, как правило «из генератора»), поэтому характеристика срабатывания защиты находится в верхней

¹ В тех случаях, когда по условиям технологического процесса допустима кратковременная разгрузка механизма.

² При невозможности его разгрузки или ресинхронизации, а также при отсутствии необходимости автоматического повторного пуска и ресинхронизации по условиям технологического процесса.



- 1 – характеристика реле сопротивления
 2,3 – характеристики асинхронных режимов
 4 – зависимость полного сопротивления от R_p

Рисунок 22 - Круговые диаграммы полного сопротивления на выводах синхронной машины и характеристика реле

полуплоскости.



Рисунок 23 - Характеристика защиты от потери возбуждения СД

В справочниках по электрическим машинам значения сопротивлений двигателя чаще всего приведены в относительных единицах. Для их перевода в именованные единицы требуется сначала определить значение базисного сопротивления r_{σ} по формуле:

$$r_{\sigma} = \frac{U_{ном.дв}^2 \cdot 1000}{S_{ном.дв}} \text{ Ом}, \quad (61)$$

где $U_{ном.дв}$ - номинальное напряжение двигателя, В;

$S_{ном.дв}$ - номинальная полная мощность двигателя, кВт.

После нахождения базисного сопротивления переводим сверхпереходное и переходное сопротивления в именованные единицы по формулам (62) и (63):

$$x_d'' = \frac{x_d''(\%) \cdot r_{\sigma}}{100\%}, \quad (62)$$

$$x_d = \frac{x_d(\%) \cdot r_{\sigma}}{100\%}, \quad (63)$$

где x_d'' - сверхпереходное индуктивное сопротивление двигателя, Ом;

$x_d''(\%)$ - сверхпереходное индуктивное сопротивление двигателя, %;

r_{σ} - базисное сопротивление двигателя, Ом;

x_d - индуктивное сопротивление прямой последовательности, Ом;

$x_d(\%)$ - индуктивное сопротивление прямой последовательности, %.

Время срабатывания защиты выбирают из диапазона от 1 до 2 с.

Работа защит СД от асинхронного режима автоматически блокируется 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.

Данный алгоритм защиты реализован в БМРЗ-УЗД.

11.3 Пример расчета защиты СД от асинхронного режима

11.3.1 Требуется определить параметры защиты от асинхронного режима (потери возбуждения) электродвигателя СТД-4000-2.

Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{ном.дв}$ 4000 кВт

номинальная мощность на валу двигателя, $S_{ном.дв}$ 4560 кВт

напряжение, $U_{ном.дв}$ 10 кВ

сверхпереходное индуктивное сопротивление двигателя, x_d'' 14,29%

индуктивное сопротивление двигателя, x_d 181,5%

11.3.2 Для перевода значений сверхпереходного сопротивления и сопротивления прямой последовательности двигателя, в именованные единицы, найдем значение базисного сопротивления $r_{\bar{o}}$ по формуле (61):

$$r_{\bar{o}} = \frac{U_{ном.дв}^2 \cdot 1000}{S_{ном.дв}} = \frac{10^2 \cdot 1000}{4560} = 22 \text{ Ом}$$

Сверхпереходное сопротивление двигателя x_d'' в именованных единицах получаем из формулы (62):

$$x_d'' = \frac{x_d''(\%) \cdot r_{\bar{o}}}{100\%} = \frac{14,29\% \cdot 22}{100\%} \approx 3,1 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление прямой последовательности x_d в именованных единицах получаем из формулы (63):

$$x_d = \frac{x_d(\%) \cdot r_{\bar{o}}}{100\%} = \frac{185,1\% \cdot 22}{100\%} \approx 40,7 \text{ Ом}$$

11.3.3 По результатам проведенных расчетов, строим характеристику работы защиты, приведенную на рисунке 24.

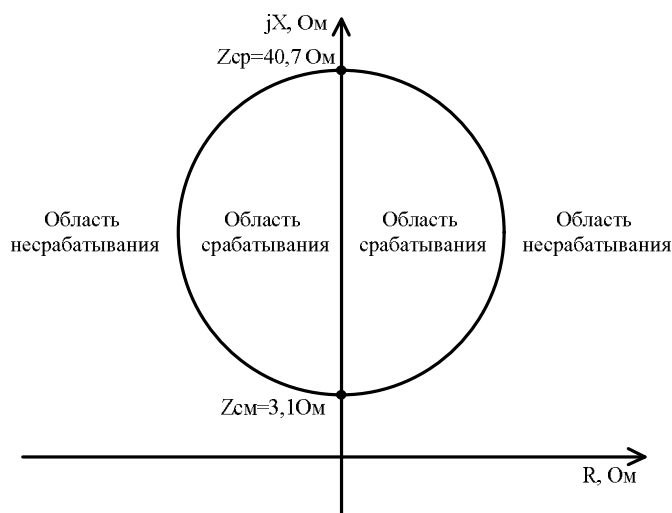


Рисунок 24 - Характеристика защиты электродвигателя
СТД-4000-2 от потери возбуждения

12 Выбор уставок для алгоритма УРОВ

12.1 Алгоритм УРОВ предназначен для отключения смежных выключателей электрической сети при отказе выключателя электродвигателя.

Требования по применению УРОВ в электроустановках 6 – 10 кВ в ПУЭ [1] отсутствуют.

При использовании терминалов БМРЗ рекомендуется всегда применять алгоритм УРОВ, так это позволяет минимизировать повреждения распределительного устройства в случае отказа выключателя электродвигателя.

12.2 В алгоритмах УРОВ, реализованных в терминалах БМРЗ, предусмотрено использование информации:

- о срабатывании защит, действующих на УРОВ;
- о токе, протекающем по защищаемой цепи.

При срабатывании защиты, для которой предусмотрено действие на УРОВ, рассматриваемый алгоритм начинает отсчет выдержки времени $t_{уров}$. В течение этого времени ожидается снижение тока в защищаемой цепи ниже уставки $I_{уров}$. Если за время $t_{уров}$ такого снижения не произошло, алгоритм УРОВ формирует выходной сигнал «УРОВд», используемый для отключения смежных выключателей. Если за время $t_{уров}$ произошло снижение тока ниже уставки $I_{уров}$, выходной сигнал «УРОВд» не формируется.

12.3 Уставку $I_{уров}$ выбирают из диапазона от $0,05 I_{ном.дв}$ до $0,10 I_{ном.дв}$.

Выдержка времени формирования выходного сигнала «УРОВд», определяется по формуле, приведенной в [14]:

$$t_{уров} = t_{вык} + t_{воз РЗ} + t_{ош РВ} + t_{зап}, \quad (64)$$

где $t_{вык}$ - время отключения выключателя (как правило: от 0,05 до 0,1с);

$t_{воз РЗ}$ - время, необходимое для возврата релейной защиты, по сигналу которой происходит пуск алгоритма УРОВ.

$t_{ош РВ}$ - время допустимой погрешности реле времени УРОВ в сторону ускорения действия

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

Для терминалов БМРЗ рекомендуются следующие значения:

- $t_{уров}$ от 0,3 до 0,5 с;
- $t_{воз РЗ}$ - 0,01 с;
- $t_{ош РВ}$ - 0,025 с при уставках от 0,05 до 1 с.

13 Минимальная токовая защита электродвигателя

13.1 Минимальная токовая защита представляет собой технологическую защиту, предназначенную для выявления ненормального режима работы при аварийном сбросе нагрузки на валу электродвигателя.

Уставку срабатывания МинТЗ по току выбирают исходя из условий минимально возможной нагрузки электродвигателя во всех технологических режимах его работы.

Значение уставки уточняют при проведении пуско-наладочных работ и согласовывают с эксплуатирующей организацией.

13.2 В терминалах БМРЗ предусмотрено выполнение МинТЗ с действием на сигнализацию или отключение.

Уставку срабатывания по току $I_{с.з.}$ выбирают из диапазона от 0,2 до $0,6 I_{ном.дв}$.

Время срабатывания защиты выбирают из диапазона от 2 до 5 с.

14 Алгоритм «функция опережающего отключения»

14.1 Назначение алгоритма ФОО

14.1.1 Алгоритм ФОО предназначен для отключения синхронного двигателя при провале питающего напряжения (например, при близких КЗ) в случае появления условий перехода двигателя в асинхронный режим.

14.2 Устойчивость узлов нагрузки с СД

14.2.1 Асинхронный режим в энергосистеме¹

14.2.1.1 При резком снижении напряжения из-за КЗ на смежных ЛЭП, питающих подстанцию, узел нагрузки с СД может потерять устойчивость и перейти в опасный асинхронный режим с возбуждением. Возникающий при этом режим сходен с асинхронным режимом в энергосистеме, характеризующимся периодическими:

- а) изменениями угла между несинхронными ЭДС частей системы от 0° до 360° , происходящим с частотой скольжения;
- б) качаниями напряжения;
- в) изменениями тока и мощности.

На рисунке 25 по горизонтальной оси 1 - 2 в масштабе отложено сопротивление $X_{\text{ЭЭС1}} + X_{\text{Л}} + X_{\text{ЭЭС2}}$ (для энергосистем бесконечной мощности - длина ЛЭП), по концам которой расположены источники ЭДС $E_{\text{ЭЭС1}}$ и $E_{\text{ЭЭС2}}$.

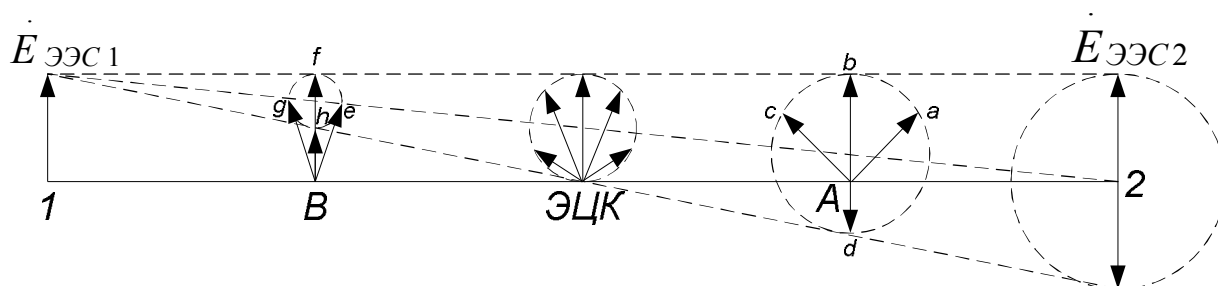


Рисунок 25 - Диаграмма качаний напряжения вдоль ЛЭП при асинхронном режиме (по [10])

Условно принимаем, что вектор $E_{\text{ЭЭС1}}$ неподвижен, а $E_{\text{ЭЭС2}}$ вращается с частотой скольжения, образуя окружность.

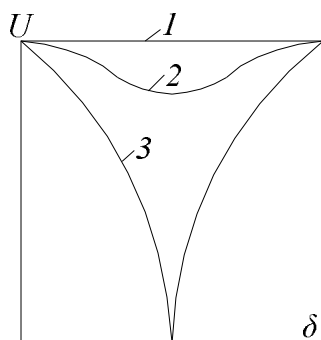
Соединим прямыми линиями верхнюю и нижнюю точки этой окружности, а также ее центр (точка 2) с точкой 3.

Прямая 2 - 3 представляет собой геометрическое место центров окружностей, на которых расположены начала векторов напряжений вдоль ЛЭП.

Например, в точке А линии электропередачи напряжение будет периодически изменяться в соответствии с положением векторов aA , bA , cA , dA , в точке В векторов eB , fB , gB , hB . В точке ЭЦК (электрический центр качаний) напряжение периодически становится равным нулю. Характер изменения напряжения в разных точках ЛЭП показан на рисунке 26, а. Характер изменения тока и мощности в ЛЭП показан на рис. 26, б.

¹ Данный раздел составлен по материалам работы [10].

а)



1 – на концах ЛЭП,
2 – в точках А и В,
3 – в ЭЦК

б)

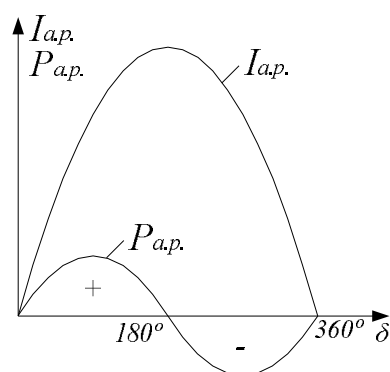


Рисунок 26 - Характер изменения напряжения (а), мощности и тока (б) В ЛЭП при асинхронном ходе

Ток асинхронного режима определяют по формуле:

$$I_{a.p.} = \frac{2E}{X_{\text{ЭЭС1}} + X_{\text{Л}} + X_{\text{ЭЭС2}}} \cdot \sin \frac{\delta}{2}, \quad (65)$$

Обозначения величин, использованных в этой формуле, приведены выше. При $\delta = 0^\circ$ или 360° ток $I_{a.p.} = 0$; при $\delta = 180^\circ$ ток $I_{a.p.} = \max$;

Расчетное выражение мощности в ЛЭП:

$$P_{a.p.} = \frac{E_{\text{ЭЭС1}} \cdot E_{\text{ЭЭС2}}}{X_{\text{ЭЭС1}} + X_{\text{Л}} + X_{\text{ЭЭС2}}} \cdot \sin \delta \quad (66)$$

Из соотношения (66) следует, что средняя активная мощность за период качаний равна нулю, т.е. активная мощность по линии не передается.

14.2.2 Статическая устойчивость СД

14.2.2.1 Мощность, потребляемая СД от питающей его энергосистемы, описывается уравнением:

$$P_{\text{ДВ}} = \frac{U \cdot E_{\text{ДВ}}}{X_{\text{экв}}} \cdot \sin \delta \quad (67)$$

где U - напряжение на шинах энергосистемы;

$E_{\text{ДВ}}$ - ЭДС электродвигателя;

$X_{\text{экв}}$ - эквивалентное сопротивление, включающее сопротивление электродвигателя и всех элементов питающей сети;

δ - фазовый угол между ЭДС электродвигателя и напряжением энергосистемы.

Характеристика зависимости мощности $P_{\text{ДВ}}$ от угла δ (рисунок 7) показывает, что мощность электродвигателя при увеличении угла δ сначала

возрастает, достигая максимума при $\delta = 90^\circ$ (величины $E_{дв}$ и U считаем постоянными) а затем падает.

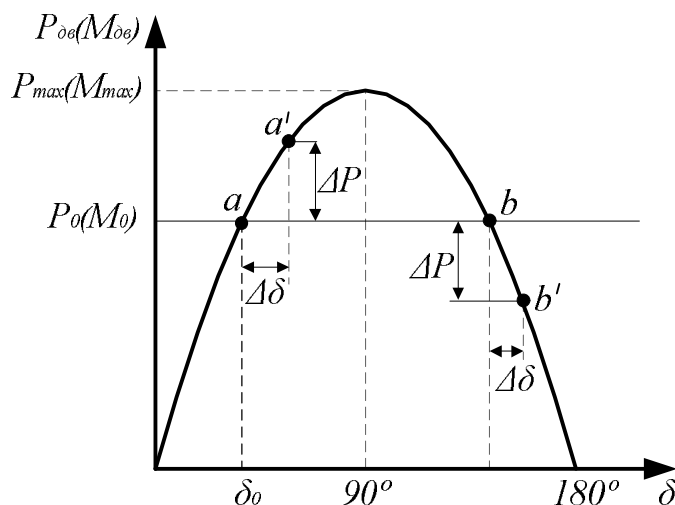


Рисунок 27 - Угловая характеристика синхронного двигателя

Максимум мощности при угле 90° зависит от сопротивления питающей сети.

14.2.2.2 При синхронной частоте вращения относительные значения мощности двигателя и момента численно равны, поэтому кривая $P = f(\delta)$ является и характеристикой вращающего момента двигателя.

Характеристика момента сопротивления изображена прямой линией: $P_0 = f(\delta)$. Точки пересечения a и b определяют возможные режимы работы двигателя, однако устойчиво двигатель может работать только в точке a (соответствует углу δ_0). Действительно, при работе в точке a и случайном кратковременном увеличении угла δ на величину $\Delta\delta$ увеличивается и электромагнитный момент синхронного двигателя на величину ΔP , под влиянием которого ротор несколько ускоряется. При этом угол δ уменьшается, и после нескольких колебаний возвращается к значению δ_0 . При случайном кратковременном уменьшении угла δ ротор несколько притормаживается, угол δ возрастает и после нескольких колебаний вновь возвращается к значению δ_0 . Если же подобное кратковременное увеличение угла на $\Delta\delta$ произойдет в точке b , то электромагнитный момент не увеличится, а уменьшится. Это вызовет дальнейшее увеличение угла δ , в результате чего двигатель выйдет из синхронизма.

14.2.2.3 Восходящая ветвь характеристики на рисунке 27 - область устойчивой работы, нисходящая - неустойчивой. Чем ближе точка a расположена к вершине кривой, тем меньше запас статической устойчивости. Положение точки a на кривой зависит от загрузки двигателя, от отношения $\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$ и $\cos\varphi$ двигателя. Чем меньше загрузка двигателя и чем больше ката-

ложное отношение $\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$, тем больше запас устойчивости.

14.2.3 Динамическая устойчивость синхронных двигателей

14.2.3.1 Рассмотрим случай внезапного возмущения во внешней сети, например близкого трехфазного КЗ на одной из линий W1-W5 (рисунок 28).

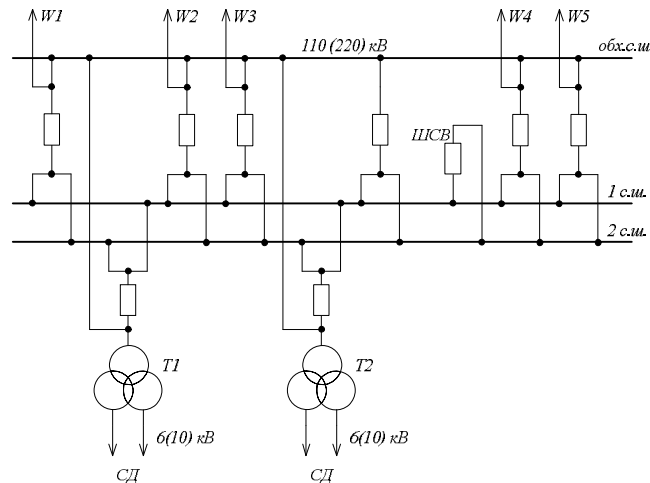
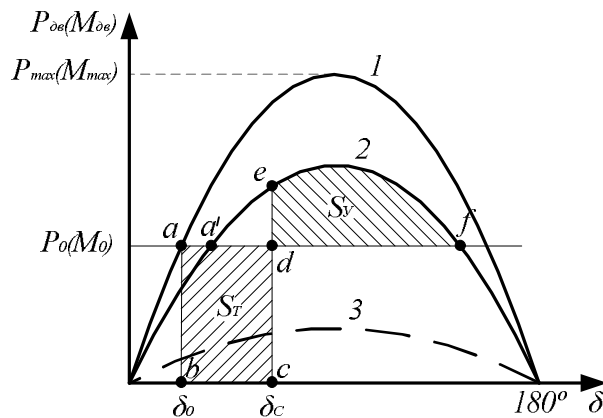


Рисунок 28 - Типовая схема подстанции 110(220) кВ с синхронной нагрузкой

Синхронный двигатель работал устойчиво с моментом сопротивления на валу M_0 и внутренним углом δ_0 (рисунок 29).



1 - угловая характеристика мощности до КЗ

2 - характеристика, соответствующая режиму близкого КЗ

3 - характеристика, соответствующая режиму удаленного КЗ

Рисунок 29 - Характеристики мощности синхронного двигателя в различных режимах

В аварийном режиме вращающий момент двигателя становится равным нулю, его характеристика переходит из точки a в точку b . Пока КЗ не

отключено, происходит торможение двигателя, что приводит к увеличению угла δ_0 до δ_c .

14.2.3.2 В момент отключения КЗ характеристика переходит из точки c в точку e , лежащую на кривой 2, соответствующей новому режиму работы энергосистемы.

Энергия торможения двигателя соответствует площадке $abcd$, называемой площадкой торможения S_T . Площадка edf называют площадкой ускорения S_y , площадь которой соответствует энергии ускорения, которую приобретет двигатель в новом режиме.

Если $S_y > S_T$, то устойчивость двигателя сохранится, процесс после некоторых колебаний установится в точке a' . Если $S_T > S_y$, то двигатель теряет устойчивость.

14.2.3.3 При удаленном трехфазном КЗ на смежной линии или при несимметричном КЗ, напряжение прямой последовательности в линии связи двигатель-энергосистема не снижается до нуля (линия 3 на рисунке 29).

В этом случае площадка торможения будет меньше (без нижней части, отрезаемой кривой 3). Очевидно, что этот режим легче, чем режим близкого трехфазного КЗ.

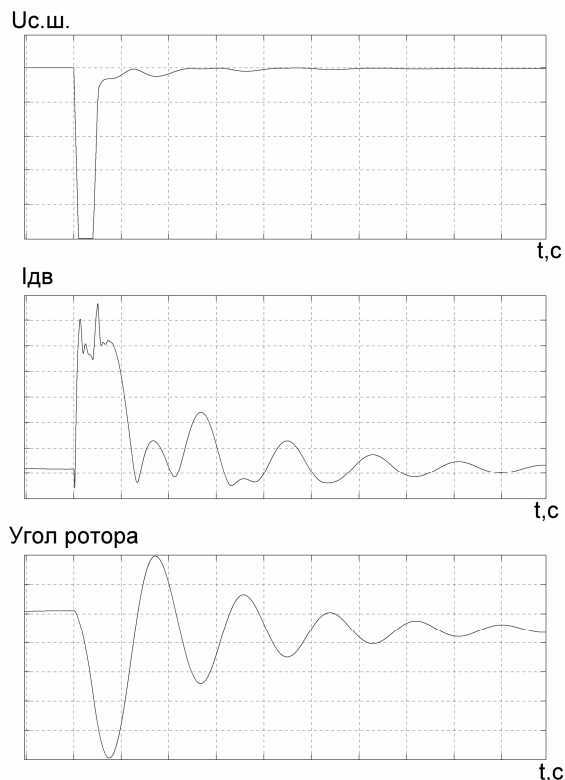
14.2.3.4 Таким образом, на динамическую устойчивость влияют:

а) вид, удаленность и длительность КЗ. Наиболее опасны близкие КЗ, удаленные КЗ менее опасны. По видам КЗ наиболее опасно - трехфазное. Если внешнее возмущение приводит к потере устойчивости СД, то возникает процесс, аналогичный описанному выше для энергосистемы ЭЭС2. Разница заключается в скорости протекания переходного процесса. В начальной фазе, когда возникло КЗ, генераторы начинают ускоряться, а двигатели тормозиться. Потери в цепи КЗ создают дополнительный тормозной момент, который, притормаживая генератор, замедляет рост угла, а притормаживая двигатель, способствует увеличению угла. Увеличению угла двигателей способствуют и повышенные по сравнению с мощными синхронными генераторами активные потери в статоре и роторе двигателя. После отключения КЗ угол и частота скольжения продолжают быстро увеличиваться из-за тормозного момента приводного механизма. Поэтому связка энергосистема-узел с синхронной нагрузкой более критична к внешним возмущениям по сравнению со связкой из двух энергосистем. Характер переходного процесса без потери устойчивости узла нагрузки с СД показан на рисунке 30,а, с потерей устойчивости - на рисунке 30,б;

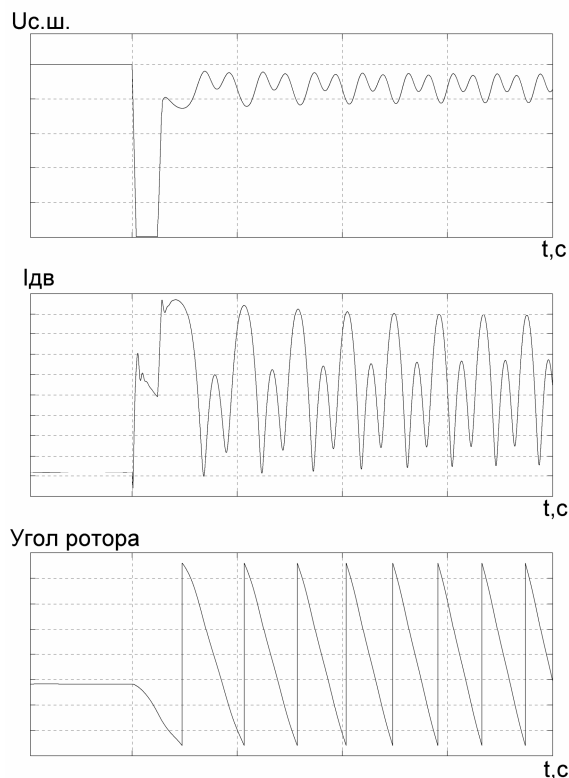
б) нагрузка СД. Чем больше нагрузка СД в предшествующем режиме, тем опаснее внешние возмущения;

в) характеристики послеаварийного режима. Послеаварийный режим, в котором сопротивление внешней сети возрастает по сравнению с доаварийным режимом опаснее, поскольку снижается вся угловая характеристика мощности. Например, отключение одной из двух питающих линий 110 (220) кВ опаснее, чем отключение любой другой отходящей от шин подстанции 110 (220) кВ линии.

а)



б)



$U_{с.ш.}$ - напряжение на шинах секции, $I_{дв}$ - ток двигателя

Рисунок 30. Переходные процессы:
без потери устойчивости (а), с потерей устойчивости (б)

14.3 Поведение узла нагрузки с СД при потере устойчивости

14.3.1 Особый интерес для анализа поведения релейной защиты и противоаварийной автоматики представляет характер переходных процессов в ЛЭП и на вводах секций, от которых питаются СД, а также на сборных шинах.

Известно, что СД сохраняют синхронный выбег, пока генерируемое ими напряжение не снизится до значения примерно $0,4 \cdot U_{ном.дв}$, в пределах этого критерия все СД узла нагрузки можно представить (эквивалентировать) одним электродвигателем, особенно если их мощность, инерционные постоянные и нагрузка примерно одинаковы. Поэтому все вышеизложенное для одного двигателя справедливо и для узла нагрузки с несколькими СД.

Если внешнее возмущение не приводит к нарушению устойчивости группы СД, то переходный процесс носит характер затухающих колебаний, показанных на рисунке 30, а. Точки 1 и 2 соответствуют началу и отключению внешнего КЗ в сети 110 кВ. В процессе качаний ток через ввод периодически изменяется, достигая в максимуме, при наиболее тяжелых, но устойчивых процессах четырехкратного начального значения, в минимуме – 0,3 начального значения. При максимуме тока напряжение снижается до $0,3 \cdot U_{ном.дв}$, в этих условиях может пускаться МТЗ ввода (точка 3). Длитель-

ность повышенного тока не превышает 0,5 с, и в точке 4 МТЗ возвращается. Отсюда следует, что выдержку времени МТЗ ввода нельзя принимать менее 1 с, иначе она может сработать излишне. Полная длительность переходного процесса составляет от 2 до 3 с.

Приведенные рисунки следует рассматривать только как иллюстрацию тенденций электромеханических переходных процессов. Для конкретных узлов нагрузки с СД значения токов, напряжений и скорость протекания переходных процессов могут быть установлены только при их конкретном моделировании или путем натурных экспериментов.

14.3 Алгоритм ФОО в терминалах БМРЗ-ДС

14.4.1 Для исключения асинхронных режимов работы с возбуждением рекомендуется использовать алгоритм ФОО (см. п. 14.1).

Данный алгоритм обеспечивает опережающее отключение СД, не допуская тем самым возникновения процессов, связанных с асинхронным ходом.

14.4.2 В алгоритме ФОО предусмотрены грубая, точная и резервная ступени.

Пуск алгоритма ФОО происходит при возникновении КЗ во внешней сети, которое фиксируется по факту одновременного скачкообразного снижения напряжения, активной мощности и увеличения тока прямой (обратной) последовательности.

После пуска алгоритма ФОО идет накопление информации, необходимой для работы точной ступени (длительность переходного процесса, как правило, составляет не более 250 мс).

14.4.3 В течение этого времени по результатам каждого измерения происходит проверка выполнения условий срабатывания грубой ступени, т.е. процессор терминала проверяет по эмпирической формуле выполнение условий перехода двигателя в асинхронный режим по факту достижения приращением угла $\Delta\delta_{сраб}$ заданной уставки:

$$\Delta\delta_{сраб} = 2,8 - 1,1 \cdot \frac{P_{доав}}{P_{ном}}, \text{ рад} \quad (68)$$

где $P_{доав}$ – мощность синхронного двигателя в предаварийном режиме;
 $P_{ном}$ – номинальная мощность синхронного двигателя

При этом приращение угла $\Delta\delta_{сраб}$, рад, процессор терминала рассчитывает во время переходного процесса по выражениям:

$$\Delta\delta = \int_{t_0}^t s \, dt, \quad (69)$$

$$s = \frac{1}{T_J} \int_{t_0}^t (P_{доав} - P - R_{экс} \cdot \sum i^2) \cdot dt, \quad (70)$$

где s – скольжение ротора СД в текущий момент времени;
 P – текущая мощность СД в переходном процессе;

$R_{\text{экв}}$ – эквивалентное сопротивление активных потерь СД в режиме КЗ;
 $\sum i^2$ – сумма квадратов текущих мгновенных значений фазных токов СД;
 T_J – постоянная инерции СД совместно с приводом.

В терминал БМРЗ уставки алгоритма ФОО вводят в именованных единицах. Все необходимые преобразования уставок выполняет процессор терминала БМРЗ автоматически.

14.4.4 Команда на отключение двигателя формируется в том случае, когда срабатывает грубая ступень алгоритма ФОО.

В тех случаях, когда грубая ступень алгоритма ФОО не сработала, после отключения КЗ вступает в работу точная ступень, которая прогнозирует переход СД в асинхронный режим путем сравнения энергий (площадей) торможения и ускорения (см. рисунок 29).

Для устойчивой работы двигателя должно выполняться соотношение:

$$\frac{s_y - s_T}{s_y} \geq k_d, \quad (71)$$

где k_d – коэффициент динамической устойчивости.

Коэффициент динамической устойчивости k_d в случаях, когда установленная мощность генераторов энергосистемы существенно превышает мощность защищаемого двигателя, принимается равным 0,22. В случаях соизмеримой мощности генераторов энергосистемы и двигателя, требуется проведение специальных расчетов.

Если процесс устойчив, а грубая или точная ступени алгоритма ФОО не сработали, то происходит возврат ступеней в исходное состояние.

Резервная ступень защиты предусмотрена на случай отказа грубой и точной ступеней, например при неправильно введенных уставках. Резервная ступень отключает СД только после его перехода в асинхронный режим с возбуждением. Пуск этой ступени происходит на время 0,4 с после возврата грубой и точной ступеней. Сигнал на отключение СД формируется, если в течение 60 мс одновременно выполняются следующие условия:

$$\begin{cases} P < P_{\text{доав}} \\ U < 0,8 \cdot U_{\text{ном}} \\ I > 1,5 \cdot I_{\text{ном}} \end{cases} \quad (72)$$

14.4 Расчет уставок алгоритма ФОО

14.4.1 Уставку по номинальной активной мощности $P_{\text{ном}}$ рассчитывают по формуле:

$$P_{\text{ном}} = \frac{1000 \cdot P_{\text{ном.дв}}}{K_I \cdot K_U} \text{ кВт}, \quad (73)$$

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

K_I – коэффициент трансформации ТТ;

K_U – коэффициент трансформации ТН.

13.4.2 Постоянную инерции двигателя совместно с приводом T_J , с, определяют по формуле:

$$T_J = \frac{GD_{\text{дв}}^2 \cdot n_{\text{ном.дв}}^2 + GD_{\text{мех}}^2 \cdot n_{\text{ном.мех}}^2}{365 \cdot P_{\text{ном.дв}}}, \quad (74)$$

где $GD_{\text{дв}}^2$ - собственный маховый момент СД, т·м²;

$GD_{\text{мех}}^2$ - маховый момент приводного механизма, т·м²;

$n_{\text{ном.дв}}$ - номинальная частота вращения СД, об/мин;

$n_{\text{ном.мех}}$ - номинальная частота вращения приводного механизма, об/мин;

$P_{\text{ном.дв}}$ - номинальная мощность СД, кВт.

Например, для газоперекачивающих агрегатов с СД-12500-2 $T_J = 3,33$ с, а с СД-4000-2 $T_J = 3,25$ с.

14.4.3 Эквивалентное сопротивление активных потерь в СД во время КЗ $R_{\text{экв}}$, Ом, определяют по формуле:

$$R_{\text{экв}} = (R_{\text{экв.дв}} + R_{\text{экв.сети}}) \cdot \frac{K_I}{K_U}, \quad (75)$$

где K_I - коэффициент трансформации ТТ;

K_U - коэффициент трансформации ТН;

$R_{\text{экв.дв}}$ - приведенное к напряжению статора эквивалентное сопротивление активных потерь в СД.

$R_{\text{экв.сети}}$ - активное сопротивление внешней сети от зажимов СД до точки подключения измерительных ТН, Ом.

14.4.4 Эквивалентное сопротивление активных потерь рассчитывают по паспортным данным СД. Значение $R_{\text{экв.дв}}$ для некоторых типов СД приведены в таблице 6.

Таблица 6

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

15 Защита от колебаний нагрузки

15.1 ЗКН является технологической защитой и предназначена для выявления колебаний нагрузки компрессорных или вентиляторных установок (т.н. помпажа).

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

15.2 Алгоритм ЗКН в терминалах БМРЗ имеет три ступени. Пуск ступеней ЗКН производится при фиксации первого колебания активной мощности с амплитудой, превышающей $A_{кол}$.

Возврат ступени защиты в исходное состояние производится в том случае, если очередное колебание активной мощности, превышающее заданную уставку, не зафиксировано в течение 10 с.

15.3 В алгоритме ЗКН предусмотрено шесть различных режимов работы (рисунок 31).

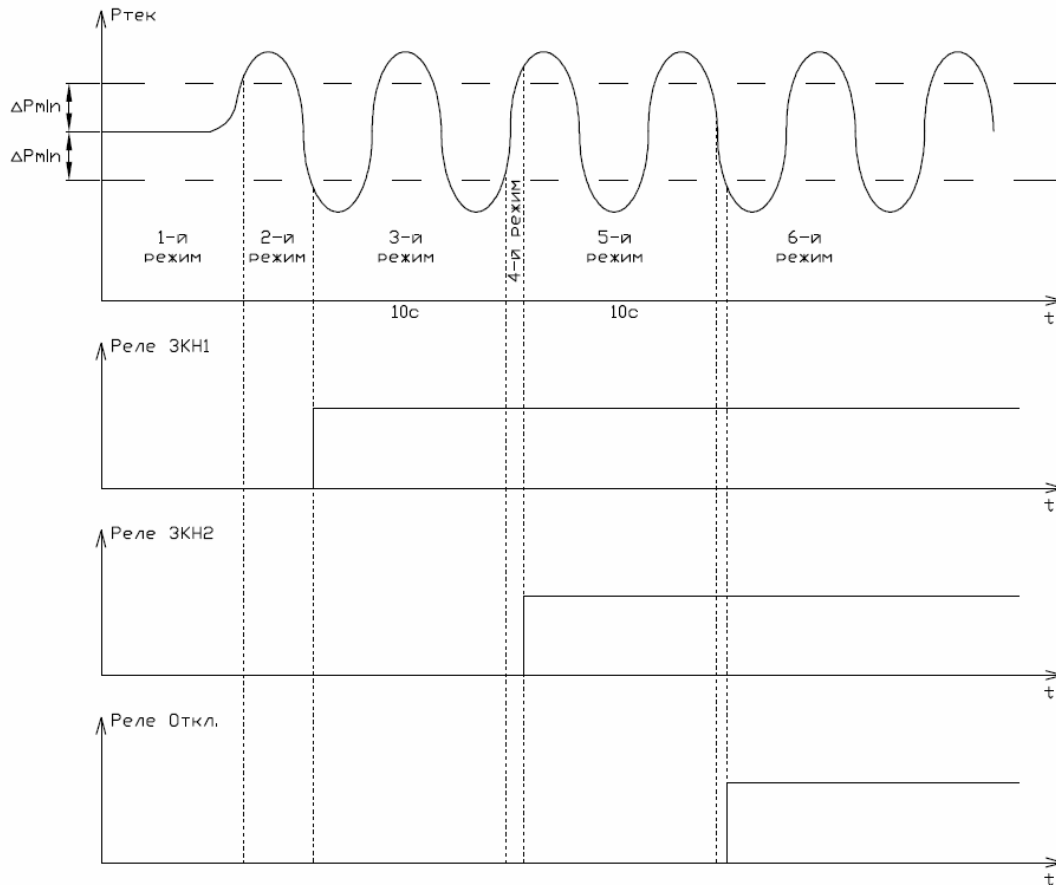


Рисунок 31 – Режимы работы ЗКН

Первый режим соответствует нормальной работе двигателя с постоянной нагрузкой. В нем выявляется первое колебание нагрузки (пуск первой ступени алгоритма ЗКН), которое, возможно, является началом помпажных колебаний. При выявлении колебания, ЗКН переходит во второй режим работы.

Во втором режиме защита либо выявляет наличие колебания нагрузки и формирует команду на срабатывание 1-й ступени ЗКН (срабатывает реле ЗКН 1), либо не выявляет и тогда возвращается к первому режиму.

Если во втором режиме было выявлено колебание нагрузки (произошло срабатывание ЗКН 1), алгоритм переходит в третий режим, когда в течение 10 с защита ожидает окончания переходного процесса после срабатывания ЗКН 1. После истечения 10 с защита переходит в четвертый режим.

В четвертом режиме защита вновь пытается зафиксировать наличие колебания нагрузки и, если оно выявлено, то формирует команду на срабатывание второй ступени защиты (срабатывает реле ЗКН 2). При отсутствии колебаний нагрузки алгоритм защиты переходит в первый режим работы.

Переход в пятый режим работы возникает после срабатывания второй ступени ЗКН (произошло срабатывание реле ЗКН 2). Этот режим аналогичен третьему режиму работы, когда в течение заданного времени алгоритм ожидает завершения переходного процесса в системе. После истечения заданного времени, алгоритм ЗКН переходит в шестой режим работы.

Шестой режим аналогичен четвертому режиму. При выявлении колебания нагрузки, формируется команда на срабатывание 3-й ступени защиты (отключение двигателя), при отсутствии колебаний, алгоритм ЗКН возвращается в первый режим работы.

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

$$A_{\text{кол}} = \frac{\Delta P_{\text{мин}}}{P_{\text{ном.дв}}} \cdot 100, \quad (76)$$

где $\Delta P_{\text{мин}}$ - минимальная амплитуда колебаний мощности синхронного двигателя, кВт;

$P_{\text{ном.дв}}$ - номинальная мощность электродвигателя, кВт.

16 Рекомендации по применению защит

16.1 Рекомендации по применению защит электродвигателей приведены в таблице 7.

Таблица 7. Рекомендации по применению защит

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

Список литературы

- 1 Правила устройства электроустановок. Шестое издание.
- 2 РД 153-34.0-35.301-2002. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения.
- 3 Александров А.М. Выбор уставок срабатывания защит асинхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – СПб: ПЭИПК, 2010
- 4 Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. М.: «Энергия», 1980
- 5 Корогодский В.И., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1987
- 6 Шабад М.А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. Экспериментальная и расчетные проверки, конспект лекций. СПб, ПЭИПК, 2010.
- 7 Шабад М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6 – 35 кВ. СПб, ПЭИПК, 2001.
- 8 Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных двигателей. М.: «Энергия», 1977
- 9 Афанасьев В.В., Адоньев Н.М, Кибель В.М. и др. Трансформаторы тока. Л.: Энергоатомиздат, 1989 г.
- 10 Беляев А.В. Противоаварийное управление в узлах нагрузки с синхронными двигателями большой мощности. – М.: НТФ «Энергопресс», 2004
- 11 Чернобровов Н.В. Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1998
- 12 ГОСТ 183-74. Межгосударственный стандарт. Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия, изд. июль 2001 г. (отменен с 01.07.2010 г)
- 13 Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М. Энергоатомиздат, 1984.
- 14 Соловьёв А.Л. Защита генераторов малой и средней мощности терминалами «Сириус-ГС». М.: НТФ «Энергопресс» 2009 г.
- 15 Вавин В.Н. Релейная защита блоков турбогенератор-трансформатор. М.: Энергоиздат, 1982

УДК 621.316.9:621.313.13

Ключевые слова: релейная защита, электродвигатель, расчет уставок, коэффициент чувствительности защиты

**Генеральный директор
ООО «НТЦ «Механотроника»**

Новиков В.Е.

Генеральный конструктор

Гондуров С.А.

Заведующий кафедрой Релейной
защиты и автоматики электрических
станций,
сетей и систем
Петербургского Энергетического
Института Повышения
Квалификации
К.Т.Н.

Соловьёв А.Л.

Начальник отдела системотехники

Пирогов М.Г.

Ведущий инженер-системотехник

Михалев С.В.

Научное редактирование и нормоконтроль:

Заместитель начальника
управления по качеству

Захаров О.Г.

Лист регистрации изменений

[illegible]