

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

**Расчет уставок**

**Методические указания**

**Санкт-Петербург  
2017**

## Предисловие

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 6–10 кВ.

## Сведения о стандарте

1 **РАЗРАБОТАН** ООО «НТЦ «Механотроника»

**Научно-технический руководитель работы:**

Заведующий кафедрой Релейной защиты и автоматики электрических станций, сетей и энергосистем Петербургского энергетического института повышения квалификации канд. техн. наук СОЛОВЬЁВ А. Л.

**Исполнители:**

Главный специалист  
канд. техн. наук МИХАЛЁВ С. В.  
Ведущий инженер-системотехник  
ИЛЬИНСКИЙ А. С.

2 **УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ** Приказом Генерального директора № 113-ТД от «13» апреля 2017 г.

3 **ВЗАМЕН** СТО ДИВГ-046-2012

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, влечет применение к виновному лицу гражданско-правовой ответственности, а также уголовной ответственности в соответствии со статьей 146 УК РФ и административной ответственности в соответствии со статьей 7.12 КоАП РФ.

## Содержание

1 Область применения .....	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 максимального тока двигателя .....	5
4.3 Требования к трансформаторам тока .....	6
4.4 Погрешности ТТ в переходном режиме .....	8
4.5 Расчет уставок токовой отсечки .....	9
4.6 Особенности выполнения дифференциальной защиты в терминалах БМРЗ-УЗД .....	9
4.7 Способы выполнения дифференциальной защиты электродвигателей .....	10
4.8 Дифференциальная токовая отсечка .....	11
4.9 Дифференциальная защита с торможением .....	11
4.10 Расчет уставок защит электродвигателя с плавным пуском .....	13
5 Примеры расчета уставок защит от междуфазных замыканий .....	15
5.1 ДЗТ с чувствлением для АД.....	15
5.2 ДЗТ с уставкой меньше номинального тока АД.....	18
5.3 ДЗТ с уставкой меньше номинального тока СД.....	21
5.4 ДЗТ с уставкой меньше номинального тока СД с реакторным пуском .....	23
5.5 ДЗТ с током срабатывания больше номинального тока АД с плавным пуском.....	26
6 Защиты от однофазных замыканий на землю .....	29
6.1 Требования ПУЭ к защитам от ОЗЗ .....	29
6.2 Защита от ОЗЗ в терминалах БМРЗ .....	29
6.3 Расчет уставок защиты от ОЗЗ .....	30
6.4 Защита от двойных замыканий на землю.....	34
6.5 Направленная токовая защита от ОЗЗ .....	35
6.6 Неселективная защита от замыканий на землю и алгоритм «селектор направления ОЗЗ» .....	37
6.7 Примеры расчета защит от ОЗЗ.....	38
6.7.1 Токовая защита от замыканий на землю .....	38
6.7.2 Направленная токовая защита от замыканий на землю .....	40
7 Защиты минимального напряжения .....	42
7.1 Требования ПУЭ к ЗМН .....	42
7.2 ЗМН в терминалах БМРЗ .....	43
8 Защита от потери питания .....	43
8.1 Назначение ЗПП .....	43
8.2 Требования ПУЭ к ЗПП .....	44
8.3 Характеристика алгоритмов ЗПП .....	44
8.4 ЗПП в терминалах БМРЗ .....	45
9 Защита электродвигателя от неполнофазных режимов .....	46
9.1 Требования ПУЭ к защите от неполнофазных режимов .....	46
9.2 Защита от неполнофазных режимов в терминалах БМРЗ.....	46

10	Защита электродвигателей от перегрузок .....	47
10.1	Требования ПУЭ к защите от перегрузок.....	47
10.2	Защиты двигателей от перегрузок в терминалах БМРЗ.....	48
10.3	Расчет уставок защиты от симметричных перегрузок.....	49
10.4	Выбор уставок защиты от затянутого пуска.....	51
10.5	Расчет уставок тепловой защиты электродвигателей .....	52
10.6	Примеры расчета защит от перегрузок .....	57
10.6.1	Защита АД от симметричных перегрузок.....	57
10.6.2	Защита АД с помощью тепловой модели .....	59
10.7	Определение постоянных времени тепловой модели .....	61
11	Защиты СД от асинхронного режима.....	63
11.1	Требования ПУЭ к защите СД от асинхронного режима .....	63
11.2	Защита СД от асинхронного режима в терминалах БМРЗ.....	64
11.3	Пример расчета защиты СД от асинхронного режима.....	66
12	Выбор уставок для алгоритма УРОВ.....	67
13	Минимальная токовая защита электродвигателя .....	68
14	Алгоритм «функция опережающего отключения» .....	69
14.1	Назначение алгоритма ФОО .....	69
14.2	Устойчивость узлов нагрузки с СД.....	69
14.3	Алгоритм ФОО в терминалах БМРЗ-ДС .....	75
14.4	Расчет уставок алгоритма ФОО.....	77
15	Защита от колебаний нагрузки.....	78
16	Рекомендации по применению защит.....	79
	Библиография .....	81

---

**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ**  
**ТЕРМИНАЛЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**  
**СИНХРОННЫХ И АСИНХРОННЫХ**  
**ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ 6–10 кВ**  
**Расчет уставок**  
**Методические указания**

---

## **1 Область применения**

Настоящий стандарт распространяется на терминалы релейной защиты синхронных и асинхронных электродвигателей 6–10 кВ производства ООО «НТЦ «Механотроника».

В 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]<sup>1)</sup>, с учетом особенностей построения и функционирования цифровых устройств релейной защиты БМРЗ (далее – терминалов БМРЗ), а также 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;
- 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, 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 надежной работы алгоритмов защит и автоматики электродвигателей необходимо предварительно выполнить расчетную проверку работы трансформаторов тока в диапазоне погрешности, не превышающей 10 % ( $e \leq 10\%$ ) при номинальном токе двигателя.

---

<sup>1)</sup> См. главы 3.2 и 5.3.

Перед вводом уставок терминала БМРЗ необходимо убедиться в том, что трансформаторы тока, применяемые в цепях релейной защиты, удовлетворяют требованиям, изложенным в РД 153-34.0-35.301-2002 [2].

## **2 Нормативные ссылки**

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 7746-2015 Межгосударственный стандарт. Трансформаторы тока. Общие технические условия.

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

ГОСТ 32144-2013 Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

ГОСТ IEC 60034-1-2014 Межгосударственный стандарт. Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики.

## **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;  
БМРЗ – блок микропроцессорный релейной защиты;  
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;  
КМ – контактор;  
кпд – коэффициент полезного действия;  
ЛЗШ – логическая защита шин;  
ЛЭП – линия электропередачи;  
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»;  
ТМ – тепловая модель;

ТН – трансформатор напряжения;  
 ТО – токовая отсечка;  
 ТТ – трансформатор тока;  
 ТТНП – 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;  
 ЭКЦ – электрический центр качаний.

#### **4 Защиты электродвигателей от междуфазных замыканий**

##### **4.1 Требования ПУЭ к защитам от междуфазных замыканий**

4.1.1 Согласно ПУЭ [1] для защиты электродвигателей от междуфазных 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 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 целесообразным 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 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 три или четыре 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 количестве 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 мощностью 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 4.1.7 а), 4.1.7 б) не удовлетворяют 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 максимального тока двигателя

4.2.1 Под максимальным током далее следует подразумевать периодическую составляющую максимально возможного тока двигателя. Влияние аperiodических составляющих будет учитываться соответствующими коэффициентами.

4.2.2 На рисунке 1 приведена типичная пусковая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Она также подходит для синхронного двигателя, так как он пускается в асинхронном режиме.

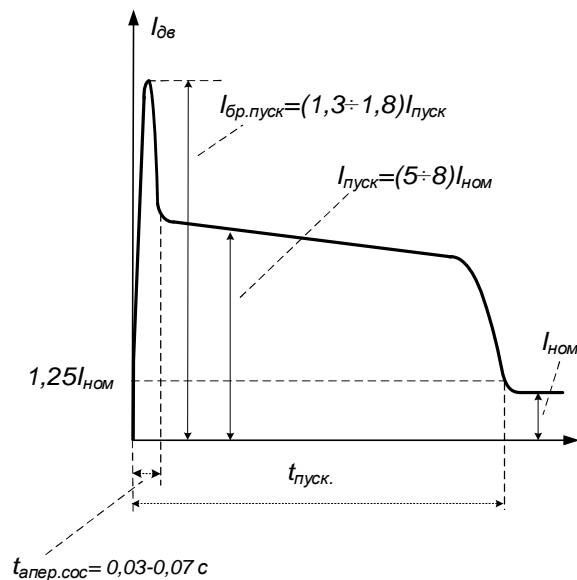


Рисунок 1 – Пусковая характеристика электродвигателя

Пусковая характеристика асинхронных двигателей с фазным ротором определяется сопротивлением, включенным в цепь ротора.

4.2.3 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;

$\eta$  – номинальный коэффициент полезного действия (далее – кпд) электродвигателя;

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

4.2.4 **В случае прямого пуска двигателя** с короткозамкнутым ротором максимальный ток определяют по формуле

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

где  $k_{пуск}$  – кратность пускового тока машины (как правило, от пяти до восьми);

$I_{ном.дв}$  – номинальный ток двигателя.

**4.2.5 В случае реакторного пуска двигателя** определяют полное пусковое индуктивное сопротивление двигателя  $x_d$ , Ом, [3] по формуле

$$x_d = \frac{U_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot I_{макс}}, \quad (3)$$

где  $I_{макс}$  – максимальный ток при прямом пуске, рассчитанный по формуле (2), А;

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

Максимальный ток двигателя  $I_{макс}$ , А, при реакторном пуске определяют по формуле

$$I_{макс} = \frac{U_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot (x_c + x_d + x_p)}, \quad (4)$$

где  $x_c$  – индуктивное сопротивление сети;

$x_p$  – индуктивное сопротивление реактора.

**4.2.6 При участии двигателя в самозапуске** значение тока  $I_{макс}$  необходимо увеличить в 1,4 раза, поскольку напряжение на двигателе после включения резервного питания может превышать номинальное в 1,3–1,4 раза.

**4.2.7** Для синхронного двигателя, не участвующего в самозапуске, максимальным является ток подпитки при внешнем КЗ, равный

$$I_{макс} = 1,1 \cdot k_{пуск} \cdot I_{ном.дв}. \quad (5)$$

### 4.3 Требования к трансформаторам тока

**4.3.1** Для работы релейной защиты применяют обмотки ТТ класса 5Р и 10Р [4], для которых нормируется номинальная предельная кратность (отношение максимального первичного тока к номинальному току)  $K_{ном}$ .

**4.3.2** Максимальная кратность не должна превышать допустимую предельную кратность

$$\frac{I_{макс}}{I_{ТТ ном}} < K_{доп}, \quad (6)$$

где  $I_{макс}$  – максимальный ток (см. 4.2);

$I_{ТТ ном}$  – номинальный первичный ток ТТ, А;

$K_{доп}$  – допустимая предельная кратность ТТ (см. 4.3.5).

Выполнение условия (6) гарантирует погрешность трансформации тока менее 10 (5) % для обмоток ТТ 10Р (5Р) при отсутствии в первичном сигнале апериодических составляющих.

**4.3.3** В случае, если условие формулы (6) не удовлетворяется, необходимо принять одну из следующих мер:

- снизить вторичную нагрузку ТТ (например, за счет применения контрольных кабелей большого сечения);
- выбрать ТТ с бóльшим значением номинальной предельной кратности  $K_{ном}$ .

4.3.4 При невозможности реализации мер по повышению допустимой кратности ТТ необходимо учитывать, что даже при синусоидальных токах ТТ будет насыщаться, что приведет к повышению погрешности. Зависимость полной погрешности от параметра  $A$  приведена на рисунке 2. Параметр  $A$  определяют по формуле

$$A = \frac{I_{\max} / I_{ТТ\ ном}}{K_{доп}}, \quad (7)$$

где обозначения соответствуют 4.3.2.

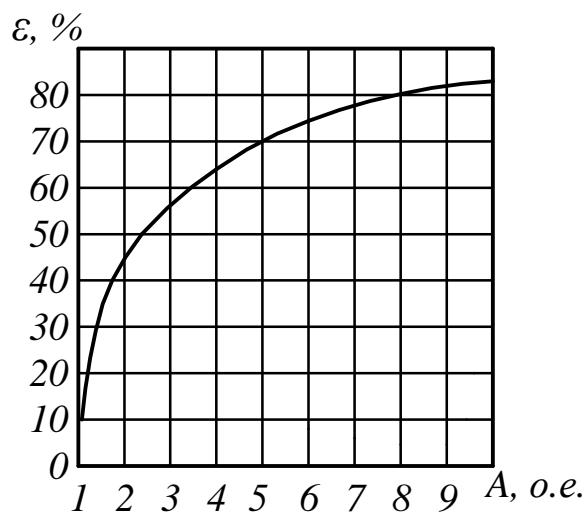


Рисунок 2 – Зависимость погрешности ТТ от превышения первичным током тока предельной допустимой кратности  $e(A)$  [5]

4.3.5 Допустимая предельная кратность  $K_{доп}$  зависит от вторичной нагрузки ТТ. Зависимость допустимой предельной кратности  $K_{доп}$  от нагрузки приводится в руководстве по эксплуатации на ТТ. Нагрузка задается расчетным вторичным сопротивлением  $Z_{2\text{расч}}$  или расчетной вторичной мощностью  $S_{2\text{расч}}$ .

Если расчетная вторичная нагрузка ТТ меньше или равна номинальной нагрузке, то допустимую предельную кратность  $K_{доп}$  можно принять равной  $K_{ном}$ , где  $K_{ном}$  – номинальная предельная кратность вторичных обмоток ТТ для защиты, паспортная величина.

4.3.6 При трехфазной схеме подключения вторичную нагрузку ТТ  $Z_{расч}$ , Ом, рассчитывают по формуле [6]

$$Z_{расч} = R_{каб} + Z_{нагр} + R_{пер}. \quad (8)$$

При двухфазной схеме подключения вторичную нагрузку ТТ  $Z_{расч}$ , Ом, рассчитывают по формуле

$$Z_{расч} = 2R_{каб} + Z_{нагр} + R_{пер}, \quad (9)$$

где  $R_{каб}$  – сопротивление контрольного кабеля от керна ТТ до аналогового входа тока терминала БМРЗ-УЗД, Ом;

$Z_{нагр}$  – суммарное сопротивление нагрузки, подключенной к ТТ, Ом. Сопротивление аналогового входа тока терминала БМРЗ-УЗД 0,016 Ом;

$R_{пер}$  – переходное сопротивление принимают равным 0,1 Ом.

4.3.7 Сопротивление контрольных кабелей рассчитывают по формуле

$$R_{каб} = \frac{r \cdot L}{S}, \quad (10)$$

где  $r$  – удельное сопротивление контрольного кабеля. Для алюминиевых кабелей принимают 0,0306 Ом·мм<sup>2</sup>/м, для медных – 0,0186 Ом·мм<sup>2</sup>/м с учетом приведения к максимальной рабочей температуре 40 °С;

$L$  – длина контрольного кабеля, м;

$S$  – поперечное сечение контрольного кабеля, мм<sup>2</sup>.

4.3.8 В случае, если задана зависимость допустимой предельной кратности от мощности вторичной нагрузки при известном сопротивлении  $Z_{расч}$ , вторичную нагрузку  $S_{расч}$ , В·А, рассчитывают по формуле

$$S_{расч} = I_{2ном}^2 \cdot Z_{расч}, \quad (11)$$

где  $Z_{расч}$  – расчетная вторичная нагрузка, Ом;

$I_{2ном}$  – номинальный вторичный ток, принимается равным 1 или 5 А.

4.3.9 Рекомендуется использовать одностипные ТТ со стороны нейтрали и вводов питания. При разной длине кабелей токовых цепей рекомендуется выравнивать вторичное сопротивление ТТ со стороны нейтрали и вводов питания за счет применения кабелей разного сечения.

#### 4.4 Погрешности ТТ в переходном режиме

4.4.1 Выбор ТТ в соответствии с 4.3 обеспечивает правильную работу дифференциальной защиты в установившихся аварийных режимах и установившемся режиме пуска, когда в токе отсутствует апериодическая составляющая.

Погрешность ТТ при наличии апериодической составляющей значительно больше 10 % (5 %) при токах значительно меньших тока допустимой предельной кратности.

4.4.2 Процесс пуска двигателя характеризуется апериодической составляющей с большим значением постоянной времени, что приводит к насыщению ТТ и повышенным (до 70 % – 90 %) погрешностям, даже, если ТТ выбран в соответствии со стандартными методиками. Правильная работа

дифференциальной защиты при насыщении ТТ обеспечивается за счет применения торможения и контролирования дополнительных величин, характерных для режима насыщения.

#### 4.5 Расчет уставок токовой отсечки

4.5.1 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.

4.5.2 Отстройку ТО выполняют от максимально возможного тока при пуске (самопуске) двигателя или при подпитке внешнего КЗ.

4.5.3 Ток срабатывания ТО  $I_{ТО\ c.з.}$ , А, вычисляют по формуле

$$I_{ТО\ c.з.} = k_{омс} \cdot k_a \cdot I_{макс} , \quad (12)$$

где  $k_{омс}$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас, принимается от 1,1 до 1,2;

$k_a$  – коэффициент, учитывающий увеличение погрешности терминала при наличии в токе апериодической и других составляющих пускового режима двигателя, принимается равным 1,3;

$I_{макс}$  – максимальный ток, рассчитанный согласно 4.2.

В терминалах БМРЗ ДИВГ.648228.070(071) уставка обозначается как  $I \gg \gg$ .

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

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{кз}^{(3)} , \quad (13)$$

$$k_q^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{ТО\ c.з.}} , \quad (14)$$

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

Защита от междуфазных КЗ работает без выдержки времени.

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

#### 4.6 Особенности выполнения дифференциальной защиты в терминалах БМРЗ-УЗД

4.6.1 Расчеты уставок дифференциальной токовой защиты выполняют в абсолютных значениях (амперах). Ввод уставок в терминал БМРЗ также производится в амперах.

#### 4.6.2 Подключение ТТ к терминалу БМРЗ:

– для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) подключение необходимо осуществлять по схеме "звезда", независимо от схемы соединения обмоток двигателя;

– для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.070(071), если обмотки двигателя соединены в "звезду", подключение необходимо осуществлять по схеме "звезда", если обмотки двигателя соединены в "треугольник", то ТТ на выводах также надо соединять по схеме "треугольник", причем так, чтобы компенсировать фазовый сдвиг.

Подключение ТТ должно обеспечивать нулевой фазовый сдвиг (с учетом погрешности ТТ) между токами сторон при нормальной работе двигателя, так как дифференциальный ток рассчитывается как разность токов сторон.

4.6.3 В терминале БМРЗ-УЗД токи сторон вычитаются и взаимно компенсируют друг друга, таким образом, дифференциальный ток в идеальном случае должен быть равен нулю.

На практике, даже при отсутствии замыканий в двигателе, всегда есть некоторое значение дифференциального тока – тока небаланса, вызванного погрешностями ТТ и измерительного тракта релейной защиты. Ток небаланса тем больше, чем больше значения токов сторон двигателя.

4.6.4 В терминалах БМРЗ-УЗД выполнено цифровое выравнивание токов сторон. В терминалах БМРЗ ДИВГ.648228.070(071) с помощью уставки "К<sub>п</sub>" – коэффициент приведения токов, в терминалах БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) — с помощью задания коэффициентов трансформации ТТ.

### 4.7 Способы выполнения дифференциальной защиты электродвигателей

4.7.1 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 междупазных 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 неисправности одного из трансформаторов тока дифференциальной защиты электродвигателя.

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

4.7.3 Основным элементом дифференциальной защиты – дифференциальная защита с торможением (ДЗТ).

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

#### 4.8 Дифференциальная токовая отсечка

4.8.1 Уставку срабатывания ДТО выбирают так, чтобы обеспечить отстройку от расчетного максимального тока небаланса в переходном процессе. Погрешность ТТ с учетом насыщения апериодической составляющей может достигать 90 %.

4.8.2 Для отстройки от расчетного максимального тока небаланса значение уставки  $I_{ДТО}$ , А, определяют по формуле

$$I_{ДТО} = k_{отс} \cdot e_{пер} \cdot I_{макс} \quad (15)$$

где  $k_{отс}$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас, принимается равным 1,5;

$e_{пер}$  – относительная полная погрешность ТТ в переходном режиме. ДТО выполняется без блокировок и загробления в переходном режиме, поэтому  $e_{пер}$  принимается равной от 0,7 до 0,9;

$I_{макс}$  – ток, рассчитанный согласно 4.2.

#### 4.9 Дифференциальная защита с торможением

4.9.1 Уставку начального тока срабатывания ДЗТ выбирают из диапазона, А

$$I_{ДЗТ\ нач} \text{ от } 0,3 \cdot I_{ном.дв} \text{ до } 1,2 \cdot I_{ном.дв} \quad (16)$$

в зависимости от рекомендаций, изложенных в 4.7.

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

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

4.9.2 Для отстройки от повышенных погрешностей ТТ при насыщении апериодической составляющей в терминалах БМРЗ ДИВГ.648228.070(071) необходимо коэффициент торможения выставить не менее "1".

В терминалах БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) осуществляется анализ гармонического состава дифференциального тока. При апериодическом насыщении дифференциальный ток содержит большое количество четных гармоник и постоянную составляющую. По относительному содержанию второй гармонической составляющей в дифференциальном токе дифференциальная защита блокируется. Если во время действия блокировки возникает внутреннее повреждение – блокировка автоматически снимается.

В этом случае возможно повысить чувствительность защиты, снизив коэффициент торможения до значения, определяемого по формуле

$$k_{\text{торм}} = k_n \cdot (k_{\text{пер}} \cdot e_{\text{макс}} + 2g + d), \quad (17)$$

где  $k_n$  – коэффициент надежности, принимается равным 1,1–1,2;

$k_{\text{пер}}$  – коэффициент, учитывающий снижение тормозного тока при внешнем КЗ из-за насыщения периодической составляющей, принимается равным 2,5;

$e_{\text{макс}}$  – относительная полная погрешность ТТ при токе торможения, равном  $I_{\text{макс}}$ , см. 4.3.4, 4.3.5;

$g$  – относительная погрешность аналогового входа терминала БМРЗ, принимается равной 0,025;

$d$  – технологический запас, принимается равным 0,025.

4.9.3 Уставку по относительному содержанию второй гармонической составляющей в дифференциальном токе рекомендуется выбирать из диапазона от 0,15 до 0,20.

4.9.4 В терминале БМРЗ-УЗД предусмотрен алгоритм ДЗТ с очувствлением<sup>1)</sup> (рисунок 3). 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.

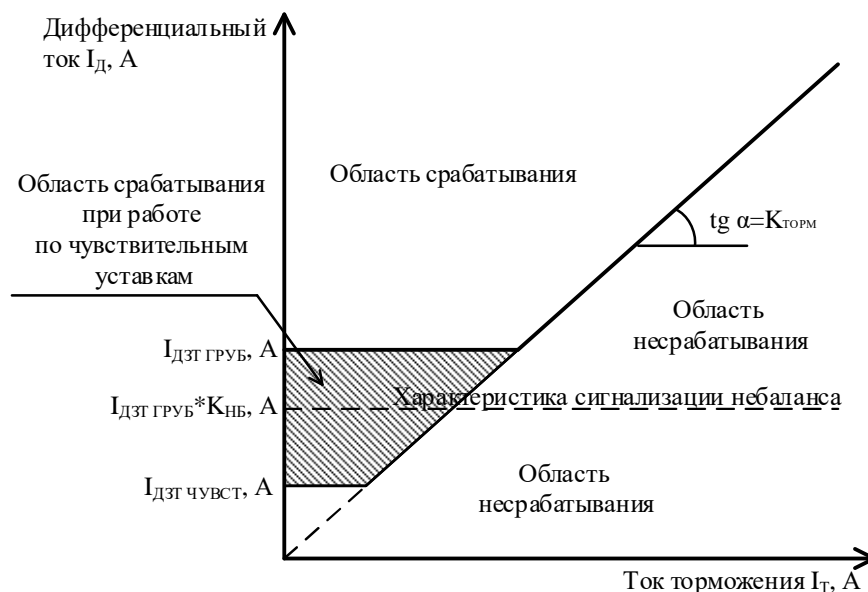


Рисунок 3 – Характеристики ДЗТ с очувствлением

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  $I_{\text{ДЗТ ГРУБ}}$ .

<sup>1)</sup> Авторы алгоритма Михалёв С. В., Пирогов М. Г.

4.9.5 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 ТТ.

4.9.6 В терминалах БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) реализована дифференциальная защита по мгновенным значениям с детектором насыщения. Защита анализирует мгновенные значения дифференциального и тормозного токов на каждом отсчете.

При резком увеличении тормозного тока (КЗ, пуск, самозапуск) ожидается появление дифференциального тока. Так как насыщение ТТ не может произойти мгновенно в случае внешнего КЗ (пуска, самозапуска), с насыщением ТТ дифференциальный ток появится спустя несколько миллисекунд. Для корректной работы необходимо, чтобы время до насыщения ТТ было не менее 4 мс.

При внутреннем КЗ увеличение тормозного и дифференциального токов происходит одновременно.

4.9.7 Дополнительно к уставкам, рассчитанным выше, для корректной работы детектора насыщения необходимо ввести номинальный вторичный ток двигателя (для перевода всех токов в относительные единицы).

4.9.8 Для проверки дифференциальной защиты по мгновенным значениям и блокировки при внешнем КЗ при пусконаладочных работах необходимо с помощью проверочного устройства смоделировать пусковой режим (если обмотки двигателя собраны в звезду проверку можно проводить по-фазно):

- токи со стороны выводов и со стороны нейтрали более или равны одному номиналу;
- разность фаз равна нулю.

Далее, не позднее, чем через 0,5 с, изменить фазу одного из токов на 180 градусов.

В момент возникновения пускового режима появится сигнал (например, для фазы А) "КЗфА внеш./ пуск дв.". После изменения фазы тока, не позднее, чем через 45 мс, должны возникнуть сигналы "Сброс блок. А", "ДЗТ сраб."

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

4.9.10 Коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя  $k_{\text{ч}}^{(2)}$ , определяют по формуле

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{кз}}^{(2)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{кз}}^{(3)}}{I_{\text{ДЗТ}}}. \quad (18)$$

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

#### **4.10 Расчет уставок защит электродвигателя с плавным пуском**

4.10.1 Данный 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!**

4.10.2 При использовании для запуска двигателя устройства плавного пуска (УПП) (рисунок 4) рекомендуется применение в качестве защит от междуфазных замыканий:

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

4.10.3 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).

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

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

4.10.6 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.

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

$$I_{ДТО} = 1,1 \cdot k_{УПП} \cdot I_{ном.дв} \quad (19)$$

где  $k_{УПП}$  – предельная кратность пускового тока, задаваемая при настройке УПП (как правило, от трех до четырех).

4.10.6.2 Применение ДЗТ в ячейке питания УПП нецелесообразно.

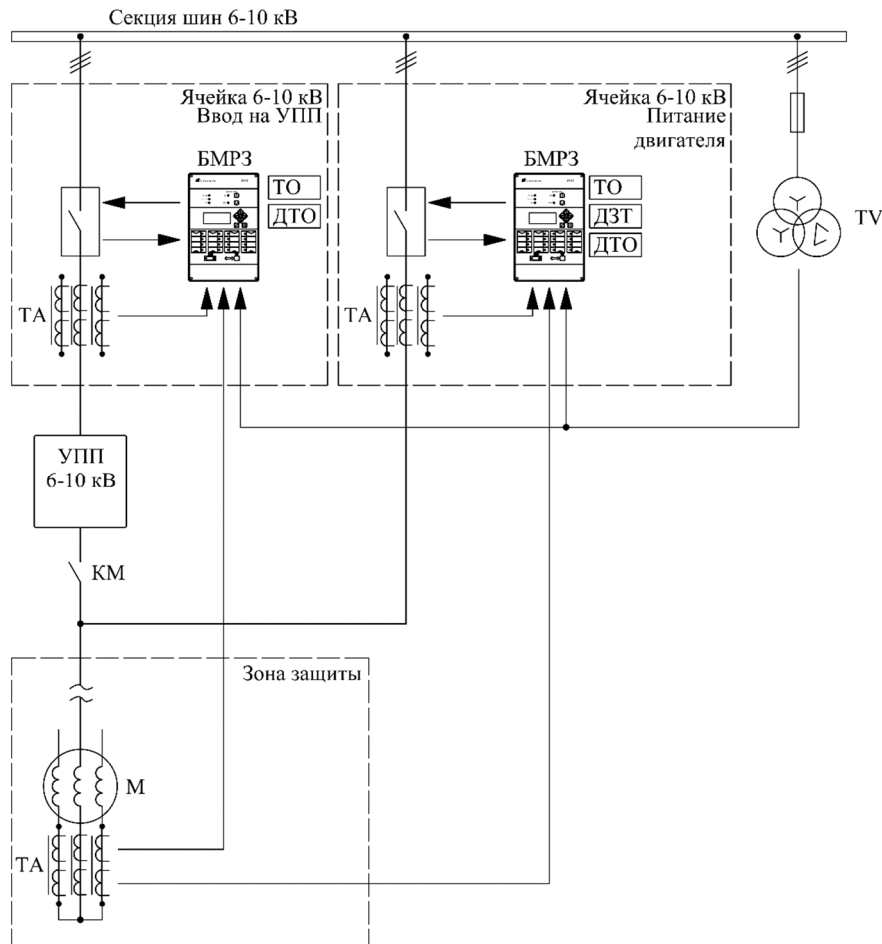


Рисунок 4 – Схема защиты двигателя с плавным пуском от междуфазных КЗ

## 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,  $\cos j$  ..... 0,89  
 напряжение,  $U_{ном.дв}$  ..... 6 кВ  
 кпд,  $h$  ..... 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 По формуле (1) определяют значение номинального тока электродвигателя  $I_{ном.дв}$

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

Выбирают для стороны питания электродвигателя ТТ ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р и коэффициентом трансформации  $k_{TP} = 150/5$ .

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 [5]<sup>1)</sup>.

5.1.3 Максимальный ток электродвигателя  $I_{\text{макс}}$ , участвующего в процессе самозапуска, определяют по формуле (2) с учетом изложенного в 4.2.6

$$I_{\text{макс}} = 1,4 \cdot k_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{номдв}} = 1,4 \cdot 5,7 \cdot 113,2 \approx 903 \text{ А.}$$

5.1.4 Ток срабатывания ТО  $I_{\text{ТО}} \gg \gg$  согласно 4.5.3 равен  $1,2 \cdot 1,3 \cdot 903 = 1409 \text{ А}$ .

5.1.5 Так как ТТ при токе двигателя  $1,1 \cdot I_{\text{ТО}} \gg \gg = 1550 \text{ А}$  обеспечивают погрешность не более 10 %, они пригодны для применения в цепях ТО.

5.1.6 Значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя  $I_{\text{кз}}^{(2)}$  и коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ  $k_{\text{ч}}^{(2)}$  определяют по формулам (13), (14)

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

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{кз}}^{(2)}}{I_{\text{ТО}}} = \frac{3031}{1409} \approx 2,15.$$

5.1.7 Выдержку времени защиты устанавливают нулевую.

5.1.8 Независимо от того, что коэффициент чувствительности токовой отсечки больше двух, для примера рассчитывают уставки дифференциальной защиты.

5.1.9 Для этой защиты используют со стороны нейтрали электродвигателя такие же трансформаторы тока ТЛМ10-5-82, которые были выбраны ранее для стороны питания. Погрешность ТТ ТЛМ10-5-82 не превышает 10 % при кратности тока до 12 (до 1800 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом [5].

В связи с тем, что погрешность выбранных ТТ не превышает 10 %, они удовлетворяют требованиям [1]<sup>2)</sup>, предъявляемым к ним при использовании в цепях дифференциальной защиты.

5.1.10 По типовой кривой намагничивания для электротехнической стали определяют полные относительные погрешности ТТ (см. рисунок 2), установленных со стороны нейтрали электродвигателя:

$e_{\text{макс}} = 0,1$  – в режиме, соответствующем максимальному току (см. 4.2.1);

$e_{\text{ном}} = 0,1$  – при номинальном токе электродвигателя.

5.1.11 По формуле (15) находят значение уставки ДТО

$$I_{\text{ДТО}} = k_{\text{отс}} \cdot e_{\text{пер}} \cdot I_{\text{макс}} = 1,5 \cdot 0,8 \cdot 903 = 1084 \text{ А.}$$

5.1.12 По формуле (16) и условию расчета принимают значение уставки по току  $I_{\text{ДЗГ нач.}}$  равным

1) См. рисунок П2-6.

2) См. главу 3.2 (3.2.29).

$$I_{ДЗТ\ нач.} = 1,2 \cdot I_{ном.дв.} = 1,2 \cdot 113 = 136 \text{ А.}$$

5.1.13 Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.070(071) принимают коэффициент торможения  $k_{торм}$  равным "1".

Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) находят  $k_{торм}$  по формуле (17)

$$k_{торм} = k_n \cdot (k_{пер} \cdot e_{макс} + 2g + d) = 1,1 \cdot (2,5 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,025 + 0,025) = 0,36.$$

5.1.14 Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) значение уставки  $I_{диф2z}$  по относительному содержанию второй гармонической составляющей в дифференциальном токе принимают равным 0,15.

Значение уставки  $I_{диф2z}$  может быть уточнено по опытным данным.

5.1.15 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимают равными нулю.

5.1.16 Для проверки чувствительности ДЗТ по формуле (18) определяют коэффициент чувствительности защиты  $k_{ч}^{(2)}$  при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя

$$k_{ч}^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{ДЗТ}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{кз}^{(3)}}{I_{ДЗТ}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{3500}{136} \approx 22,3.$$

Поскольку коэффициент чувствительности больше двух, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

5.1.17 По результатам выполненных расчетов строят характеристику работы защиты для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) (рисунок 5) и терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.070(071) (рисунок 6).

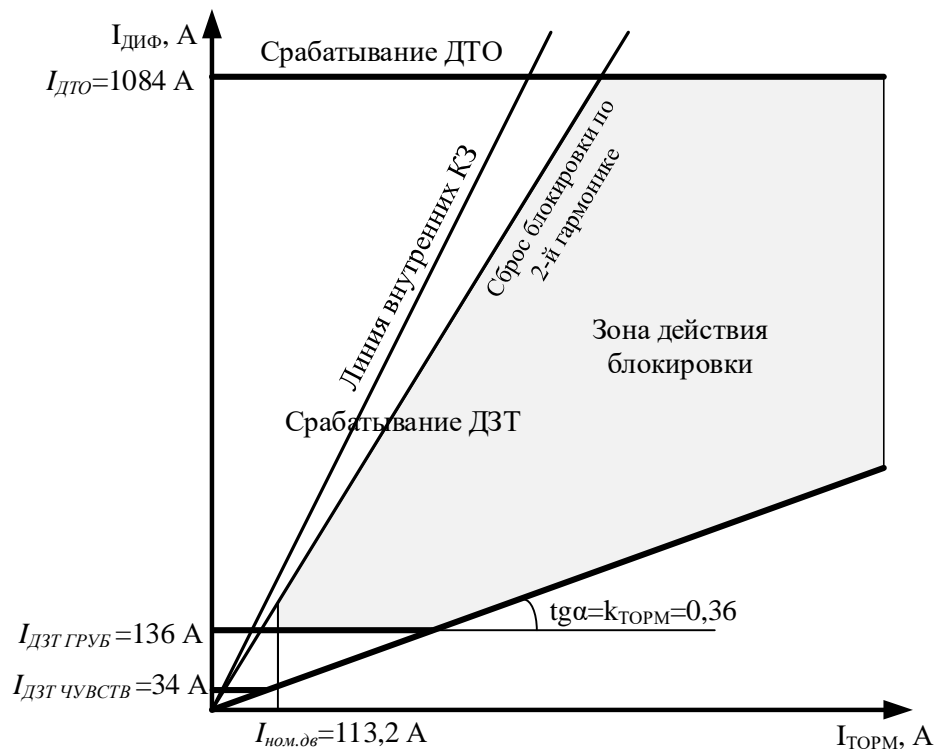


Рисунок 5 – Расчетная характеристика дифференциальной защиты для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.080(081)

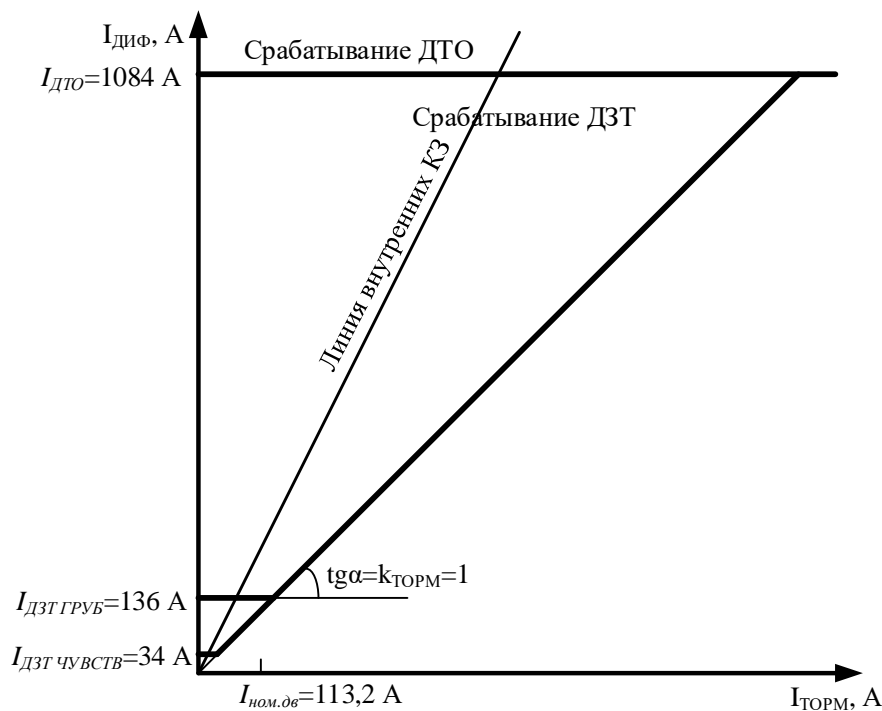


Рисунок 6 – Расчетная характеристика дифференциальной защиты для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.070(071)

5.1.18 При использовании для защиты двигателя терминала БМРЗ-УЗД, для повышения чувствительности защиты и исключения излишнего ее срабатывания при неисправности токовых цепей возможно использовать алгоритм очувствления ДЗТ.

5.1.18.1 В качестве уставки  $I_{ДЗТ ГРУБ}$  используют вычисленное в 5.1.12 значение  $I_{ДЗТ нач.} \approx 136 \text{ А}$ .

5.1.18.2 Выбирают уставку  $I_{ДЗТ ЧУВСТ}$  меньше номинального тока двигателя

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

## 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,  $\cos j$  .....0,9

напряжение,  $U_{ном.дв}$  .....6 кВ

кпд,  $h$  .....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) определяют значение номинального тока электродвигателя  $I_{ном.дв}$

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

Для стороны питания электродвигателя выбирают 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 % [5]<sup>1)</sup>.

5.2.3 Максимальный ток электродвигателя  $I_{макс}$  определяют по формуле (2)

$$I_{макс} = k_{пуск} \cdot I_{ном.дв} = 7 \cdot 222,5 \approx 1558 \text{ А.}$$

5.2.4 Ток срабатывания ТО  $I_{>>>}$  согласно 4.5.3 равен  $1,2 \cdot 1,3 \cdot 1558 = 2430 \text{ А}$ .

5.2.5 Так как трансформаторы тока при токе двигателя  $1,1 \cdot I_{>>>} = 2673 \text{ А}$  обеспечивают погрешность не более 10 %, они пригодны для применения в цепях токовой отсечки.

5.2.6 Значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя  $I_{кз}^{(2)}$  и коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ  $k_{ч}^{(2)}$  определяют по формулам (13), (14)

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

$$k_{ч}^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{>>>}} = \frac{4330}{2430} \approx 1,78.$$

5.2.7 Выдержку времени защиты устанавливают нулевую.

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

5.2.9 Для установки со стороны нейтрали электродвигателя выбирают 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 % [5]<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> См. рисунок П2-6.

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

5.2.10 Полные относительные погрешности ТТ, установленных со стороны нейтрали электродвигателя, находят по типовой кривой намагничивания для электротехнической стали (см. рисунок 2):

$e_{\text{макс}} = 0,1$  – в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учетом апериодической составляющей;

$e_{\text{ном}} = 0,1$  – при номинальном токе электродвигателя.

5.2.11 По формуле (15) находят значение уставки дифференциальной токовой отсечки

$$I_{\text{ДТО}} = k_{\text{отс}} \cdot e_{\text{пер}} \cdot I_{\text{макс}} = 1,5 \cdot 0,8 \cdot 1556 = 1869 \text{ А.}$$

5.2.12 По формуле (16) и условию расчета принимают значение уставки по току  $I_{\text{ДЗТ нач.}}$  равным

$$I_{\text{ДЗТ нач.}} = 0,3 \cdot I_{\text{ном.дв.}} = 0,3 \cdot 222,5 = 67 \text{ А.}$$

5.2.13 Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.070(071) принимают коэффициент торможения  $k_{\text{торм}}$  равным "1".

Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) находят  $k_{\text{торм}}$  по формуле (17)

$$k_{\text{торм}} = k_{\text{н}} \cdot (k_{\text{пер}} \cdot e_{\text{макс}} + 2g + d) = 1,1 \cdot (2,5 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,025 + 0,025) = 0,36.$$

5.2.14 Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) значение уставки  $I_{\text{диф2z}}$  по относительному содержанию второй гармонической составляющей в дифференциальном токе принимают равным 0,15.

Значение уставки  $I_{\text{диф2z}}$  может быть уточнено по опытным данным.

5.2.15 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимают равными нулю.

5.2.16 Для проверки ДЗТ определяют по формуле (18) коэффициент чувствительности защиты  $k_{\text{ч}}^{(2)}$  при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{кз}}^{(2)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{кз}}^{(3)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{5000}{67} \approx 65.$$

<sup>1)</sup> См. главу 3.2 (3.2.29).

Поскольку коэффициент чувствительности больше двух, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

### 5.3 ДЗТ с уставкой меньше номинального тока СД

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

СД соответствует требованиям [7].

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 терминал БМРЗ-УЗД.

#### **Исходные данные для расчета:**

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{ном.дв}$ .....	6300 кВт
коэффициент мощности, $\cos j$ [7] .....	0,9
напряжение, $U_{ном.дв}$ .....	10 кВ
кпд, $h$ .....	0,964
кратность пускового тока, $k_{пуск}$ .....	6
значение тока трехфазного КЗ на вводах питания СД, $I_{ш}^{(3)}$ ....	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.

Выполняют расчет ТО для применения ее в качестве резервной защиты.

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

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

Для установки со стороны питания электродвигателя выбирают 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 % [5]<sup>1)</sup>.

5.3.4 Максимальный ток электродвигателя  $I_{макс}$  определяют по формуле (5)

$$I_{макс} = 1,1 \cdot k_{пуск} \cdot I_{ном.дв} = 1,1 \cdot 6 \cdot 419,2 \approx 2767 \text{ А.}$$

5.3.5 Ток срабатывания ТО  $I \gg \gg$  согласно 4.5.3 равен  $1,2 \cdot 1,3 \cdot 2767 = 4317 \text{ А.}$

<sup>1)</sup> См. рисунок П2-6.

5.3.6 Так как трансформаторы тока при токе двигателя  $1,1 \cdot I \gg \gg = 4749$  А обеспечивают погрешность не более 10 %, они пригодны для применения в цепях токовой отсечки.

5.3.7 Значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя  $I_{кз}^{(2)}$  и коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ  $k_q^{(2)}$  определяют по формулам (13), (14)

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

$$k_q^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I \gg \gg} = \frac{8660}{4317} \approx 2,0.$$

5.3.8 Выдержку времени защиты устанавливают нулевую.

5.3.9 Для установки со стороны нейтрали электродвигателя применить 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 % [5]<sup>1)</sup>, следовательно, ТТ этого типа удовлетворяют требованиям ПУЭ [1]<sup>2)</sup> по установке в цепях дифференциальной защиты.

5.3.10 Полные относительные погрешности ТТ (см. рисунок 2), установленных со стороны нейтрали электродвигателя, определяют по типовой кривой намагничивания для электротехнической стали:

$e_{\text{макс}} = 0,1$  – в режиме, соответствующем подпитке внешнего КЗ;

$e_{\text{ном}} = 0,1$  – при номинальном токе электродвигателя.

5.3.11 По формуле (15) определяют значение уставки дифференциальной токовой отсечки

$$I_{\text{ДТО}} = k_{\text{отс}} \cdot e_{\text{пер}} \cdot I_{\text{макс}} = 1,5 \cdot 0,8 \cdot 2767 = 3320 \text{ А}.$$

5.3.12 По формуле (16) и условию расчета принимают значение уставки по току  $I_{\text{ДЗТ нач.}}$  равным

$$I_{\text{ДЗТ нач.}} = 0,3 \cdot I_{\text{ном.дв.}} = 0,3 \cdot 419 = 126 \text{ А}.$$

5.3.13 Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.070(071) принимают коэффициент торможения  $k_{\text{торм}}$  равным "1".

Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) определяют  $k_{\text{торм}}$  по формуле (17)

$$k_{\text{торм}} = k_n \cdot (k_{\text{пер}} \cdot e_{\text{макс}} + 2g + d) = 1,1 \cdot (2,5 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,025 + 0,025) = 0,36.$$

5.3.14 Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) значение уставки  $I_{\text{диф}2г}$  по относительному содержанию второй гармонической составляющей в дифференциальном токе принимают равным 0,15.

1) См. рисунок П2-6.

2) См. главу 3.2 (3.2.29).

Значение уставки  $I_{\text{диф}2z}$  может быть уточнено по опытным данным.

5.3.15 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимают равными нулю.

5.3.16 Для проверки ДЗТ определяют по формуле (18) коэффициент чувствительности защиты  $k_{\text{ч}}^{(2)}$  при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{кз}}^{(2)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{кз}}^{(3)}}{I_{\text{ДЗТ}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{10000}{126} \approx 69.$$

Поскольку коэффициент чувствительности больше двух, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

#### 5.4 ДЗТ с уставкой меньше номинального тока СД с реакторным пуском

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

СД соответствует требованиям [7].

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,  $\cos j$  [7] ..... 0,9

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

кпд,  $h$  ..... 0,972

кратность пускового тока,  $k_{\text{пуск}}$  ..... 6,63

значение тока трехфазного КЗ на вводах питания СД,  $I_{\text{ш}}^{(3)}$  .... 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) определяют значение номинального тока электродвигателя  $I_{\text{ном.дв}}$

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

Для установки со стороны питания электродвигателя выбирают ТТ типа ТЛМ10-5-82 с коэффициентом трансформации  $k_{TP} = 300/5$  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 % [5]<sup>1)</sup>.

5.4.3 Максимальный ток электродвигателя  $I_{\max}$  определяют по формуле (5)

$$I_{\max} = 1,1 \cdot k_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{ном.дв}} = 1,1 \cdot 6,63 \cdot 211 \approx 1540 \text{ А.}$$

5.4.4 Полное пусковое индуктивное сопротивление двигателя  $x_d$  определяют по формуле (3)

$$x_d = \frac{U_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\max}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 2518} = 3,75 \text{ Ом.}$$

5.4.5 Вычисляют индуктивное сопротивление сети  $x_c$ , необходимое для определения максимального броска пускового тока

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

5.4.6 Подставив найденные значения в формулу (4), вычисляют максимальный ток электродвигателя при реакторном пуске  $I'_{\max}$

$$I'_{\max} = \frac{U_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} \cdot (x_c + x_d + x_p)} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot (3,4 + 3,75 + 0,35)} \approx 770 \text{ А.}$$

5.4.7 Ток срабатывания ТО  $I \gg \gg$  согласно 4.5.3 равен  $1,2 \cdot 1,3 \cdot 770 = 1201 \text{ А.}$

5.4.8 Так как трансформаторы тока при токе двигателя  $1,1 \cdot I \gg \gg = 1321 \text{ А}$  обеспечивают погрешность не более 10 %, они пригодны для применения в цепях токовой отсечки.

5.4.9 Значение тока двухфазного КЗ на вводах питания электродвигателя  $I_{\text{кз}}^{(2)}$  и коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ  $k_{\text{ч}}^{(2)}$  определяют по формулам (13), (14)

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

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{кз}}^{(2)}}{I \gg \gg} = \frac{1472}{1201} \approx 1,23.$$

5.4.10 Выдержку времени защиты устанавливают нулевую.

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

<sup>1)</sup> См. рисунок П2-6.

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

Трансформаторы тока ТЛМ10-5-82 удовлетворяют требованиям ПУЭ [1]<sup>1)</sup> 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 % [5]<sup>2)</sup>.

5.4.13 Полные относительные погрешности ТТ (см. рисунок 2), установленных со стороны нейтрали электродвигателя, определяют по типовой кривой намагничивания для электротехнической стали:

$e_{\text{макс}} = 0,1$  – в режиме, соответствующем подпитке внешнего КЗ;

$e_{\text{ном}} = 0,1$  – при номинальном токе электродвигателя.

5.4.14 По формуле (15) определяют значение уставки дифференциальной токовой отсечки

$$I_{\text{ДТО}} = k_{\text{отс}} \cdot e_{\text{пер}} \cdot I_{\text{макс}} = 1,5 \cdot 0,8 \cdot 1540 = 1848 \text{ А.}$$

5.4.15 По формуле (16) и условию расчета принимают значение уставки по току  $I_{\text{ДЗТ нач.}}$  равным

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

5.4.16 Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.070(071) принимают коэффициент торможения  $k_{\text{торм}}$  равным "1".

Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) определяют  $k_{\text{торм}}$  по формуле (17)

$$k_{\text{торм}} = k_n \cdot (k_{\text{пер}} \cdot e_{\text{макс}} + 2g + d) = 1,1 \cdot (2,5 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,025 + 0,025) = 0,36.$$

5.4.17 Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) значение уставки  $I_{\text{диф}2\text{z}}$  по относительному содержанию второй гармонической составляющей в дифференциальном токе принимают равным 0,15.

Значение уставки  $I_{\text{диф}2\text{z}}$  может быть уточнено по опытным данным.

5.4.18 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимают равными нулю.

5.4.19 Для проверки ДЗТ определяют по формуле (18) коэффициент чувствительности защиты  $k_{\text{ч}}^{(2)}$  при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя

<sup>1)</sup> См. главу 3.2 (3.2.29).

<sup>2)</sup> См. рисунок П2-6.

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

Поскольку коэффициент чувствительности больше двух, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

### 5.5 ДЗТ с током срабатывания больше номинального тока АД с плавным пуском

5.5.1 Требуется определить параметры защиты от междуфазных замыканий асинхронного электродвигателя АД0-3150-6000.

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

Двигатель участвует в самозапуске (в том числе и после переключения на питание от сети).

#### Исходные данные для расчета:

номинальная мощность на валу двигателя, $P_{\text{ном.дв}}$ .....	3150 кВт
коэффициент мощности, $\cos j$ .....	0,83
напряжение, $U_{\text{ном.дв}}$ .....	6 кВ
кпд, $h$ .....	0,968
кратность пускового тока, $k_{\text{пуск}}$ .....	5,5
значение тока трехфазного КЗ на вводах питания АД, $I_{\text{ш}}^{(3)}$ .....	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

5.5.2 Выбирают схему защиты двигателя в соответствии с рисунком 4.

#### 5.5.3 Расчет уставок защит ячейки питания двигателя от сети

5.5.3.1 По формуле (1) определяют значение номинального тока электродвигателя  $I_{\text{ном.дв}}$

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

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

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

5.5.3.2 Максимальный ток электродвигателя  $I_{\text{макс}}$ , участвующего в процессе самозапуска, определяют по формуле (2) с учетом изложенного в 4.2.6

<sup>1)</sup> См. рисунок П2-6.

$$I_{\text{макс}} = 1,4 \cdot k_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{ном.дв}} = 1,4 \cdot 5,5 \cdot 377 \approx 2905 \text{ А.}$$

5.5.3.3 Ток срабатывания ТО  $I \gg \gg$  согласно 4.5.3 равен  $1,2 \cdot 1,3 \cdot 2905 = 4532 \text{ А.}$

5.5.3.4 Выбранные ТТ пригодны для применения в цепях токовой отсечки, так как при токе  $1,1 \cdot I \gg \gg = 4985 \text{ А}$  их погрешность не превышает 10 %.

5.5.3.5 Значение тока двухфазного КЗ на вводах питания УПП  $I_{\text{кз}}^{(2)}$  и коэффициента чувствительности защиты при двухфазном КЗ  $k_{\text{ч}}^{(2)}$  определяют по формулам (13), (14)

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

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{кз}}^{(2)}}{I \gg \gg} = \frac{6928}{4532} \approx 1,53.$$

5.5.3.6 Выдержку времени защиты устанавливают равной нулю.

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

5.5.3.8 Для установки со стороны нейтрали выбирают 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 % [5]<sup>1)</sup>.

5.5.3.9 Полные относительные погрешности ТТ (см. рисунок 2), установленных со стороны нейтрали электродвигателя, определяют по типовой кривой намагничивания для электротехнической стали:

$e_{\text{макс}} = 0,1$  – в режиме, соответствующем самозапуску двигателя;

$e_{\text{ном}} = 0,1$  – при номинальном токе электродвигателя.

5.5.3.10 По формуле (15) определяют значение уставки дифференциальной токовой отсечки

$$I_{\text{ДТО}} = k_{\text{отс}} \cdot e_{\text{пер}} \cdot I_{\text{макс}} = 1,5 \cdot 0,8 \cdot 2905 = 3486 \text{ А.}$$

5.5.3.11 По формуле (16) и условию расчета принимают значение уставки по току  $I_{\text{ДЗТ нач.}}$  равным

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

5.5.3.12 Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.070(071) принимают коэффициент торможения  $k_{\text{торм}}$  равным "1".

Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) определяют  $k_{\text{торм}}$  по формуле (17)

<sup>1)</sup> См. рисунок П2-6.

$$k_{\text{торм}} = k_n \cdot (k_{\text{пер}} \cdot e_{\text{макс}} + 2g + d) = 1,1 \cdot (2,5 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,025 + 0,025) = 0,36.$$

5.5.3.13 Для терминалов БМРЗ ДИВГ.648228.080(081) значение уставки  $I_{\text{диф}2z}$  по относительному содержанию второй гармонической составляющей в дифференциальном токе принимают равным 0,15.

Значение уставки  $I_{\text{диф}2z}$  может быть уточнено по опытным данным.

5.5.3.14 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимают равными нулю.

**5.5.3.15 Вводят блокирование дифференциальных защит при снижении максимального из трех фазных токов стороны питания электродвигателя ниже 75 % тока холостого хода ЭД.**

5.5.3.16 Для проверки чувствительности ДЗТ по формуле (18) определяют коэффициент чувствительности защиты  $k_q^{(2)}$  при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя

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

Поскольку коэффициент чувствительности больше двух, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

#### 5.5.4 Расчет уставок защит ячейки питания УПП

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

Погрешность ТТ этого типа при кратности тока до 15 (до 6000 А) и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом не превышает 10 % [5]<sup>1)</sup>.

5.5.4.2 Значение уставки токовой отсечки такое же, как при питании двигателя от сети.

5.5.4.3 По формуле (19) определяют значение уставки дифференциальной токовой отсечки

$$I_{\text{ДТО}} = 1,1 \cdot k_{\text{УПП}} \cdot I_{\text{ном. дв.}} = 1,1 \cdot 4 \cdot 377 = 1659 \text{ А.}$$

5.5.4.4 Выбранные ТТ удовлетворяют требованиям ПУЭ [1]<sup>2)</sup>, так как их погрешность не превышает 10 % при токе, соответствующем уставке срабатывания ДТО  $I_{\text{ДТО}}$ .

5.5.4.5 Выдержку времени ДТО принимают равной нулю.

1) См. рисунок П2-6.

2) См. главу 3.2 (3.2.29).

5.5.4.6 Учитывая изложенное в 4.10.6.2, в ячейке питания УПП не используют ДЗТ.

5.5.4.7 По формуле (18) определяют коэффициент чувствительности ДТО при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{кз}}^{(2)}}{I_{\text{ДТО}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{кз}}^{(3)}}{I_{\text{ДТО}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{8000}{1659} \approx 4,17.$$

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

## 6 Защиты от однофазных замыканий на землю

### 6.1 Требования ПУЭ к защитам 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 10 А (электродвигатели номинальной мощностью до 2 МВт) или 5 А (электродвигатели номинальной мощностью свыше 2 МВт).

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 7.

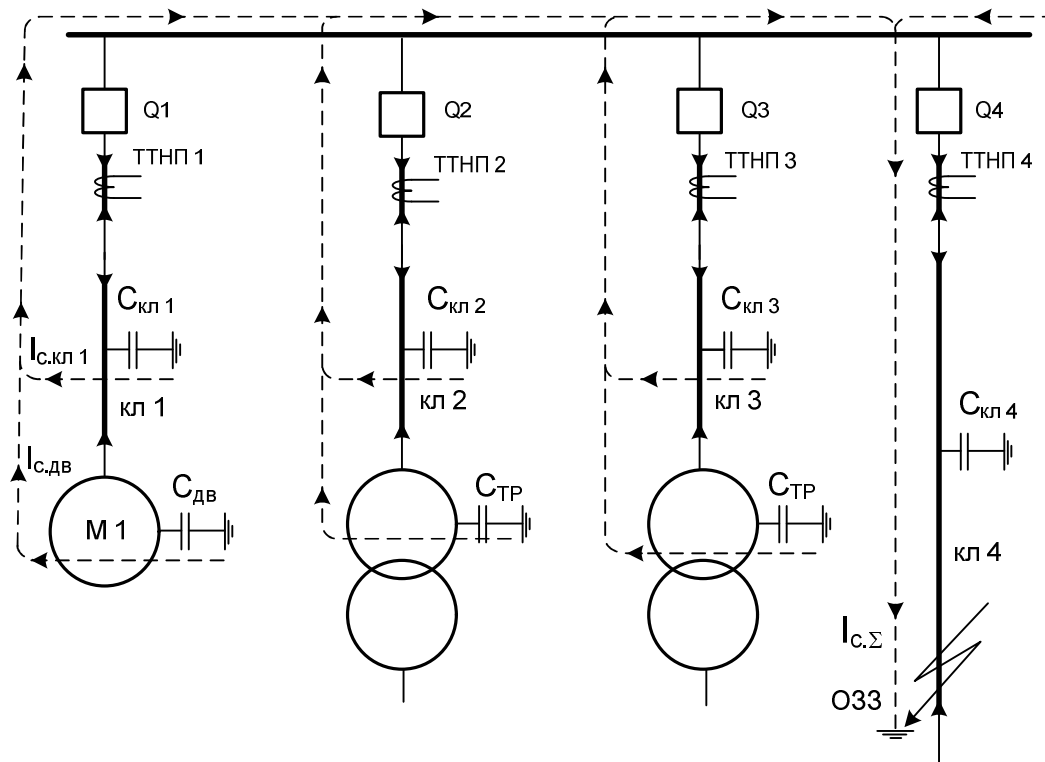


Рисунок 7 – ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью

6.3.2 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 М1 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 емкостного 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 терминалах БМРЗ).

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

$$3I_{0>} = \frac{k_{омс}}{k_{возврат}} \cdot k_{бр} \cdot (I_{емк.дв} + I_{емк.кл}), \quad (20)$$

где  $k_{омс}$  – 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 ток<sup>1)</sup> защищаемого электродвигателя, А;

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

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

При расчетах защит от ОЗЗ, выполненных на электромеханических реле, используют другие значения коэффициентов:  $k_{омс} = 1,3$ ;  $k_{бр}$  – от трех до пяти.

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 рекомендуется применять направленную защиту.

В этом случае ток срабатывания направленной токовой защиты от ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью определяют по формуле (20), в которой значение  $k_{бр}$  принимают равным единице.

6.3.8 Для расчетов используют емкость статорной обмотки электродвигателя, указанную в его паспорте.

Значения электрической емкости статорной обмотки некоторых типов электродвигателей приведены в таблице 1 [3].

<sup>1)</sup> Например, на рисунке 7 емкостные токи присоединения "1" обозначены как  $I_{с.кл.1}$  (кабельная линия) и  $I_{с.дв}$  (электродвигатель).

Таблица 1

Электродвигатель		Емкость <b>трех фаз</b> статорной обмотки, мкФ, при номинальном напряжении	
Тип	Мощность, кВт	6 кВ	10 кВ
СТД–5000–2	5000	0,11	0,085
СТД–6300–2	6300	0,11	0,11
СТД–8000–2	8000	0,17	0,11
СТД–10000–2	10000	0,17	0,15
СТД–12500–2	12500	0,22	0,15

6.3.9 При отсутствии информации в паспорте двигателя, емкостной ток электродвигателя  $I_{емк.дв}$ , А, можно определить по соотношениям (21) – (23), приведенным в [8]:

– для АД с номинальным напряжением 6 кВ

$$I_{емк.дв} \approx 0,017 \cdot S_{ном.дв} ; \quad (21)$$

– для АД с номинальным напряжением 10 кВ

$$I_{емк.дв} \approx 0,03 \cdot S_{ном.дв} . \quad (22)$$

В формулах (21) и (22)  $S_{ном.дв}$ , МВ·А – полная мощность АД.

6.3.10 Если в паспорте электродвигателя не указана его полная мощность  $S_{ном.дв}$ , МВ·А, ее можно определить по формуле (23)

$$S_{ном.дв} = \frac{P_{ном.дв}}{\cos j \cdot h} , \quad (23)$$

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

$\cos j$  – номинальный коэффициент мощности электродвигателя;

$h$  – номинальный КПД электродвигателя.

6.3.11 Значение емкостного тока синхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ можно определить, используя формулы (24) – (26), приведенные в [9].

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

$$I_{емк.дв} = 2\pi \cdot f_{ном} \cdot \sqrt{3} \cdot C_{дв} \cdot U_{ном.дв} . \quad (24)$$

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

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

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

Емкость статорных обмоток явнополюсного СД  $C_{дв}$ , Ф, определяют по формуле

$$C_{дв} \approx \frac{40^4 \sqrt{S_{ном.дв}^3} \cdot 10^{-6}}{3 \cdot (U_{ном.дв} + 3600) \cdot \sqrt[3]{n}} , \quad (25)$$

где  $S_{ном.дв}$  – полная мощность электродвигателя, кВ·А;

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

$n$  – синхронная частота вращения двигателя, об/мин.

Емкость обмоток одной фазы неявнополюсных синхронных и асинхронных электродвигателей  $C_{дв}$ , Ф, определяют по формуле

$$C_{дв} \approx \frac{0,0187 \cdot S_{ном.дв} \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{U_{ном.дв} \cdot (1 + 0,08 \cdot U_{ном.дв})}}, \quad (26)$$

где  $S_{ном.дв}$  – полная мощность электродвигателя, МВ·А;

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

6.3.12 Для нахождения удельного емкостного тока кабельной линии  $I_{с.кл}$  с бумажной изоляцией следует использовать таблицу 2 [8].

Таблица 2

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

6.3.13 При отсутствии информации об удельной емкости кабеля, емкостной ток  $I_{емк.кл}$ , А, кабельной линии можно определить по приближенной формуле, приведенной в [8]

$$I_{емк.кл} \approx \frac{U_{ном.кл} \cdot l}{10}, \quad (27)$$

где  $U_{ном.кл}$  – 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.

6.3.14 ПУЭ допускает использовать изолированную нейтраль в тех случаях, когда суммарный емкостной ток  $I_{с\sum}$  не превышает 30 А (для сети напряжением 6 кВ) или 20 А (для сети напряжением 10 кВ) [1].

В сетях с резистивным заземлением нейтрали суммарное значение тока ОЗЗ  $I_{O3\Sigma}^{(1)}$ , А, определяют по формуле

$$I_{O3\Sigma}^{(1)} = \sqrt{I_{C\Sigma}^2 + I_R^2}, \quad (28)$$

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

$I_R$  – активный ток, протекающий через резистор заземления нейтрали.

6.3.15 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.

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

$$k_q^{(1)} = \frac{I_{O3\Sigma}^{(1)}}{3I_0} > 1, \quad (29)$$

где  $I_{O3\Sigma}^{(1)}$  – суммарное значение емкостного тока сети при ОЗЗ, А.

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

6.3.17 Перед вводом уставки по току  $3I_0$  в терминал БМРЗ, следует перевести ее во вторичные значения в соответствии с коэффициентом трансформации ТТНП, приведенным в таблице 3.

Таблица 3

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

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

$$3I_0 \gg = k_{отс} \cdot k_{нес} \cdot I_{пуск.дв} = k_{отс} \cdot k_{нес} \cdot k_n \cdot I_{ном.дв} \quad (30)$$

где  $k_{отс}$  – коэффициент отстройки;

$k_{нес}$  – коэффициент несимметрии<sup>1)</sup>;

$I_{пуск.дв}$  – 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 уставка срабатывания защиты от однофазных замыканий на землю  $3I_0 >$  равна или больше суммарного значения тока ОЗЗ сети  $I_{ОЗЗ}^{(1)}$ .

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 ТТП не превысит  $36^\circ$  (рисунок 8).

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

---

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

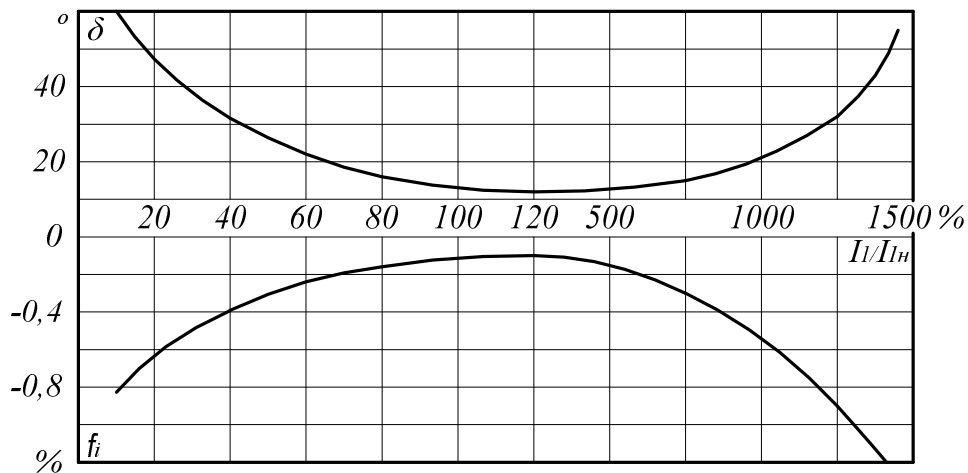


Рисунок 8 – Зависимость токовой  $f_i$  и угловой  $d$  погрешности некомпенсированного ТТ от кратности первичного тока  $I_1$  к номинальному току  $I_{1H}$  (по [10])

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

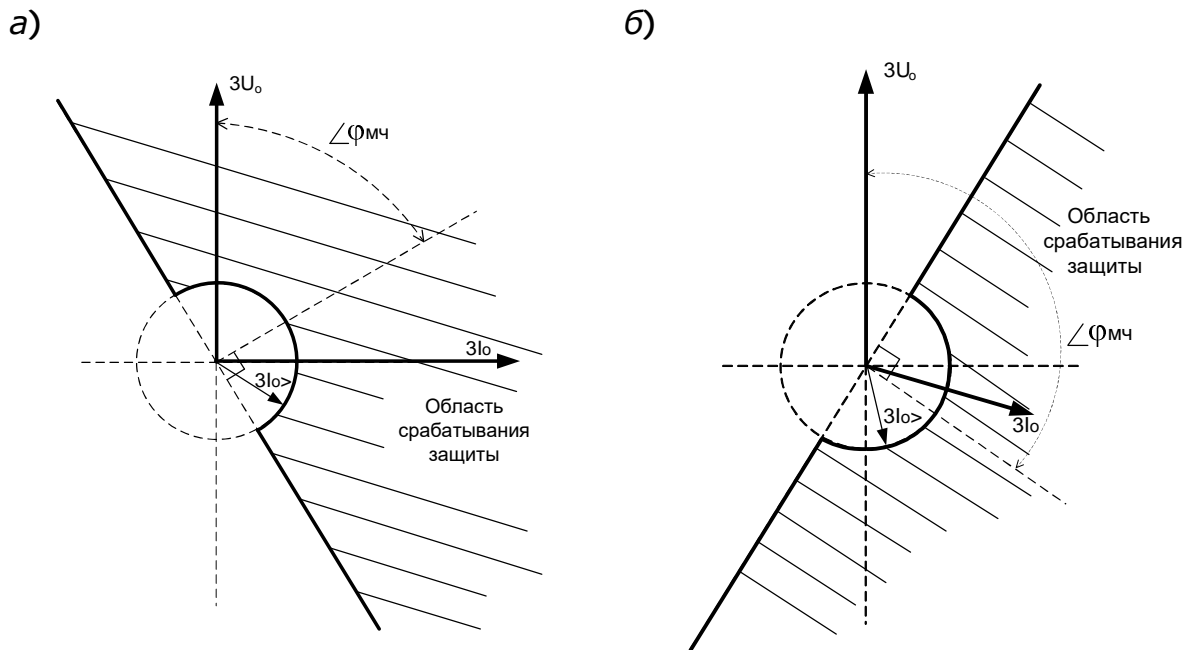
$$I_{с.з.} < \frac{I_{ОЗЗ\Sigma}^{(1)}}{1,5}. \quad (31)$$

Характеристики<sup>1)</sup> направленной защиты от ОЗЗ для сетей с изолированной и заземленной нейтралью приведены на рисунке 9.

В терминалах БМРЗ предусмотрена возможность изменения угла максимальной чувствительности  $j_{мч}$ . Для сети с изолированной нейтралью рекомендуется устанавливать угол  $j_{мч}$  равным плюс 54° (см. рисунок 9 а)). Это обусловлено тем, что емкостной ток сети на поврежденном присоединении будет отставать от напряжения  $3U_0$  на 90°, при этом возможные угловые погрешности ТТП компенсируются смещением характеристики на указанный угол.

Для сети с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор, рекомендуется устанавливать угол  $j_{мч}$  равным плюс 135° (см. рисунок 9 б)). В этом случае рекомендуется проверить корректность работы реле направления мощности нулевой последовательности на основании расчета угла тока сети при ОЗЗ на поврежденном присоединении.

<sup>1)</sup> В терминалах 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 терминал БМРЗ.



- а) для сети с изолированной нейтралью,  
 б) для сети с заземленной через высокоомный резистор нейтралью

Рисунок 9 – Характеристики направленной защиты от ОЗЗ

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

$$j_{I_0-U_0} = 90^\circ + \arcsin\left(\frac{I_{акт}}{\sqrt{I_{емк}^2 + I_{акт}^2}}\right), \quad (32)$$

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

## 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 20 В (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 количества отключений/включений, выполняемых персоналом при поиске присоединения, в котором произошло ОЗЗ, в терминалах

БМРЗ-УЗД и БМРЗ-ДВА реализован алгоритм «селектор направления ОЗЗ» (СНОЗЗ), 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 напряжения  $3U_0$  сверх заданной уставки.

Одновременно алгоритм СНОЗЗ контролирует изменение направления полной мощности нулевой последовательности  $P_0$ . При направлении мощности нулевой последовательности  $P_0$  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  $3U_0 > a.c.$  (рекомендуемое значение  $3U_0 > a.c.$  – 10 В);
- по углу  $\Phi_{MЧ}$  для реле направления мощности нулевой последовательности (выбирают в соответствии с рекомендациями 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<sup>2</sup>. Длина кабеля – 40 метров.

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

В схеме защиты применен ТНП типа ТЗР.

#### **Исходные данные для расчета:**

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

6.7.1.2 Полную мощность двигателя  $S_{ном.дв}$  определяют по формуле (23)

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

6.7.1.3 Емкостной ток двигателя  $I_{емк.дв}$  вычисляют по формуле (21)

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

6.7.1.4 Для определения емкостного тока двигателя используют второй способ.

Электрическую емкость одной фазы электродвигателя  $C_{дв}$  определяют по формуле (26)

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

Значение емкостного тока двигателя  $I_{емк.дв}$  при известной емкости  $C_{дв}$  вычисляют по формуле (24)

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

Результаты расчетов первым и вторым способом одинаковы.

6.7.1.5 Емкостной ток кабельной линии  $I_{емк.кл}$  определяют используя данные, приведенные в таблице 2

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

6.7.1.6 Уставку срабатывания защиты от ОЗЗ по току  $3I_0 >$  в первичных значениях определяют по формуле (20)

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

6.7.1.7 Коэффициент чувствительности защиты от ОЗЗ  $k_q^{(1)}$  вычисляют по формуле (29)

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

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

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

$$3I_{0\text{втор}} \geq \frac{3I_0}{k_{mp}} = \frac{0,159}{18} = 0,0088 \approx 0,01 \text{ А.} \quad (33)$$

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

6.7.1.10 Номинальный ток электродвигателя вычисляют по формуле (1)

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

6.7.1.11 Уставку срабатывания защиты от двойных замыканий на землю вычисляют по формуле (30)

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

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

$$3I_0 \gg = 100 \text{ А.}$$

6.7.1.12 Вторая степень 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.

СД соответствует требованиям [7].

Электродвигатель подключен тремя трехфазными кабелями с бумажной изоляцией. Сечение медных жил – 185 мм<sup>2</sup>. 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, $\cos j$ [7] .....	0,9
напряжение, $U_{\text{ном.дв}}$ .....	10кВ
кпд, $h$ .....	0,975
кратность пускового тока, $k_{\text{пуск}}$ .....	6,28

6.7.2.2 Емкость статорной обмотки этого двигателя выбирают из таблицы 1 и выполняют расчет значения емкостного тока электродвигателя  $I_{\text{емк.дв}}$  по формуле (24)

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

6.7.2.3 По формуле (27) определяют емкостной ток  $I_{емк.кл}$  трех кабельных линий длиной 100 м каждая

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

6.7.2.4 Ток срабатывания защиты от ОЗЗ двигателя СТД-6300-2 в первичных значениях вычисляют по формуле (20)

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

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

6.7.2.5 Уставку срабатывания по току направленной защиты от ОЗЗ выбирают по соотношению (31)

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

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

6.7.2.6 Коэффициент чувствительности защиты вычисляют по формуле (29)

$$k_{ч}^{(1)} = \frac{I_{ОЗЗ\Sigma}^{(1)}}{3I_0 >} = \frac{0,5}{0,3} = 1,67.$$

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

6.7.2.7 Поскольку двигатель работает в сети с изолированной нейтралью, характеристику работы направленной защиты от ОЗЗ выбирают в соответствии с рисунком 9 а).

6.7.2.8 Ток срабатывания защиты во вторичных значениях определяют по формуле (33), учитывающей коэффициент трансформации ТТНП нулевой последовательности типа ТЗР

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

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

6.7.2.10 Номинальный ток электродвигателя  $I_{ном.дв}$  вычисляют по формуле (1)

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

6.7.2.11 Уставку срабатывания защиты от двойных замыканий на землю  $3I_0 \gg$  вычисляют по формуле (30)

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

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

$$3I_0 \gg = 100 \text{ А.}$$

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 защитой 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  $U \ll$  выбирают из диапазона от  $0,6 \cdot U_{ном.дв}$  до  $0,7 \cdot U_{ном.дв}$ .

Время срабатывания этой ступени  $T_{ЗМН} \ll$  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 второй ступени  $U <$  выбирают (по условию возврата при самозапуске электродвигателей) из диапазона от  $0,4 \cdot U_{ном.дв}$  до  $0,5 \cdot U_{ном.дв}$ .

Время срабатывания второй ступени  $T_{ЗМН} <$  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  $T_{ЗМН} <$  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.

## 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 быстреешую 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 три – четыре раза превышает скорость снижения частоты при аварийном дефиците мощности в энергосистеме.

При этом следует учитывать, что скорость снижения частоты при выбеге 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 ее 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 применен в терминалах БМРЗ.

Уставку срабатывания реле минимальной частоты  $f_{c.з.}$  выбирают меньше уставки срабатывания первой ступени АЧР-1 [11] из диапазона от 48,3 до 48,4 Гц.

Блокирование по направлению мощности позволяет выполнить эту защиту быстродействующей.

Время срабатывания защиты  $t_{c.з.}$  составляет от 0,3 до 0,4 с (в соответствии с рекомендациями, приведенными в [11] 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 10.

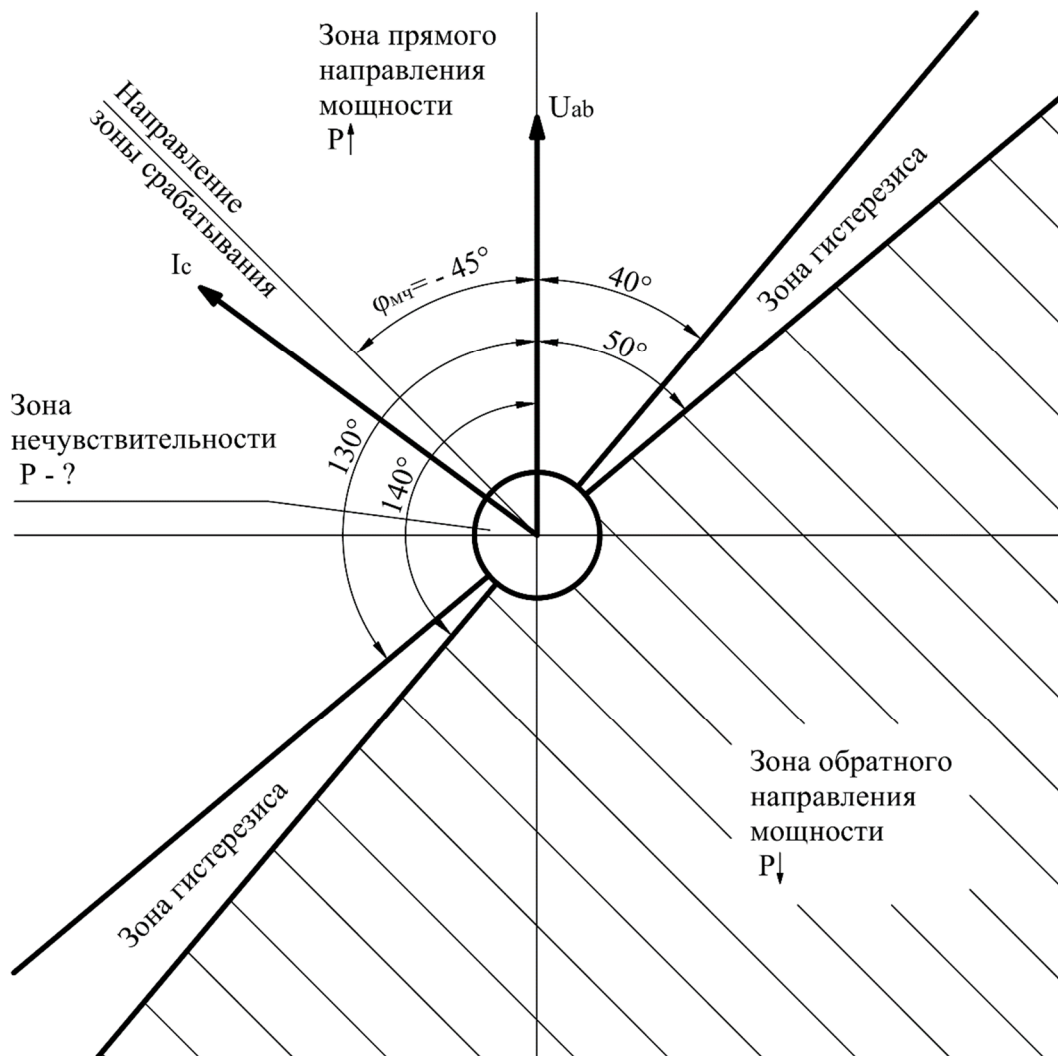


Рисунок 10 – Характеристика реле направления мощности

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 угла максимальной чувствительности  $j_{MC}$  выбирают из диапазона от минус  $30^\circ$  до минус  $60^\circ$  <sup>1)</sup> [12].

## 9 Защита электродвигателя от неполнофазных режимов

### 9.1 Требования ПУЭ к защите от неполнофазных режимов

9.1.1 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  $1,6 \cdot I_{ном.дв}$  до  $2,5 \cdot I_{ном.дв}$ . Вследствие этого, неполнофазные режимы работы электродвигателей приводят к недопустимому разогреву зубцов ротора, пазовых клиньев и бандажных колец, а также к механическим вибрациям.

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 Для защиты от неполнофазных режимов (ЗНР) в терминалах БМРЗ применена токовая защита обратной последовательности.

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

$$I_{2с.з.} = k_n \cdot e \cdot I_{ном} \approx 1,5 \cdot 0,1 \cdot I_{ном} = 0,15 \cdot I_{ном}, \quad (34)$$

где  $k_n$  – коэффициент надежности, принимаемый равным 1,5;

$e$  – коэффициент несимметрии по току в нормальном режиме, учитывающий несимметрию линейных напряжений, разное сопротивление фаз электродвигателя и погрешность трансформаторов тока, принимается равным 0,1;

$I_{ном}$  – номинальный ток двигателя, А.

Чувствительность защиты обычно достаточно высока и может не проверяться.

---

<sup>1)</sup> В терминалах 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 терминал БМРЗ.

При обрыве фазы двигателя токи прямой и обратной последовательностей определяются по формуле

$$I_1 = I_2 = \frac{I}{\sqrt{3}}, \quad (35)$$

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

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

Уставка по времени срабатывания защиты выбирается наибольшей из следующих условий:

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

$$t_{с.з.} \geq (1,2 \div 1,3) \cdot t_n, \quad (36)$$

где  $t_n$  – длительность пуска (самозапуска) двигателя, с;

– согласование с временем ликвидации несимметричного режима действием вышестоящих устройств РЗА (для предотвращения излишнего отключения перед ликвидацией несимметричного режима)

$$t_{с.з.} \geq t_{ликв.У2} + \Delta t, \quad (37)$$

где  $\Delta t$  – степень селективности, принимается равной 1 с.

В случае, если выполнение условия по формуле (37) может привести к повреждению электродвигателя, допустимо его не выполнять.

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

## 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 недостаткам 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 учета 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 учета 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 БМРЗ входа 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 руководителем организации или структурного подразделения.

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 11). Она должна соответствовать перегрузочной характеристике двигателя (см. 10.3.3), имеет инверсный характер и действует на отключение электродвигателя.

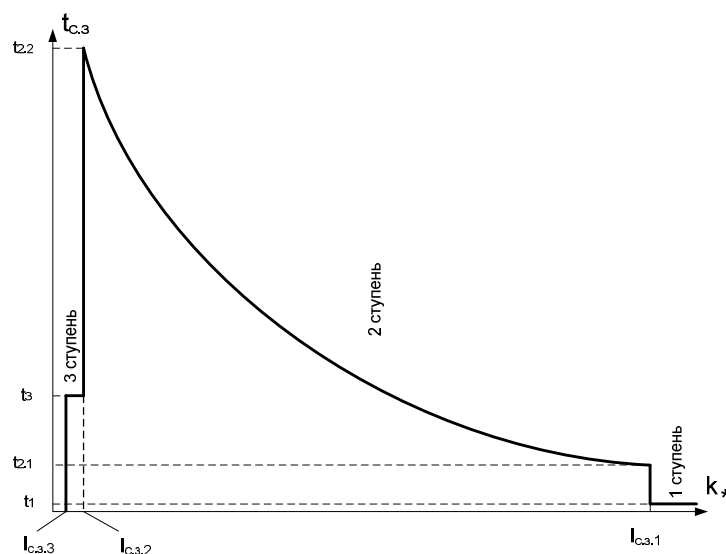


Рисунок 11 – Характеристика защиты от симметричных перегрузок электродвигателя

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 токовой отсечки.

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

10.3.2 Ток срабатывания первой степени защиты должен быть отстроен от пускового тока электродвигателя. Его значение  $I_{c.з.1}$ , А, вычисляют по формуле

$$I_{c.з.1} = \frac{1,2 \cdot k_{\text{пуск}}}{k_{\epsilon}} \cdot I_{\text{ном.дв}}, \quad (38)$$

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

10.3.3 Время срабатывания второй степени защиты  $t_{c.з.2}$ , с, рассчитывает процессор терминала БМРЗ по формуле

$$t_{c.з.2} = \frac{A}{k_*^2 - 1}, \quad (39)$$

где  $A$  – тепловая постоянная времени охлаждения статора для защищаемого электродвигателя. В зависимости от типа защищаемого двигателя значение  $A$  может находиться в диапазоне от 60 до 300 с<sup>1)</sup>;

$k_*$  – кратность тока статорной обмотки двигателя.

Ток срабатывания второй степени  $I_{c.з.2}$ , А, вычисляют по формуле

$$I_{c.з.2} = \frac{1,08}{k_{\epsilon}} \cdot I_{\text{ном.дв}}, \quad (40)$$

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

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

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 IEC 60034-1, согласно

---

<sup>1)</sup> Программой терминалов БМРЗ-УЗД и БМРЗ-ДВА предусмотрен расчет значения  $A$  исходя из допустимого времени работы при заданной кратности тока в соответствии с 10.3.4.

которым для многофазных машин мощностью выше 315 кВт кратковременные перегрузки по току не нормируются.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства, изготовленные в период с 01.07.2010 до 01.03.2016, соответствуют требованиям [7], согласно которым трехфазные двигатели переменного тока мощностью не менее 0,55 кВт с косвенным охлаждением обмоток статора должны выдерживать в течение 2 минут ток, равный 1,5 номинального тока.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства, изготовленные ранее 01.07.2010, как правило, соответствуют [13], в котором также содержится приведенное в [7] требование.

Исходя из этого требования, можно рассчитать минимально допустимую постоянную времени охлаждения статора  $A$ , по формуле, приведенной в [3]

$$A = t_{дон} \cdot (k_*^2 - 1) = 120 \cdot (1,5^2 - 1) = 150 \text{ с}, \quad (41)$$

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

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

$$I_{с.з.3} = \frac{k_{омс}}{k_{г}} \cdot I_{ном.дв}, \quad (42)$$

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

$k_{г} = 0,95$  – коэффициент возврата (уточняется 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 затянутого пуска

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

Уставка по времени защиты от затянутого пуска  $t_{п}$  должна быть отстроена от максимального времени пуска (самозапуска) электродвигателя с учетом увеличения времени пуска на 10 % из-за возможного снижения напряжения (см. ГОСТ IEC 60034-1).

Уставку по току защиты от затянутого 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, затянувшимся 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. Стандарт ГОСТ IEC 60034-1 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 IEC 60034-1, ГОСТ 8865).

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

10.5.4 Относительный 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 БМРЗ по формуле

$$E_{нагр, \%} = 100 \cdot \left( \frac{I_{эkv}}{I_{TM}} \right)^2 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{нагр}}{T_{c1}}} \right) + E_{0, \%} \cdot e^{-\frac{t_{нагр}}{T_{c1}}}, \quad (43)$$

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

$I_{TM}$  – расчетный<sup>1)</sup> 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 формулу (43) микропроцессорная система терминала БМРЗ подставляет рассчитанное значение эквивалентного тока  $I_{эkv}$  и время работы электродвигателя  $t_{нагр}$  в минутах.

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

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

$$I_{эkv} = \sqrt{I_{фазн.макс}^2 + K_2 \cdot I_2^2}, \quad (44)$$

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 ТТ в каждой фазе питания двигателя. В терминалах БМРЗ-УЗД и БМРЗ-ДВА предусмотрена возможность вычисления тока  $I_2$  из токов двух фаз и тока  $3I_0$  (для БМРЗ-ДВА) из токов двух фаз (для БМРЗ-УЗД), таким образом, в этих терминалах можно использовать алгоритм ТМ при наличии ТТ в двух фазах питания двигателя (в сетях с изолированной нейтралью)

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

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

$$E_{охл,\%} = E_{0,\%} e^{-\frac{t_{охл}}{T_{e2}}}, \quad (45)$$

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

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

$t_{охл}$  – время охлаждения, мин.

---

<sup>1)</sup> В руководствах по эксплуатации терминалов БМРЗ этот ток назван **штатным**.

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 12.

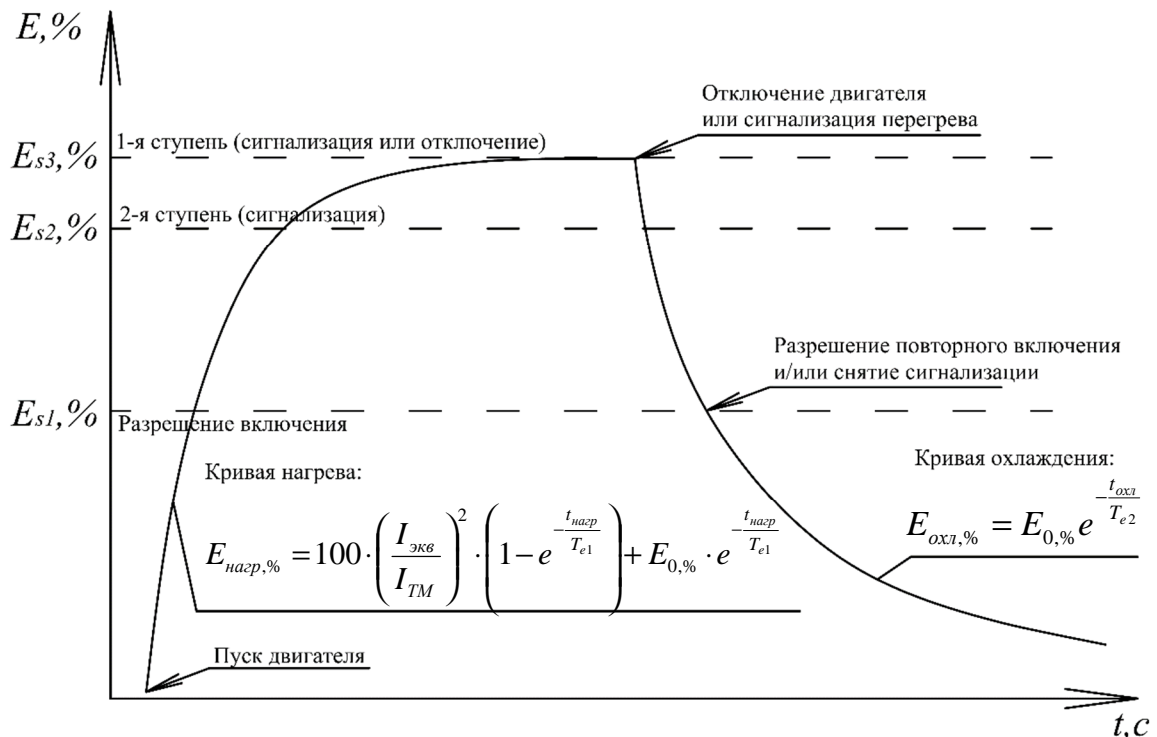


Рисунок 12 – Характеристика тепловой модели электродвигателя

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:

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

$T_{e1}$  – постоянная времени нагрева электродвигателя<sup>1)</sup>, мин;

$T_{e2}$  – постоянная времени охлаждения электродвигателя<sup>1)</sup>, мин;

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

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

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

10.5.11 Определить значения  $T_{e1}$ ,  $T_{e2}$  двигателя из его предельно-допустимой нагрузочной характеристики. Рекомендуется данные величины

<sup>1)</sup> При отсутствии данных, приводимых заводом-изготовителем в документации двигателя, определяют способами, приведенными в 10.5.11.

определять в два этапа. На этапе проектирования выполняется теоретический расчет. На этапе пуско-наладочных работ постоянные времени нагрева и охлаждения уточняют экспериментально.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства изготавливают в соответствии с требованиями ГОСТ IEC 60034-1, согласно которым для многофазных машин мощностью выше 315 кВт кратковременные перегрузки по току не нормируются.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства, изготовленные в период с 01.07.2010 до 01.03.2016, соответствуют требованиям [7], согласно которым трехфазные двигатели переменного тока мощностью не менее 0,55 кВт с косвенным охлаждением обмоток статора должны выдерживать ток, равный 1,5 номинального тока, в течение 2 минут.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства, изготовленные ранее 01.07.2010, как правило, соответствуют требованиям [13], где было установлено такое же требование, как и в [7].

Исходя из указанных требований, рассчитывают минимально допустимую постоянную времени охлаждения статора [5] аналогично с формулой (41)

$$A = t_{oon} \cdot (k_*^2 - 1) = 120 \cdot (1,5^2 - 1) = 150 \text{ с}, \quad (46)$$

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

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

Определяют минимально допустимую постоянную времени нагрева электродвигателя  $T_{el}$ , мин, по формуле, приведенной в [14]

$$\frac{A}{T_{el} \cdot 60} = \ln \left( \frac{k_*^2 - 1}{k_*^2 - k_{\max}^2} \right). \quad (47)$$

После преобразования получают

$$T_{el} = \frac{A}{60 \cdot \ln \left( \frac{k_*^2 - 1}{k_*^2 - k_{\max}^2} \right)}, \quad (48)$$

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

Коэффициент  $k_{\max}$  может быть определен из таблицы 4, которая составлена на основе ГОСТ 8865 с учетом следующего:

- при токах, не превышающих номинальный ток двигателя, изоляция, как правило, используется по более низкому температурному классу (например, F с использованием по классу В);
- двигатель работает при температуре окружающей среды 40 °С.

При других условиях работы электродвигателя требуется провести дополнительные расчеты.

Таблица 4

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

Постоянную времени охлаждения  $T_{e2}$  выбирают пропорционально эффективности работы системы охлаждения на остановленном электродвигателе.

При наличии системы охлаждения, эффективность которой не зависит от частоты вращения вала, постоянные времени охлаждения и нагрева равны.

Если двигатель охлаждается вентилятором, закрепленным на валу, постоянная времени охлаждения  $T_{e2}$ , как правило, от двух до четырех 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 расчетное относительное значение нагрева двигателя за время пуска  $E_{\text{пуск}}$ , %, по формуле

$$E_{\text{пуск}} = k_{\text{пуск}}^2 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_n}{T_{e1}}} \right) \cdot 100, \quad (49)$$

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

Расчетное допустимое значение относительного перегрева  $E_{S1}$ , %, при котором разрешен пуск машины, определяют по формуле

$$E_{S1} \leq 100 - E_{\text{пуск}}. \quad (50)$$

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

$$E_{S2,3} = 100 \cdot \left( \frac{I_{\text{дв}}}{I_{\text{ном.дв}}} \right)^2, \quad (51)$$

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

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

$I_{ном.дв}$  – номинальный ток 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 32144), выбирают отношение токов, равным  $\frac{I_{дв}}{I_{ном.дв}} = 1,10$ . В соответствии с этим получают значение

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

Для второй ступени (сигнализация), исходя из возможной длительной работы двигателя в сети с напряжением, составляющим 110 % от номинального (см. ГОСТ 32144), выбирают отношение токов, равным  $\frac{I_{дв}}{I_{ном.дв}} = 0,9$ . В

соответствии с этим получают значение  $E_{S2} = 100 \cdot 0,9^2 \approx 81 \text{ \%}$ .

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 БМРЗ. 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

10.6.1.1 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 [13].

#### **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,  $h$  ..... 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 определяют по формуле (38)

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

Время срабатывания первой ступени защиты  $t_{с.з.1}$  принимают 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  $k_* = 1,08 \cdot I_{ном.дв}$ . Значение тока пуска второй ступени защиты в первичных значениях определяют по соотношению (40)

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

Время срабатывания защиты рассчитывает процессор терминала БМРЗ по формуле (39) при тепловой постоянной времени охлаждения статора  $A=150$  с

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

10.6.1.4 Третью ступень защиты выполняют с независимой характеристикой с действием на сигнализацию (рисунок 13).

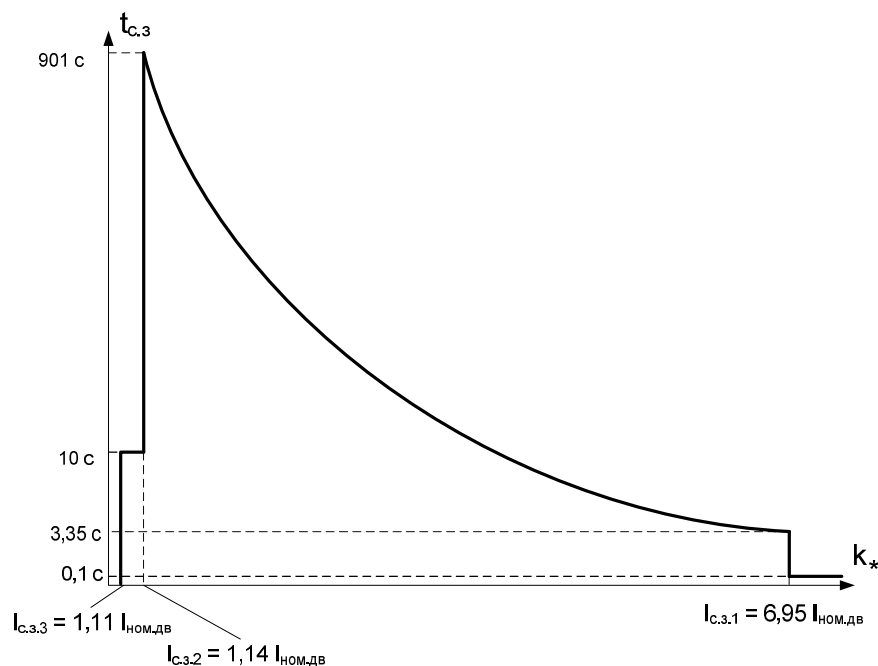


Рисунок 13 – Характеристика защиты от симметричных перегрузок электродвигателя серии А4 мощностью 800 кВт

Ток срабатывания третьей ступени защиты определяют по формуле (42)

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

Так как АД не подвержен технологическим перегрузкам, а расчетное время его пуска составляет  $t_{\text{пуск}} = 5$  с, выбирают время срабатывания третьей ступени защиты на сигнализацию  $t_{\text{с.з.з}} = 10$  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 [7].

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,  $P_{\text{ном.дв}}$  ..... 800 кВт

номинальный ток двигателя,  $I_{\text{ном.дв}}$  ..... 57 А

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

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

время пуска  $t_{\text{пуск}}$  (по проекту) ..... 10 с

кратность пускового момента ..... 1,9

номинальная частота вращения двигателя,  $w_{\text{ном}}$  ..... 1000 об/мин

10.6.2.2 Расчетный ток тепловой модели<sup>1)</sup> выбирают равным номинальному току двигателя

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

10.6.2.3 Минимально допустимую постоянную времени охлаждения статора рассчитывают по формуле (46)

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

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

$t_{\text{дон}}$  – допустимое время работы двигателя при перегрузке  $k_*$ , поскольку двигатель соответствует требованиям [7], принимают  $t_{\text{дон}} = 120$  с,  $k_* = 1,5$ .

10.6.2.4 Минимально допустимую постоянную времени нагрева электродвигателя  $T_{e1}$  (двигатель соответствует [7]) вычисляют по формуле (48)

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

<sup>1)</sup> В руководствах по эксплуатации терминалов БМРЗ этот ток назван **штатным**.

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

По таблице 4 определяют  $k_{\max} = 1,278$ .

10.6.2.5 Вентилятор охлаждения закреплен на валу двигателя, поэтому принимают постоянную охлаждения двигателя равной

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

10.6.2.6 Относительный расчетный нагрев двигателя за время пуска  $E_{\text{пуск}}$  вычисляют по формуле (49)

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

Зная допустимую относительную температуру двигателя, определяют максимально допустимое значение уставки  $E_{S1}$

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

Округляя полученное значение до целого числа, принимают

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

10.6.2.7 В соответствии с рекомендациями, изложенными в 10.5.14, принимают  $E_{S2} = 81 \text{ \%}$ ,  $E_{S3} = 121 \text{ \%}$  и по полученным результатам строят характеристику алгоритма (рисунок 14).

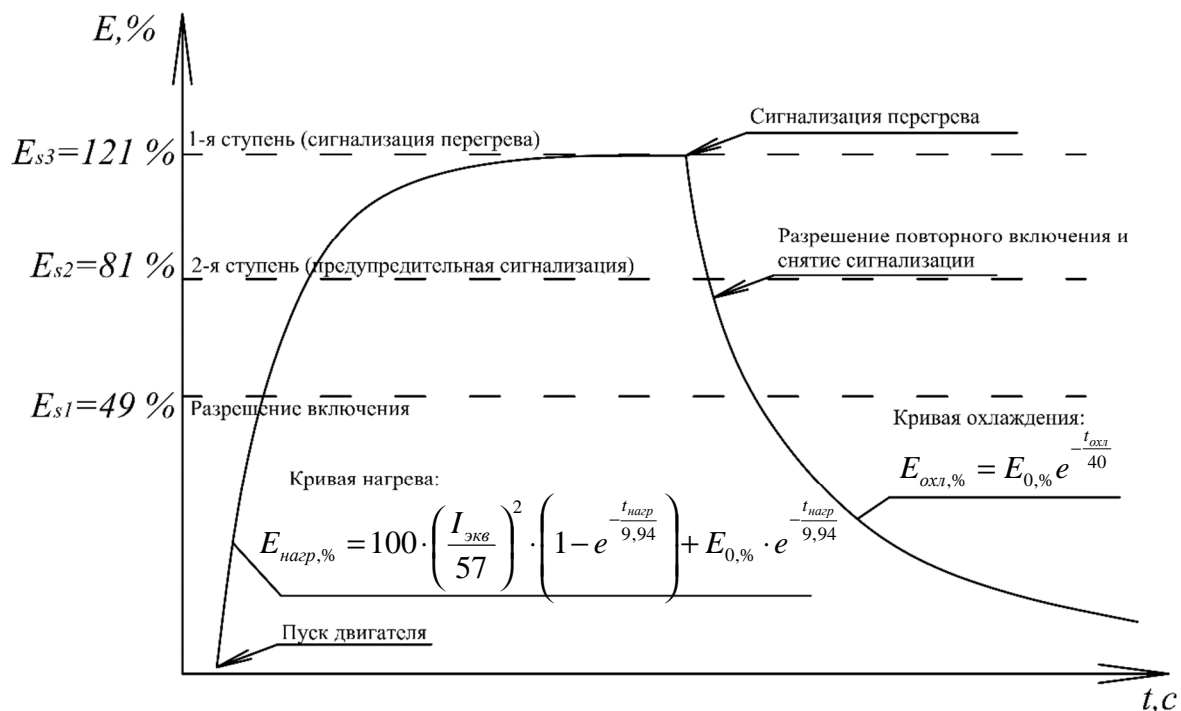


Рисунок 14 – Характеристика тепловой модели для двигателя серии А4 мощностью 800 кВт

## 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 охлаждения 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.

10.7.2.1 Электродвигатель необходимо остановить на время, необходимое для полного охлаждения как внешней поверхности двигателя, так и его внутренних частей.

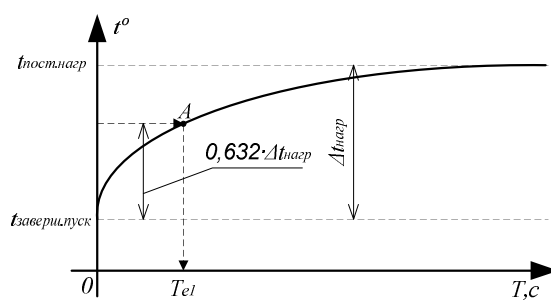
При отсутствии независимого охлаждения процесс охлаждения двигателя может занять от 10 до 20 часов (зависит от конструкции двигателя). Наличие независимого охлаждения остановленного двигателя обеспечивает охлаждение за время, составляющее примерно от 1 до 2 часов.

После окончания процесса охлаждения производят измерение температуры двигателя, после чего двигатель запускают.

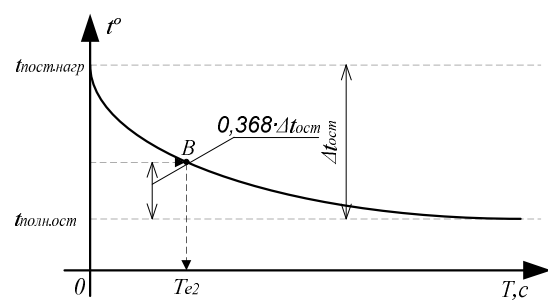
10.7.2.2 Начиная с момента пуска снимают график (рисунок 15 а)) процесса нагрева электродвигателя. Измерения выполняют с интервалом 60 с. Нагрузка двигателя при этом должна оставаться постоянной – не менее 50 % от номинальной нагрузки двигателя.

Выполняют 120 измерений, или больше, если температура двигателя не достигла установившегося значения.

а)



б)



а)  $T_{e1}$  по графику нагрева двигателя;

б)  $T_{e2}$  по графику охлаждения двигателя

Рисунок 15 – Определение постоянных времени

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 15 б)). Независимые средства 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 Вычисляют  $\Delta t_{\text{нагр}}$  – разность температур двигателя через 60 с после запуска из холодного состояния  $t_{\text{заверш.пуск}}$  и при постоянной нагрузке  $t_{\text{пост.нагр}}$  по формуле

$$\Delta t_{\text{нагр}} = t_{\text{пост.нагр}} - t_{\text{заверш.пуск}} \quad (52)$$

Графически (рисунок 15 а)) определяют время  $T_{e1}$ , с, прошедшее от начала нагрева до достижения значения температуры  $(t_{\text{заверш.пуск}} + \Delta t_{\text{нагр}} \cdot 0,632)$ .

$T_{e1}$  – постоянная времени нагрева этого электродвигателя.

10.7.2.7 Вычисляют  $\Delta t_{\text{ост}}$  – разность температур двигателя при постоянной нагрузке и в полностью охлажденном состоянии по формуле

$$\Delta t_{\text{ост}} = t_{\text{пост.нагр}} - t_{\text{полн.ост}} \quad (53)$$

Графически (рисунок 15 б)) определяют 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 двух до четырех 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 с фиксируют текущее значение температуры двигателя и значение перегрева, индицируемое на дисплее терминала БМРЗ.

10.7.4 После завершения эксперимента на основе полученных значений строится график процессов нагрева и охлаждения, где установившееся значение перегрева, индицируемое терминалом БМРЗ, приравнивается к установившейся температуре двигателя при постоянной нагрузке.

10.7.5 По графику определяют погрешность тепловой модели в каждой точке измерения по формуле

$$\Delta t = \frac{t_{TM, \%} \cdot t_{\text{двиг.уст.}}}{t_{TM\text{уст.}}} - t_{\text{двиг.}} \quad (54)$$

где:  $t_{TM, \%}$  – текущее значение перегрева, индицируемое на дисплее терминала БМРЗ, %;

$t_{\text{двиг.уст.}}$  – установившееся значение повышения температуры двигателя относительно температуры полностью охлажденного двигателя, °С;

$t_{TM\text{уст.}}$  – установившееся значение перегрева, индицируемое на дисплее терминала БМРЗ, %;

$t_{\text{двиг.}}$  – текущее значение повышения температуры двигателя относительно температуры полностью охлажденного двигателя, °С.

Настройка тепловой модели считается успешной, если погрешность не превышает  $\pm 5$  °С.

10.7.6 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  $\pm 5$  °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 15, рекомендуется обратиться 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 разгрузкой<sup>1)</sup> механизма до такой нагрузки, при которой обеспечивается втягивание электродвигателя в синхронизм;
- отключение электродвигателя и его повторный автоматический пуск;
- отключение электродвигателя<sup>2)</sup>.

## 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 [15].

11.2.2 Проводят анализ изменения сопротивления на выводах питания двигателя, используя материал, изложенный в [16] (рисунок 16).

В нормальном режиме работы (с опережающим  $\cos j = 0,9$ ) 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. 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.

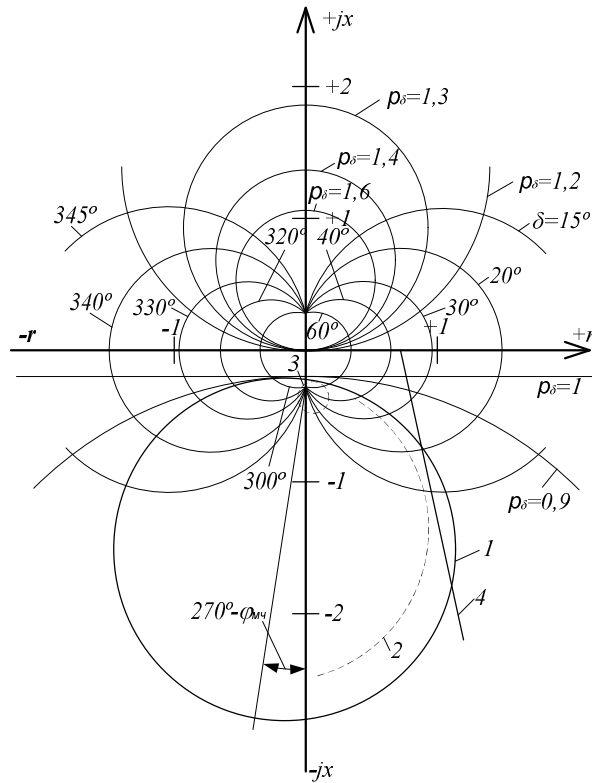
Согласно экспериментальным исследованиям [16], сопротивление на выводах синхронной машины при потере возбуждения может изменяться в диапазоне от  $F \cdot x_d''$ , где  $x_d''$  – сверхпереходное сопротивление СД, Ом, до  $G \cdot x_d$ , где  $x_d$  – индуктивное сопротивление прямой последовательности СД, Ом.

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  $F \cdot x_d''$  и  $G \cdot x_d$  (рисунок 17).

<sup>1)</sup> В тех случаях, когда по условиям технологического процесса допускаются кратковременная разгрузка механизма.

<sup>2)</sup> 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  $R_{II}$

Рисунок 16 – Круговые диаграммы полного сопротивления на выводах синхронной машины и характеристика реле

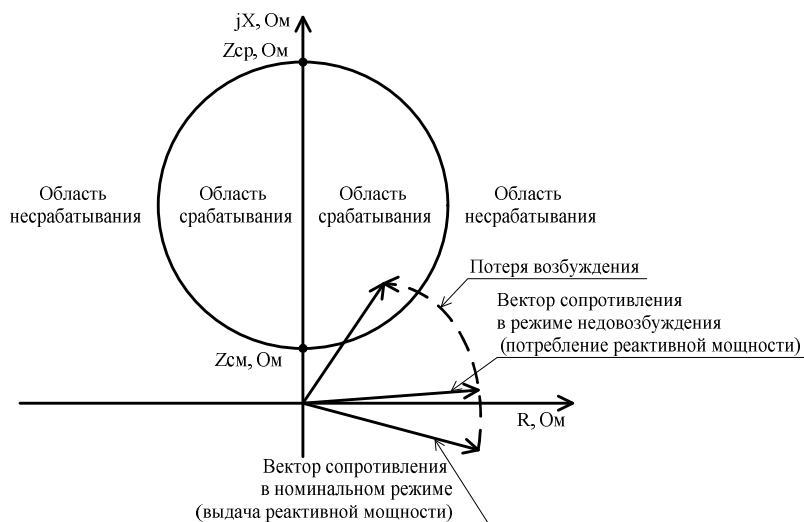


Рисунок 17 – Характеристика защиты от потери возбуждения СД

Положительным направлением токов для двигателя принято считать направление «в двигатель» (для генератора, как правило, «из генератора»), поэтому характеристика срабатывания защиты находится в верхней полуплоскости.

Если значения сопротивлений двигателя приведены в относительных единицах, то для их перевода в именованные единицы требуется сначала определить значение базисного сопротивления  $r_{\sigma}$ , Ом, по формуле

$$r_{\sigma} = \frac{U_{ном.дв}^2 \cdot 1000}{S_{ном.дв}}, \quad (55)$$

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

$S_{ном.дв}$  – номинальная полная мощность двигателя, кВт.

После нахождения базисного сопротивления переводят сверхпереходное и переходное сопротивления в именованные единицы по формулам (56) и (57)

$$x_d'' = \frac{x_{d,\%}'' \cdot r_{\sigma}}{100}, \quad (56)$$

$$x_d = \frac{x_{d,\%}}{100}, \quad (57)$$

где  $x_d''$  – сверхпереходное индуктивное сопротивление двигателя, Ом;

$x_{d,\%}''$  – сверхпереходное индуктивное сопротивление двигателя, %;

$r_{\sigma}$  – 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 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 расчета уставок, а к недостаткам – зависимость от исправности измерительных цепей напряжения.

Данный алгоритм защиты реализован в терминале 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, $U_{ном.дв}$ .....	10кВ
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 определяют значение базисного сопротивления  $r_{\sigma}$  по формуле (55)

$$r_{\sigma} = \frac{U_{\text{ном.дв}}^2 \cdot 1000}{S_{\text{ном.дв}}} = \frac{10^2 \cdot 1000}{4560} = 22 \text{ Ом.}$$

Сверхпереходное сопротивление двигателя  $x_d''$  в именованных единицах получают из формулы (56)

$$x_d'' = \frac{x_{d,\%} \cdot r_{\sigma}}{100} = \frac{14,29 \cdot 22}{100} \approx 3,1 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление прямой последовательности  $x_d$  в именованных единицах получают из формулы (57)

$$x_d = \frac{x_{d,\%} \cdot r_{\sigma}}{100} = \frac{185,1 \cdot 22}{100} \approx 40,7 \text{ Ом.}$$

11.3.3 Определяют значения уставок защиты в соответствии с 11.2.2

$$z_{\text{ср}} = x_d \cdot 1,2 = 40,7 \cdot 1,2 \approx 48,8 \text{ Ом,}$$

$$z_{\text{см}} = x_d'' \cdot 0,3 = 3,1 \cdot 0,3 \approx 0,9 \text{ Ом.}$$

11.3.4 По результатам проведенных расчетов строят характеристику работы защиты, приведенную на рисунке 18.

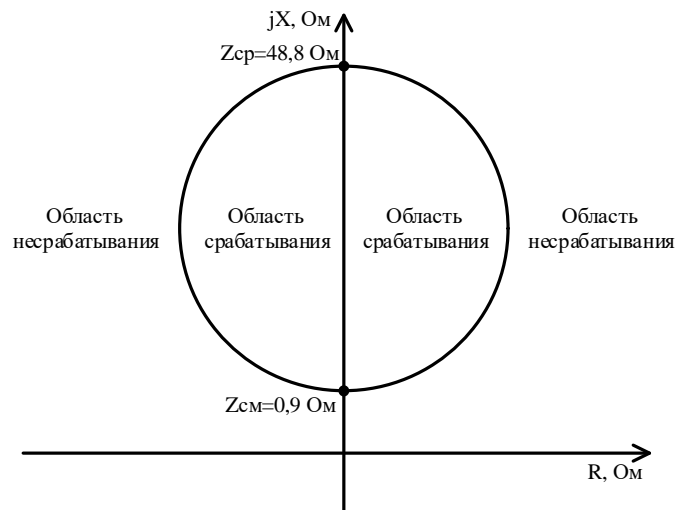


Рисунок 18 – Характеристика защиты электродвигателя СТД-4000-2 от потери возбуждения

## 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 как 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  $0,05 \cdot I_{ном.дв}$  до  $0,10 \cdot I_{ном.дв}$ .

Выдержка времени формирования выходного сигнала «УРОВд», определяется по формуле, приведенной в [15]

$$t_{уров} = t_{вык} + t_{воз РЗ} + t_{ош РВ} + t_{зан} \quad (58)$$

где  $t_{вык}$  – время отключения выключателя (как правило: от 0,05 до 0,10 с);

$t_{воз РЗ}$  – 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;

$t_{зан}$  – 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  $0,2 \cdot I_{ном.дв}$  до  $0,6 \cdot I_{ном.дв}$ .

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 энергосистеме<sup>1)</sup>

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  $d$  между несинхронными ЭДС частей системы от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , происходящими с частотой скольжения;
- б) качаниями напряжения;
- в) изменениями тока и мощности.

На рисунке 19 по горизонтальной оси "1" – "2" в масштабе отложено сопротивление  $X_{ЭЭС1} + X_L + X_{ЭЭС2}$  (для энергосистем бесконечной мощности – длина ЛЭП), по концам которой расположены источники ЭДС  $E_{ЭЭС1}$  и  $E_{ЭЭС2}$ .

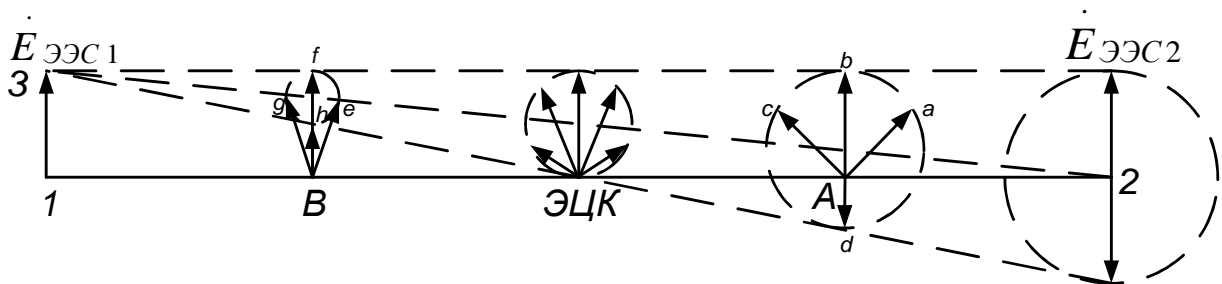


Рисунок 19 – Диаграмма качаний напряжения вдоль ЛЭП при асинхронном режиме (по [11])

Условно принимают, что вектор  $E_{ЭЭС1}$  неподвижен, а  $E_{ЭЭС2}$  вращается с частотой скольжения, образуя окружность.

Соединяют прямыми линиями верхнюю и нижнюю точки этой окружности, а также ее центр (точка "2") с точкой "3".

<sup>1)</sup> Данный раздел составлен по материалам работы [11].

Прямая "2" – "3" представляет собой геометрическое место центров окружностей, на которых расположены начала векторов напряжений вдоль ЛЭП.

Например, в точке  $A$  линии электропередачи напряжение будет периодически изменяться в соответствии с положением векторов  $aA, bA, cA, dA$ , в точке  $B$  — 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 20 а). Характер изменения тока и мощности в ЛЭП показан на рис. 20 б).

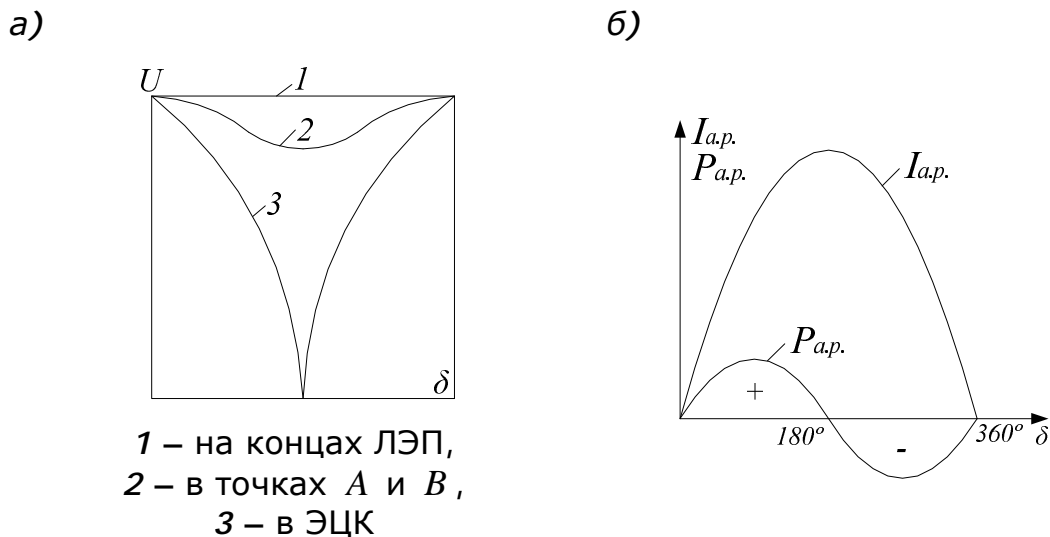


Рисунок 20 – Характер изменения напряжения (а), мощности и тока (б) в ЛЭП при асинхронном ходе

Ток асинхронного режима определяют по формуле

$$I_{a.p.} = \frac{2E}{X_{\text{ЭЭС1}} + X_{\text{Л}} + X_{\text{ЭЭС2}}} \cdot \sin \frac{d}{2}, \quad (59)$$

где  $E$  – ЭДС генератора;

$X_{\text{ЭЭС1}}$  – сопротивление энергосистемы ЭЭС1;

$X_{\text{ЭЭС2}}$  – сопротивление энергосистемы ЭЭС2;

$X_{\text{Л}}$  – сопротивление ЛЭП;

$d$  – угол между векторами ЭДС ЭЭС1 и ЭЭС2.

При  $d = 0^\circ$  или  $360^\circ$  ток  $I_{a.p.} = 0$ ; при  $d = 180^\circ$  ток  $I_{a.p.} = \max$ .

Расчетное выражение мощности в ЛЭП

$$P_{a.p.} = \frac{E_{\text{ЭЭС1}} \cdot E_{\text{ЭЭС2}}}{X_{\text{ЭЭС1}} + X_{\text{Л}} + X_{\text{ЭЭС2}}} \cdot \sin d. \quad (60)$$

Из выражения (60) 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, определяется из уравнения

$$P_{ДВ} = \frac{U \cdot E_{ДВ}}{X_{экв}} \cdot \sin d, \quad (61)$$

где  $U$  – напряжение на шинах энергосистемы;

$E_{ДВ}$  – ЭДС электродвигателя;

$X_{экв}$  – эквивалентное сопротивление, включающее сопротивление электродвигателя и всех элементов питающей сети;

$d$  – фазовый угол между ЭДС электродвигателя и напряжением энергосистемы.

Характеристика зависимости мощности  $P_{ДВ}$  от угла  $d$  (рисунок 21) показывает, что мощность электродвигателя при увеличении угла  $d$  сначала возрастает, достигая максимума при  $d = 90^\circ$  (величины  $E_{ДВ}$  и  $U$  считают постоянными), а затем падает.

Максимум мощности при угле  $90^\circ$  зависит от сопротивления питающей сети.

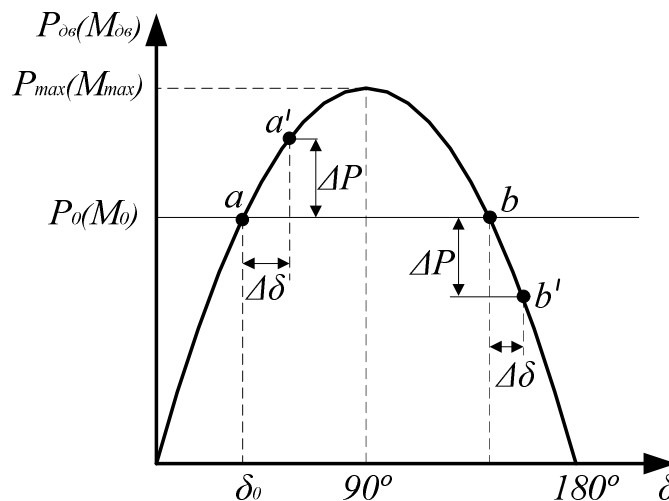


Рисунок 21 – Угловая характеристика синхронного двигателя

14.2.2.2 При синхронной частоте вращения относительные значения мощности двигателя и момента численно равны, поэтому кривая  $P = f(d)$  является и характеристикой вращающего момента двигателя.

Характеристика момента сопротивления изображена прямой линией  $P_0 = f(d)$ . Точки пересечения  $a$  и  $b$  определяют возможные режимы работы двигателя, однако устойчиво двигатель может работать только в точке  $a$  (соответствует углу  $d_0$ ). При работе в точке  $a$  и случайном кратковременном увеличении угла  $d$  на  $\Delta d$  увеличивается на  $\Delta P$  и электромагнитный момент синхронного двигателя, под влиянием которого ротор несколько ускоряется. При этом угол  $d$  уменьшается и, после нескольких колебаний, возвращается

к значению  $d_0$ . При случайном кратковременном уменьшении угла  $d$  ротор несколько притормаживается, угол  $d$  возрастает и, после нескольких колебаний, вновь возвращается к значению  $d_0$ . Если подобное кратковременное увеличение угла на  $\Delta d$  произойдет в точке  $b$ , то электромагнитный момент не увеличится, а уменьшится. Это вызовет дальнейшее увеличение угла  $d$ , в результате чего двигатель выйдет из синхронизма.

14.2.2.3 Восходящая ветвь характеристики на рисунке 21 – 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  $\cos j$  двигателя. Чем меньше загрузка двигателя и чем больше катановое отношение  $\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$ , тем больше запас устойчивости.

### 14.2.3 Динамическая устойчивость синхронных двигателей

14.2.3.1 Рассматривают случай внезапного возмущения во внешней сети, например, близкого трехфазного КЗ на одной из линий W1 – W5 (рисунк 22).

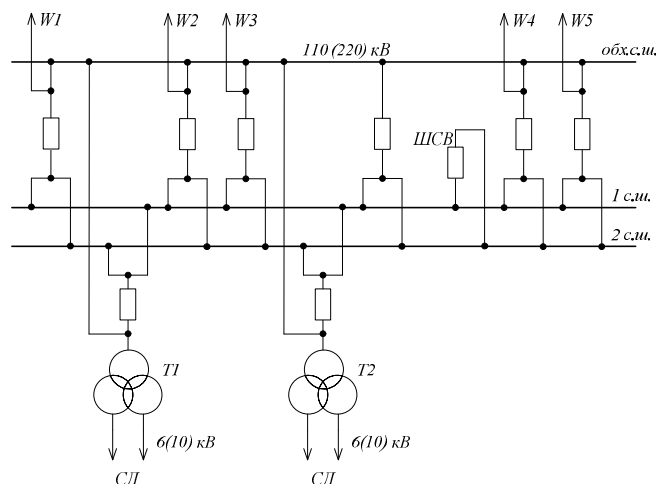
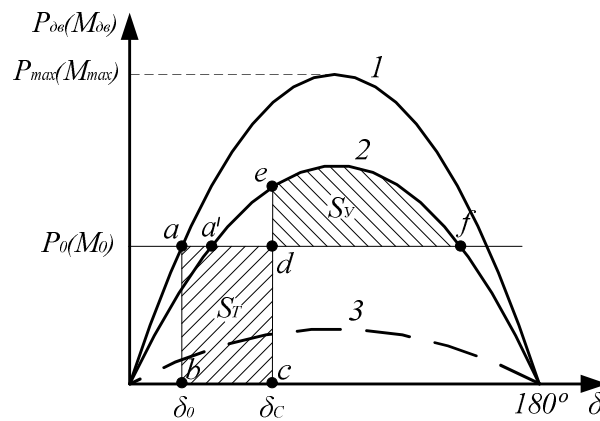


Рисунок 22 – Типовая схема подстанции 110 (220) кВ с синхронной нагрузкой

Синхронный двигатель работал устойчиво с моментом сопротивления на валу  $M_0$  и внутренним углом  $d_0$  (рисунк 23).

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  $d_0$  до  $d_c$ .

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.



- 1 – угловая характеристика мощности до КЗ;  
 2 – характеристика, соответствующая режиму близкого КЗ;  
 3 – характеристика, соответствующая режиму удаленного КЗ

Рисунок 23 – Характеристики мощности синхронного двигателя в различных режимах

Энергия торможения двигателя соответствует площадке  $abcd$ , называемой площадкой торможения  $S_T$ . Площадку  $edf$  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.

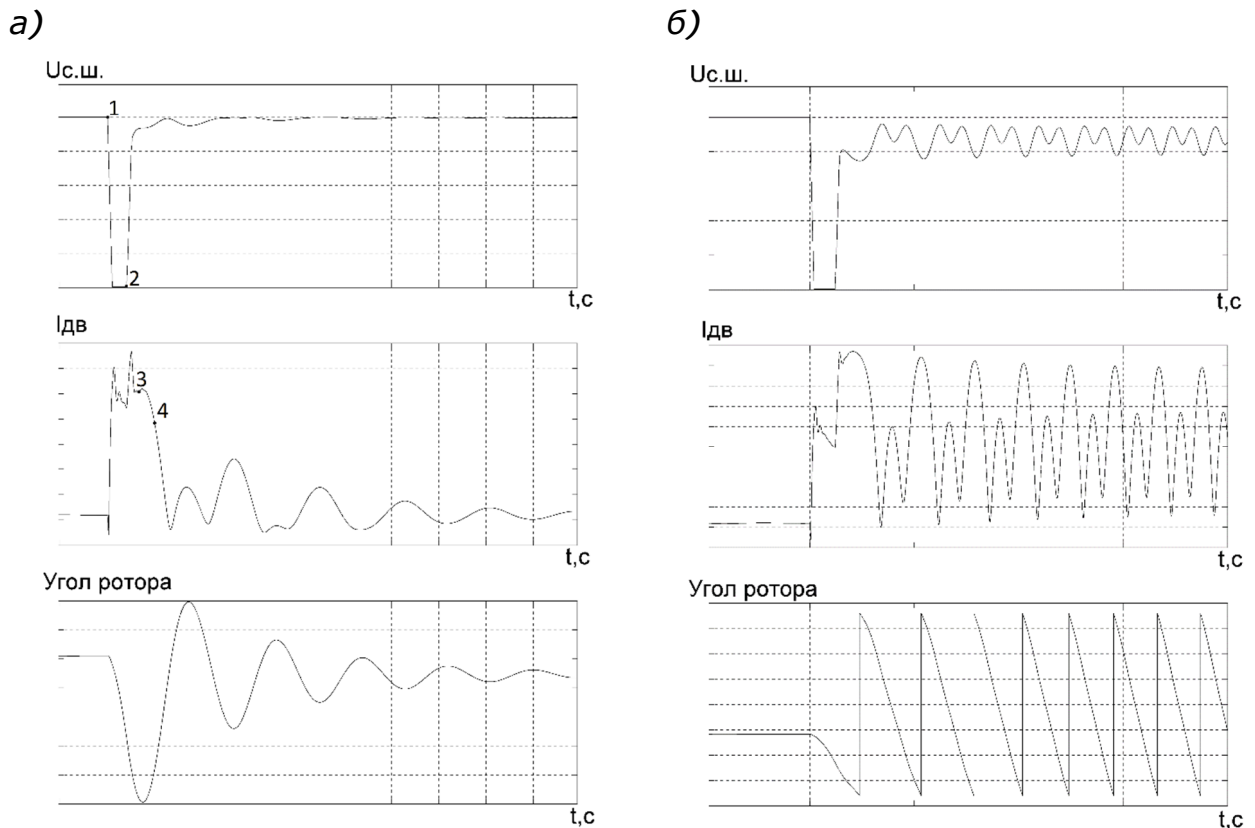
14.2.3.3 При удаленном трехфазном КЗ на смежной линии или при несимметричном КЗ, напряжение прямой последовательности в линии связи двигатель – энергосистема не снижается до нуля (линия 3 на рисунке 23).

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. Отличие 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  $d_0$  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 24 а), с потерей устойчивости – на рисунке 24 б);



$U_{c.ш.}$  – напряжение на шинах секции,  $I_{дв}$  – ток двигателя

- а) без потери устойчивости;  
 б) с потерей устойчивости

Рисунок 24 – Переходные процессы

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.

#### 14.2.4 Поведение узла нагрузки с СД при потере устойчивости

14.2.4.1 Для анализа поведения релейной защиты и противоаварийной автоматики рассматривают характер переходных процессов в ЛЭП и на вводах секций, от которых питаются СД, а также на сборных шинах.

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 24 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). Длительность 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

14.3.1 Для исключения асинхронных режимов работы с возбуждением рекомендуется использовать алгоритм ФОО (см. 14.1).

Данный алгоритм обеспечивает опережающее отключение СД, не допуская тем самым возникновения процессов, связанных с асинхронным ходом.

14.3.2 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).

14.3.3 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  $\Delta d_{сраб}$ , рад, заданной уставки

$$\Delta d_{сраб} = 2,8 - 1,1 \cdot \frac{P_{доав}}{P_{ном}}, \quad (62)$$

где  $P_{доав}$  – мощность синхронного двигателя в предаварийном режиме;

$P_{ном}$  – номинальная мощность синхронного двигателя.

При этом приращение угла  $\Delta d_{сраб}$ , рад, процессор терминала рассчитывает во время переходного процесса по формулам

$$\Delta d = \int_{t_0}^t s dt, \quad (63)$$

$$s = \frac{1}{T_J} \int_{t_0}^t (P_{доав} - P - R_{экс} \cdot \sum i^2) \cdot dt, \quad (64)$$

где  $s$  – скольжение ротора СД в текущий момент времени;

$P$  – текущая мощность СД в переходном процессе;

$R_{экс}$  – 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.

14.3.4 Команда на отключение двигателя формируется при срабатывании грубой ступени алгоритма ФОО.

Если 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 23).

Для устойчивой работы двигателя должно выполняться соотношение

$$\frac{s_y - s_T}{s_y} \geq k_D, \quad (65)$$

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

$$\begin{cases} P < P_{доав} \\ U < 0,8 \cdot U_{ном} \\ I > 1,5 \cdot I_{ном} \end{cases} \quad (66)$$

#### 14.4 Расчет уставок алгоритма ФОО

14.4.1 Уставку по номинальной активной мощности  $P_{ном}$ , кВт, рассчитывают по формуле

$$P_{ном} = \frac{1000 \cdot P_{ном.дв}}{K_I \cdot K_U}, \quad (67)$$

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

$K_I$  – коэффициент трансформации ТТ;

$K_U$  – коэффициент трансформации ТН.

14.4.2 Постоянную инерции двигателя совместно с приводом  $T_J$ , с, определяют по формуле

$$T_J = \frac{GD_{дв}^2 \cdot n_{ном.дв}^2 + GD_{мех}^2 \cdot n_{ном.мех}^2}{365 \cdot P_{ном.дв}}, \quad (68)$$

где  $GD_{дв}^2$  – собственный маховый момент СД, т·м<sup>2</sup>;

$n_{ном.дв}$  – номинальная частота вращения СД, об/мин;

$GD_{мех}^2$  – маховый момент приводного механизма, т·м<sup>2</sup>;

$n_{ном.мех}$  – номинальная частота вращения приводного механизма, об/мин;

$P_{ном.дв}$  – номинальная мощность СД, кВт.

Например, для газоперекачивающих агрегатов с СТД-12500-2  $T_J = 3,33$  с, а с СТД-4000-2  $T_J = 3,25$  с.

14.4.3 Эквивалентное сопротивление активных потерь в СД во время КЗ  $R_{эkv}$ , Ом, определяют по формуле

$$R_{эkv} = (R_{эkv.дв} + R_{эkv.сети}) \cdot \frac{K_I}{K_U}, \quad (69)$$

где  $R_{эkv.дв}$  – приведенное к напряжению статора эквивалентное сопротивление активных потерь в СД, Ом;

$R_{эkv.сети}$  – активное сопротивление внешней сети от зажимов СД до точки подключения измерительных ТН, Ом;

$K_I$  – коэффициент трансформации ТТ;

$K_U$  – коэффициент трансформации ТН.

14.4.4 Эквивалентное сопротивление активных потерь рассчитывают по паспортным данным СД. Значения  $R_{эkv.дв}$  для некоторых типов СД приведены в таблице 5.

Таблица 5

Тип СД	Номинальное напряжение, кВ	$R_{э\text{кв.дв}}$ , 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 (так называемого 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  $A_{\text{кол}}$ .

Возврат ступени защиты в исходное состояние производится в том случае, если очередное колебание активной мощности, превышающее заданную уставку, не зафиксировано в течение 10 с.

15.3 В алгоритме ЗКН предусмотрено шесть различных режимов работы (рисунок 25).

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 ЗКН1), либо не выявляет и тогда возвращается к первому режиму.

Если во втором режиме было выявлено колебание нагрузки (произошло срабатывание ЗКН1), алгоритм переходит в третий режим, когда в течение 10 с защита ожидает окончания переходного процесса после срабатывания ЗКН1. 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 ЗКН2). 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 ЗКН2). 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.

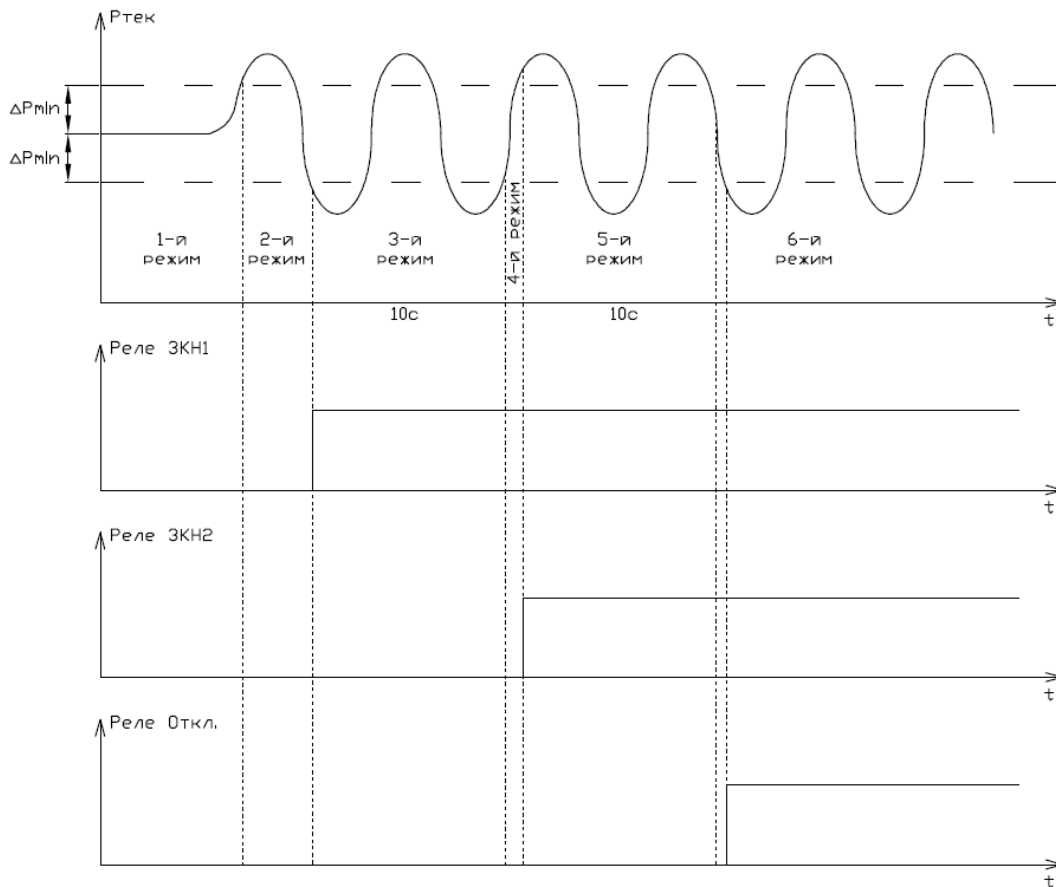


Рисунок 25 – Режимы работы ЗКН

Шестой режим аналогичен четвертому режиму. При выявлении колебания нагрузки формируется команда на срабатывание 3-й степени 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  $A_{кол}$ , %, вычисляемое по формуле

$$A_{кол} = \frac{\Delta P_{мин}}{P_{ном.дв}} \cdot 100, \quad (70)$$

где  $\Delta P_{мин}$  – минимальная амплитуда колебаний мощности синхронного двигателя, кВт;

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

## 16 Рекомендации по применению защит

16.1 Рекомендации по применению защит электродвигателей приведены в таблице 6.

8 Таблица 6 – Рекомендации по применению защит

Вид защиты	Вид потребителя		
	Однокоростной 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	Применяется для резервирования ЗПП
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		

**Библиография**

- 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. М.: СПО ОРГРЭС, 2003.
- 3 Корогодский В.И., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1987.
- 4 ГОСТ 7746-2015. Межгосударственный стандарт. Трансформаторы тока. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2016.
- 5 Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. М.: «Энергия», 1980.
- 6 Шабад М.А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. Экспериментальная и расчетные проверки, конспект лекций. СПб: ПЭИПК, 2010.
- 7 ГОСТ Р 52776-2007. Национальный стандарт РФ. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики (отменен с 01.03.2016). М.: Стандартинформ, 2008.
- 8 Шабад М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6–35 кВ. СПб: ПЭИПК, 2001.
- 9 Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных двигателей. М.: «Энергия», 1977.
- 10 Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Кибель В.М. и др. Трансформаторы тока. Л.: Энергоатомиздат, 1989.
- 11 Беляев А.В. Противоаварийное управление в узлах нагрузки с синхронными двигателями большой мощности. М.: НТФ «Энергопресс», 2004.
- 12 Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1998.
- 13 ГОСТ 183-74. Межгосударственный стандарт. Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия (с Изменениями № 1, 2) (отменен с 01.07.2010). М.: Издательство стандартов, 1993.
- 14 Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М. Энергоатомиздат, 1984.
- 15 Соловьев А.Л. Защита генераторов малой и средней мощности терминалами «Сириус-ГС». М.: НТФ «Энергопресс», 2009.
- 16 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»**

**Шейкин И.С.**

Технический директор

Гондуров С.А.

Заведующий кафедрой Релейной защиты и автоматики электрических станций, сетей и энергосистем Петербургского энергетического института повышения квалификации,  
канд. техн. наук

Соловьёв А.Л.

Главный специалист,  
канд. техн. наук

Михалёв С.В.

Ведущий инженер-системотехник

Ильинский А.С.

**Нормоконтроль:**

Начальник бюро стандартизации и технической документации

Ермоленко Л.М.

