

Методические указания по расчету уставок защит синхронных и асинхронных электродвигателей 6 – 10 кВ

ДИВГ.648228.001 ДЗ

РАЗРАБОТАНО:

Научно-технический руководитель работы:

Заведующий кафедрой Релейной защиты и автоматики
электрических станций, сетей и систем
Петербургского Энергетического Института Повышения Квалификации
к.т.н. СОЛОВЬЁВ А. Л.

Исполнители:

ООО «НТЦ «Механотроника»

Начальник отдела системотехники,
ПИРОГОВ М. Г.

Ведущий инженер-системотехник,
МИХАЛЁВ С. В.

Содержание

Методические указания по расчету уставок защит синхронных и асинхронных электродвигателей 6 – 10 кВ	1
Введение.....	4
1. Расчеты защит от междуфазных замыканий	5
1.1 Требования ПУЭ к защите электродвигателей от междуфазных замыканий	5
1.2 Методика расчета уставок максимальной токовой отсечки (ТО)	7
1.3 Варианты исполнения дифференциальной защиты с торможением (ДЗТ).....	9
1.4 Методика расчета уставок дифференциальной защиты (ДЗТ и ДТО).....	9
1.5 Методика выбора и расчета уставок защит двигателя с плавным пуском.....	13
1.6 Пример расчета защиты от междуфазных замыканий для асинхронного двигателя (с применением ДЗТ с током срабатывания больше номинального тока электродвигателя).....	15
1.7 Пример расчета защиты от междуфазных замыканий для асинхронного двигателя (с применением ДТО с током срабатывания меньше номинального тока электродвигателя).....	18
1.8 Пример расчета защиты от междуфазных замыканий для синхронного двигателя (с применением ДТО с током срабатывания меньше номинального тока электродвигателя).....	21
1.9 Пример расчета защиты от междуфазных замыканий для синхронного двигателя с реакторным пуском (с применением ДТО с током срабатывания меньше номинального тока электродвигателя).....	24
1.10 Пример расчета защиты от междуфазных замыканий для асинхронного двухскоростного двигателя (с применением ТО)	27
1.11 Пример расчета защиты от междуфазных замыканий для асинхронного двигателя с устройством плавного пуска (с применением ДЗТ с током срабатывания больше номинального тока двигателя).....	29
2 Расчеты защит от замыканий на землю	34
2.1 Требования ПУЭ к защите электродвигателей от однофазных замыканий на землю	34
2.2 Исполнение защиты от замыканий на землю с применением блоков БМРЗ	34
2.3 Методика расчета уставок защиты от однофазных замыканий на землю.....	34
2.4 Расчет уставок защиты от двойных замыканий на землю	38
2.5 Пример расчета защиты от замыканий на землю для асинхронного двигателя.....	39
2.6 Направленная токовая защита от однофазных замыканий на землю	40
2.7 Пример расчета защиты от замыканий на землю для синхронного двигателя.....	43
3 Расчеты защит минимального напряжения	44
3.1 Требования ПУЭ к защитами минимального напряжения электродвигателей	44
3.2 Исполнение защиты минимального напряжения с применением блоков БМРЗ.....	45
4 Расчеты защиты от потери питания (ЗПП).....	45
4.1 Требования ПУЭ к защитами от потери питания электродвигателей	45
4.2 Выполнение защиты от потери питания синхронных электродвигателей на базе блоков БМРЗ.....	46
5 Защита от неполнофазного режима работы электродвигателя	47
5.1 Требования ПУЭ к защите двигателей от неполнофазных режимов работы	47
5.2 Исполнение защиты от неполнофазного режима на базе блоков БМРЗ и выбор её уставок	47

6 Защита электродвигателей от перегрузок.....	48
6.1 Требования ПУЭ к защите электродвигателей от перегрузок.....	48
6.2 Исполнение защиты двигателей от перегрузок на базе блоков БМРЗ.....	48
6.3 Методика расчета уставок защиты от симметричных перегрузок.....	49
6.4 Методика выбора уставок защиты от затянутого пуска.....	53
6.5 Методика расчета уставок тепловой защиты электродвигателей.....	53
6.6 Экспериментальное определение постоянных времени тепловой модели двигателя.....	59
7 Расчет защиты синхронных двигателей от асинхронного режима.....	62
7.1 Требования ПУЭ к защите синхронных двигателей от асинхронного режима.....	62
7.2 Выполнение защиты синхронных двигателей от асинхронного режима (потери возбуждения) на базе терминалов БМРЗ.....	62
7.3 Пример расчета защиты синхронного двигателя от асинхронного режима.....	64
8 Выбор уставок устройства резервирования при отказе выключателя (УРОВ).....	65
9 Защита минимального тока электродвигателя.....	66
10 Функция опережающего отключения (ФОО).....	67
10.1 Анализ устойчивости узлов нагрузки с синхронными электродвигателями [17].....	67
10.2 Исполнение функции опережающего отключения на базе терминала БМРЗ-ДС.....	72
10.3 Методика расчета уставок функции опережающего отключения.....	74
11 Защита от колебаний нагрузки.....	75
12 Сводная таблица по применению защит.....	77
Список использованных источников.....	79

Введение

Настоящие методические указания (МУ) составлены в соответствии с требованиями и рекомендациями, изложенными в «ПУЭ» (глава 3.2, глава 5.3) [1], с учётом особенностей построения и функционирования цифровых устройств релейной защиты типа БМРЗ, а так же опыта их эксплуатации. При разработке настоящих МУ учитывался подход и практика принятая в отечественной электроэнергетике.

В настоящих МУ дан комплексный подход к расчету уставок:

- защит от междуфазных замыканий (дифференциальной токовой отсечки ДТО и дифференциальной защиты с торможением ДЗТ);
- максимальной токовой отсечки (ТО);
- защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ);
- тепловой модели, защиты от обрыва фазы, защиты от блокировки ротора;
- защиты от несимметричных режимов (ЗНР);
- защиты минимального напряжения (ЗМН);
- минимальной токовой защиты (МинТЗ);
- функции опережающего отключения (ФОО);
- защиты от колебаний нагрузки (ЗКН);
- выбор тока срабатывания устройства резервирования от отказа выключателя (УРОВ).

Рассмотрен вопрос проверки чувствительности ДТО, ДЗТ, ТО, ОЗЗ.

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

Расчет уставок проводится в первичных значениях. После окончания расчета все значения уставок переводятся во вторичные значения, исходя из единиц измерения уставок защиты конкретного изделия описанных в соответствующих руководствах по эксплуатации.

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

Перед установкой уставок блока необходимо убедиться в том, что трансформаторы тока удовлетворяют требованиям по их применению в цепях релейной защиты и проверены в соответствии с РД 153-34.0-35.301-2002 [2].

1. Расчеты защит от междуфазных замыканий

1.1 Требования ПУЭ к защите электродвигателей от междуфазных замыканий

Согласно требованиям ПУЭ [1] для защиты электродвигателей от многофазных замыканий в случаях, когда не применяются предохранители, должна предусматриваться:

1. Токовая однорелейная отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах, с реле прямого или косвенного действия, включенным на разность токов двух фаз, - для электродвигателей мощностью менее 2 МВт.
2. Токовая двухрелейная отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах, с реле прямого или косвенного действия - для электродвигателей мощностью 2 МВт и более, имеющих действующую на отключение защиту от однофазных замыканий на землю, а также для электродвигателей мощностью менее 2 МВт, когда защита по п. 1 не удовлетворяет требованиям чувствительности или когда двухрелейная отсечка оказывается целесообразной по исполнению комплектной защиты или применяемого привода с реле прямого действия. При отсутствии защиты от однофазных замыканий на землю токовая отсечка электродвигателей мощностью 2 МВт и более должна выполняться трехрелейной с тремя трансформаторами тока. Допускается защита в двухфазном исполнении с дополнением защиты от двойных замыканий на землю, выполненная с помощью трансформатора тока нулевой последовательности и токового реле.
3. Продольная дифференциальная токовая защита - для электродвигателей мощностью 5 МВт и более, а также менее 5 МВт, если установка токовых отсечек по п. 1 и 2 не обеспечивает выполнения требований чувствительности; продольная дифференциальная защита электродвигателей при наличии на них защиты от замыканий на землю должна иметь двухфазное исполнение, а при отсутствии этой защиты - трехфазное, с тремя трансформаторами тока. Допускается защита в двухфазном исполнении с дополнением защиты от двойных замыканий на землю, выполненной с помощью трансформатора тока нулевой последовательности и токового реле. Для электродвигателей мощностью 5 МВт и более, выполненных без шести выводов обмотки статора, должна предусматриваться токовая отсечка.

Предусмотренное ПУЭ выполнение отсечки в виде однорелейной схемы нецелесообразно в случае применения микропроцессорного устройства РЗА, так как в нём программно реализовано необходимое количество цифровых реле максимального тока для каждой фазы, к тому же однорелейная отсечка включенная на разность токов двух фаз имеет в $\sqrt{3}$ раз худшую чувствительность по сравнению с двухрелейной схемой [6]. Срабатывание ТО в терминалах БМРЗ осуществляется по максимальному из фазных токов питания двигателя.

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

1. Токовая отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах - для электродвигателей мощностью до 2 МВт. При схеме соединения обмоток трансформатора звезда - треугольник отсечка выполняется из трех токовых реле: двух включенных на фазные токи и одного включенного на сумму этих токов. При невозможности установки трех реле (например, при ограниченном числе реле прямого действия) допускается схема с двумя реле, включенными на соединенные треугольником вторичные обмотки трех трансформаторов тока.
2. Дифференциальная отсечка в двухрелейном исполнении, отстроенная от бросков тока намагничивания трансформатора, - для электродвигателей мощностью более 2 МВт, а также 2 МВт и менее, если защита по п. 1 не удовлетворяет требованиям чувствительности при междуфазном КЗ на выводах электродвигателя.
3. Продольная дифференциальная токовая защита в двухрелейном исполнении с промежуточными насыщающимися трансформаторами тока - для электродвигателей мощностью более 5 МВт, а также 5 МВт и менее, если установка отсечек по п. 1 и 2 не удовлетворяет требованиям чувствительности.

Согласно «ПУЭ» [1] оценка чувствительности дифференциальных защит должна производиться при помощи коэффициента чувствительности, определяемого как отношение расчетного значения дифференциального тока при металлическом КЗ в пределах защищаемой зоны к величине дифференциального тока, при котором происходит срабатывание защиты. Соответственно коэффициент чувствительности ТО - отношение расчетного значения фазного тока при металлическом КЗ в пределах защищаемой зоны к величине фазного тока при котором происходит срабатывание защиты.

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

1.2 Методика расчета уставок максимальной токовой отсечки (ТО)

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

1.2.2 Отстройка ТО выполняется от двух параметров:

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

1.2.3 В случае расчета уставок для синхронного двигателя следует учитывать, что машина запускается в асинхронном режиме. Когда скорость вращения достигает значения близкой к синхронной - выполняют переключение обмотки возбуждения с резистора на напряжение возбуждения и двигатель втягивается в синхронизм. Бросок пускового тока определяется аналогично асинхронному электродвигателю.

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

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

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

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

η - номинальный к.п.д. электродвигателя;

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

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

По [3] либо по паспортным данным трансформатора тока определяем предельную кратность тока, при которой трансформатор сохраняет погрешность не более 10 %.

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

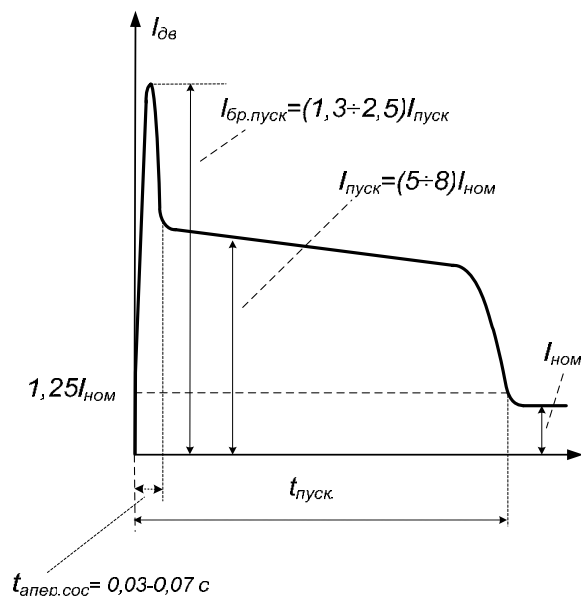


Рисунок 1 - Пусковая характеристика электродвигателя

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

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

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

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

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

$$I_{бр.прям.пуск} = k_{анер} \cdot k_{пуск} \cdot I_{ном.дв} \text{ А,} \quad (3)$$

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

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

Определяем полное пусковое индуктивное сопротивление двигателя (см. [5], стр. 22):

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

Определяем максимальный бросок пускового тока двигателя при реакторном пуске:

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

где x_c - индуктивное сопротивление сети, x_p - индуктивное сопротивление реактора.

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

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

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

1.2.10 Выполняем проверку, что при токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>}$ трансформаторы тока обеспечивают погрешность не более 10% (см. «ПУЭ» [1] п.3.2.29). В случае невыполнения указанного требования необходимо принять меры для его выполнения.

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

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

$$k_q^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{>>>}} \text{ А,} \quad (8)$$

где $I_{кз}^{(3)}$ - значение тока трехфазного короткого замыкания на вводах питания электродвигателя;

Защита от междуфазных КЗ работает без выдержки времени.

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

1.3 Варианты исполнения дифференциальной защиты с торможением (ДЗТ)

Существует две концепции выполнения дифференциальной защиты электродвигателей:

- *дифференциальная защита с током срабатывания меньше номинального тока защищаемого электродвигателя.* Такой способ выполнения защиты применяется для минимизации объема повреждений в электродвигателях при внутренних междуфазных коротких замыканиях в статорной обмотке машины и допускает неправильное действие защиты при обрыве и неисправности токовых цепей, или при неисправности одного из трансформаторов тока дифференциальной защиты электродвигателя. Такая настройка защиты, рекомендована к применению на объектах, где есть обслуживающий персонал.

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

Защита работает без выдержки времени.

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

1.4 Методика расчета уставок дифференциальной защиты (ДЗТ и ДТО)

1.4.1 Характеристика срабатывания дифференциальной защиты приведена на рисунке 2.

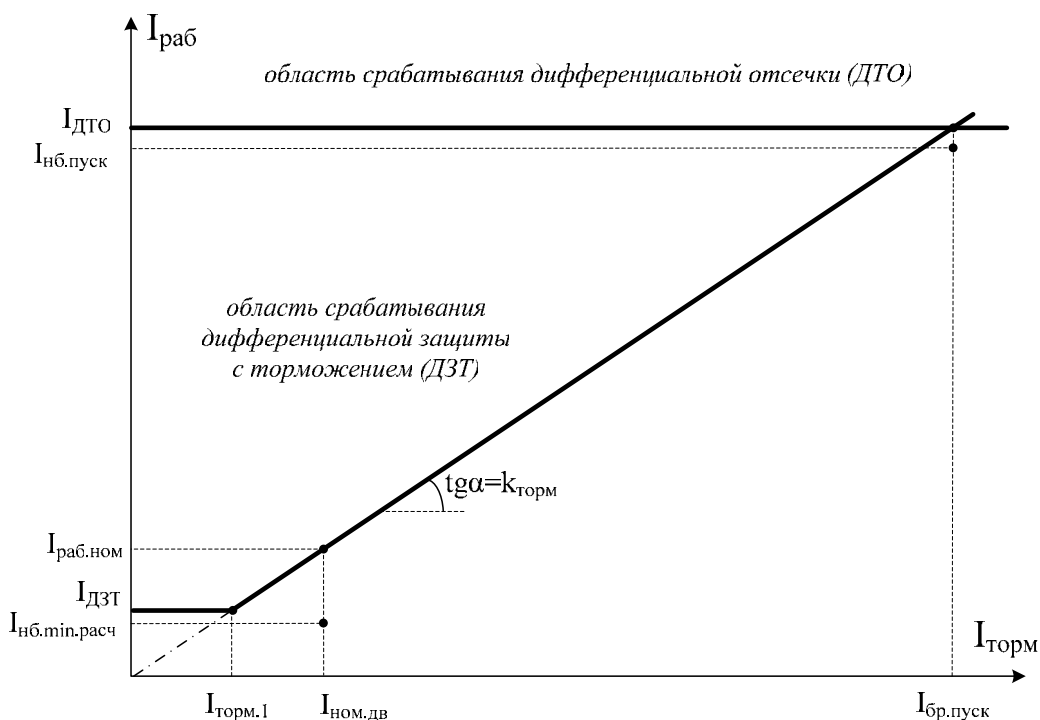


Рисунок 2 - Характеристика дифференциальной защиты

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

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

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

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

η - номинальный к.п.д. электродвигателя;

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

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

По [3] либо по паспортным данным ТТ определяем предельную кратность тока, при которой ТТ сохраняет погрешность не более 10%.

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

$$I_{бр.пуск} = k_{анер} \cdot k_{пуск} \cdot I_{ном.дв} \text{ А}, \quad (10)$$

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

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

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

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

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

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

Определяем полное пусковое индуктивное сопротивление двигателя (см. [5], стр. 22):

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

Определяем максимальный бросок пускового тока двигателя при реакторном пуске:

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

1.4.3.3 В случае участия двигателя в самозапуске, полученный ток $I_{бр.пуск}$ необходимо увеличить в 1,4 раза.

1.4.4 Определяем погрешности трансформатора тока (ТТ):

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

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

Погрешности могут быть рассчитаны известными методами, например, по типовой кривой намагничивания для электротехнической стали (рисунок 3).

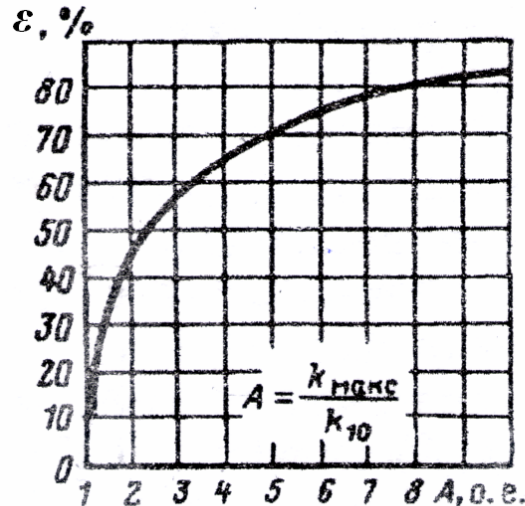


Рисунок 3 - Типовая кривая намагничивания (см. [4], стр. 23, рис. 12 б)

На типовой кривой намагничивания показаны параметры:

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

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

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

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

где γ - **основная** относительная погрешность измерения дифференциального тока устройством РЗА (складывается из погрешностей измерения двух токовых каналов, погрешность каждого - 2,5%);

δ - технологический запас, обусловленный наличием дополнительной погрешности измерения терминала. Принимается равным половине основной погрешности измерения дифференциального тока ($\delta = 2,5\%$).

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

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

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

1.4.7 Выполняем расчет коэффициента торможения защиты:

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

Округляем коэффициент торможения до сотых в большую сторону.

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

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

1.4.9 Определяем максимальное значение тока небаланса при номинальном токе двигателя:

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

1.4.10 Определяем значение уставки $I_{ДЗТ}$:

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

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

$I_{ДЗТ}$ выбирается меньше либо больше номинального тока электродвигателя в зависимости от типа потребителя (см. п. 1.2).

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

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

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

1.4.12 Выдержка времени ДЗТ и ДТО должна быть задана нулевой.

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

$$k_{ч}^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{ДЗТ}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{кз}^{(3)}}{I_{ДЗТ}}. \quad (21)$$

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

1.5 Методика выбора и расчета уставок защит двигателя с плавным пуском

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

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

Организация защит от междуфазных замыканий двигателя с устройством плавного пуска показана на рисунке 4.

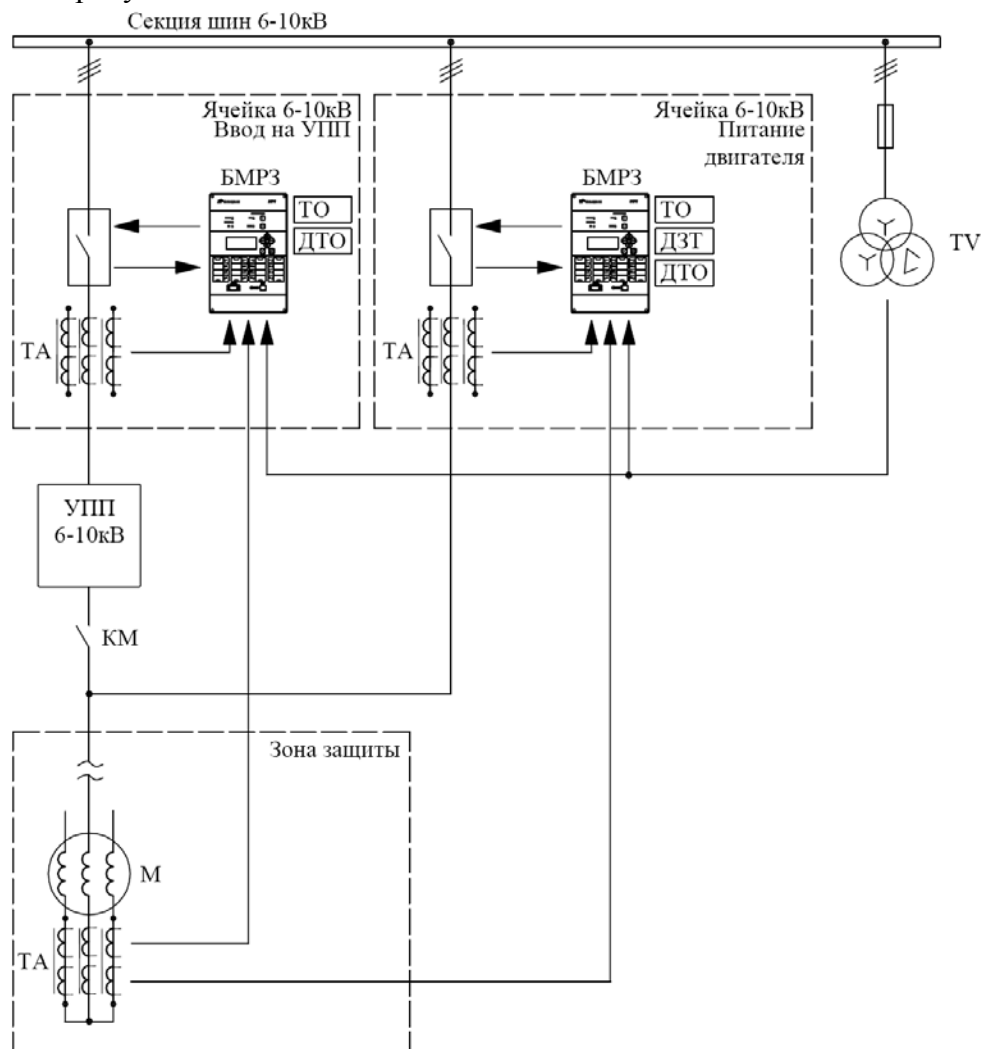


Рисунок 4 - Рекомендуемое исполнение защит двигателя с плавным пуском

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

Расчет уставок ТО, ДЗТ и ДТО, установленных в ячейке питания двигателя от сети аналогичен расчету уставок защит для прямого пуска, при этом защита должна быть отстроена от тока самозапуска (см. п.1.3.6, п.1.3.8). Дифференциальная защита в ячейке питания, во избежание ложного срабатывания, **должна** выводиться на время пуска электродвигателя, например, блокироваться по факту снижения со стороны питания электродвигателя максимального из трёх фазных токов ниже значения равного 75% холостого хода ЭД.

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

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

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

Уставка срабатывания ДТО определяется по формуле:

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

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

Применение ДЗТ в ячейке питания УПП не целесообразно.

1.6 Пример расчета защиты от междуфазных замыканий для асинхронного двигателя (с применением ДЗТ с током срабатывания больше номинального тока электродвигателя)

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

Данные для расчета:

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

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

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

КПД: $\eta = 0,955$

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

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

Пуск двигателя прямой от напряжения питающей сети.

Двигатель участвует в самозапуске.

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

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

1.6.2 Определяем значение номинального тока электродвигателя:

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

Выбираем трансформаторы тока стороны питания электродвигателя: ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $k_{тр} = 150/5$. Трансформатор тока ТЛМ10-5-82 имеет погрешность не более 10% при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 150 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом) до 17 (до 2250 А) (см. [3], стр.118, рис. П2-6).

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

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

1.6.4 Выбираем ток срабатывания ТО $I_{>>>} = 1650 \text{ А}$

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

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

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

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

1.6.7 Выдержку времени защиты устанавливаем нулевую.

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

1.6.9 Выбираем трансформаторы тока, устанавливаемые со стороны нейтрали электродвигателя аналогичные трансформаторам, устанавливаемым со стороны питания – ТЛМ10-5-82. Трансформатор тока ТЛМ10-5-82 имеет погрешность не более 10% при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 150 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом) до 12 (до 1800 А) (см. [3], стр.118, рисунок П2-6).

Трансформаторы удовлетворяют требованиям (см. «ПУЭ» [1] п.3.2.29) по установке в цепях дифференциальной защиты, поскольку обеспечивают погрешность не более 10% при номинальном токе двигателя.

1.6.10 По типовой кривой намагничивания для электротехнической стали (рисунок 3) определяем погрешности трансформатора тока (ТТ):

$\varepsilon_1 = 0,1$ - полная относительная погрешность ТТ установленных со стороны нейтрали электродвигателя в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей.

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

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

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

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

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

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

1.6.13 Выполняем расчет коэффициента торможения защиты:

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

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

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

1.6.14 Определяем максимальное значение тока небаланса при номинальном токе двигателя:

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

1.6.15 Определяем значение уставки $I_{ДЗТ}$:

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

$I_{ДЗТ}$ выбираем больше номинального тока электродвигателя $I_{ДЗТ} = 1,2 \cdot I_{ном.дв} \approx 135,8 \text{ А}$.

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

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

1.6.17 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимаются нулевыми.

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

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

Поскольку коэффициент чувствительности больше 2, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

1.6.19 Строим характеристику работы защиты.

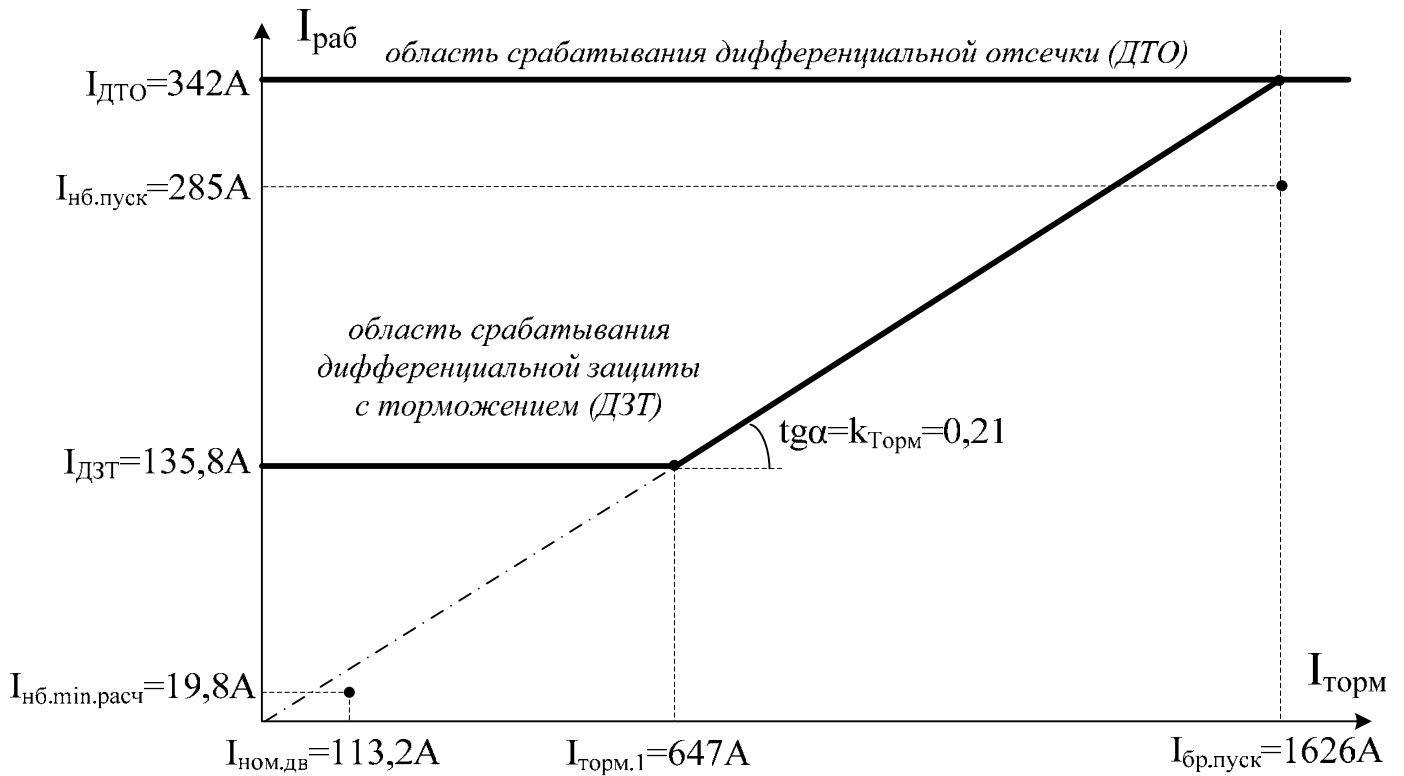


Рисунок 5 - Характеристика дифференциальной защиты двигателя серии А4 мощностью 1000 кВт.

1.7 Пример расчета защиты от междуфазных замыканий для асинхронного двигателя (с применением ДТО с током срабатывания меньше номинального тока электродвигателя)

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

Данные для расчета:

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

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

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

КПД: $\eta = 0,961$

Кратность пускового тока: $k_{пуск} = 7$

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

Пуск двигателя прямой от напряжения питающей сети.

Двигатель в самозапуске не участвует.

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

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

1.7.2 Определяем значение номинального тока электродвигателя:

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

Выбираем трансформаторы тока стороны питания электродвигателя: ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $k_{тр} = 300/5$. Трансформатор тока ТЛМ10-5-82 имеет погрешность не более 10% при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 300 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом) до 17 (до 5100 А) (см. [3], стр.118, рис. П2-6).

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

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

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

1.7.5 Поскольку при токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>} = 3091 \text{ А}$ трансформаторы тока обеспечивают погрешность не более 10%, они пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки.

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

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

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

1.7.7 Выдержку времени защиты устанавливаем нулевой.

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

1.7.9 Выбираем трансформаторы тока, устанавливаемые со стороны нейтрали электродвигателя аналогичные трансформаторам, устанавливаемым со стороны питания – ТЛМ10-5-82. Трансформатор тока ТЛМ10-5-82 имеет погрешность не более 10% при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 300 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом) до 12 (до 3600 А) (см. [3], стр.118, рисунок П2-6).

Трансформаторы удовлетворяют требованиям (см. «ПУЭ» [1] п.3.2.29) по установке в цепях дифференциальной защиты, поскольку обеспечивают погрешность не более 10% при номинальном токе двигателя.

1.7.10 По типовой кривой намагничивания для электротехнической стали (рисунок 3) определяем погрешности трансформатора тока (ТТ):

$\varepsilon_1 = 0,1$ - полная относительная погрешность ТТ установленных со стороны нейтрали электродвигателя в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей.

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

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

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

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

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

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

1.7.13 Выполняем расчет коэффициента торможения защиты:

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

Округляем коэффициент торможения до сотых в большую сторону.

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

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

1.7.14 Определяем максимальное значение тока небаланса при номинальном токе двигателя:

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

1.7.15 Определяем значение уставки $I_{ДЗТ}$:

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

$I_{ДЗТ}$ выбираем меньше номинального тока электродвигателя. Поскольку полученное минимально возможное значение $I_{ДЗТ}$ меньше минимального рекомендуемого:

$I_{ДЗТ} < 0,3 I_{ном.дв}$, принимаем:

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

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

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

1.7.17 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимаются нулевыми.

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

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

Поскольку коэффициент чувствительности больше 2, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

1.7.19 Строим характеристику работы защиты.

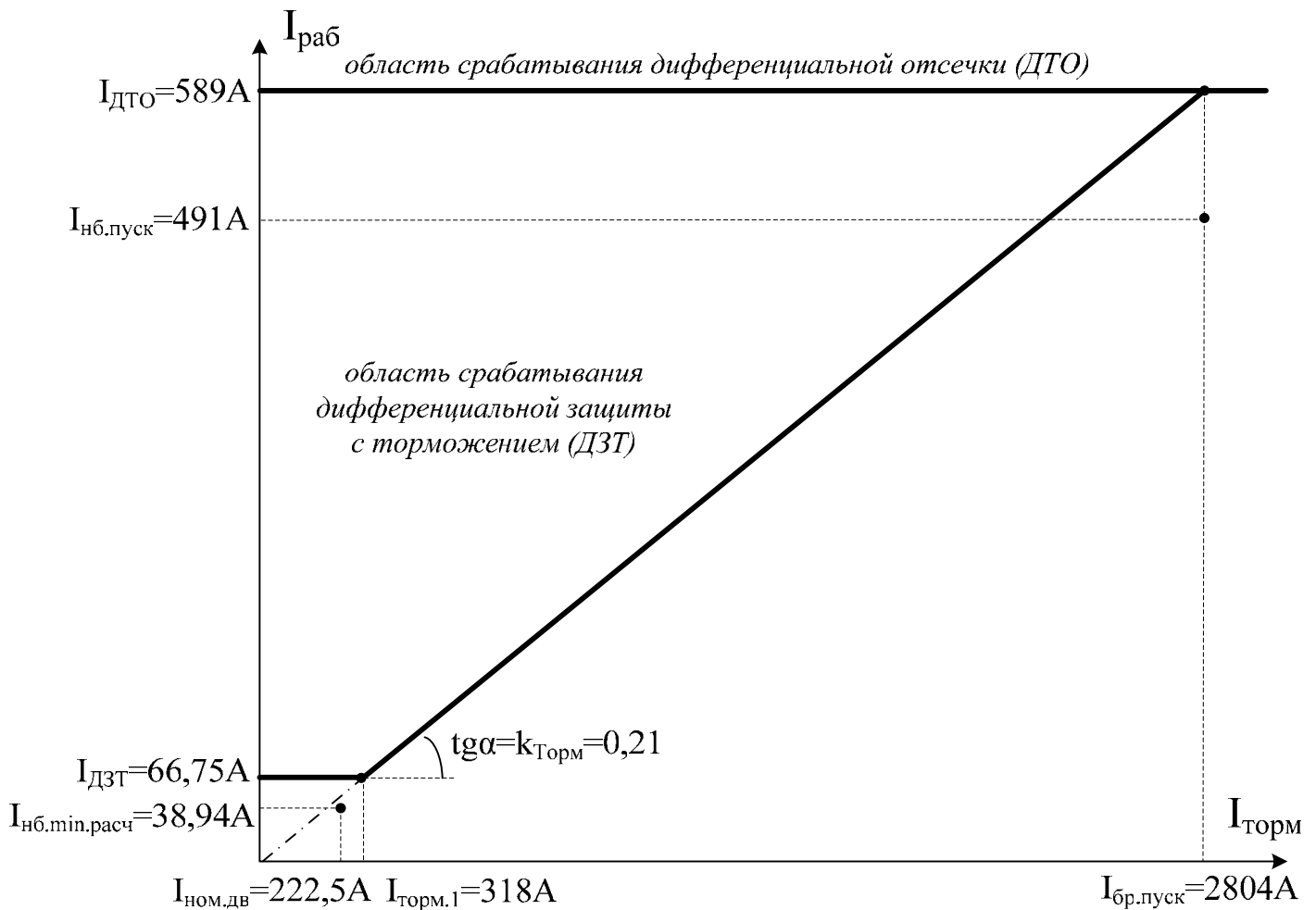


Рисунок 6 - Характеристика дифференциальной защиты двигателя ДАЗО-2000-6

1.8 Пример расчета защиты от междуфазных замыканий для синхронного двигателя (с применением ДТО с током срабатывания меньше номинального тока электродвигателя)

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

Данные для расчета:

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

Коэффициент мощности: $\cos \varphi = 0,9$ см. [11]

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

КПД: $\eta = 0,964$

Кратность пускового тока: $k_{пуск} = 6$

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

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

Двигатель не участвует в самозапуске.

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

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

1.8.1 Поскольку мощность двигателя более 5 МВт, для защиты данного двигателя от междуфазных замыканий требуется применение дифференциальной защиты.

Выполняем расчет ТО, поскольку планируется её применение в качестве резервной защиты.

1.8.2 Определяем значение номинального тока электродвигателя:

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

Выбираем трансформаторы тока стороны питания электродвигателя: ТЛМ-10 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $k_{тр} = 500/5$. Трансформатор тока ТЛМ-10 имеет погрешность не более 10 % (относительно номинального тока трансформатора, равного 500 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом) при кратности тока до 22 (до 11000 А) (см. [3], стр.118, рис. П2-6).

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

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

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

1.8.5 Поскольку при токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>} = 4730 \text{ А}$ трансформаторы тока обеспечивают погрешность не более 10%, они пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки.

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

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{кз}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10000 \text{ А} \approx 8660 \text{ А},$$
$$k_q^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{>>>}} = \frac{8660}{4600} \approx 1,88$$

1.8.7 Выдержку времени защиты принимаем равной нулю.

1.8.8 Выбираем трансформаторы тока, устанавливаемые со стороны нейтрали электродвигателя аналогичные трансформаторам, устанавливаемым со стороны питания – ТЛМ-10. Трансформатор тока ТЛМ-10 имеет погрешность не более 10 % при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 500 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом) до 15 (до 7500 А) (см. [3], стр.118, рис. П2-6).

Трансформаторы удовлетворяют требованиям (см. «ПУЭ» [1] п.3.2.29) по установке в цепях дифференциальной защиты, поскольку обеспечивают погрешность не более 10 % при номинальном токе двигателя.

1.8.9 По типовой кривой намагничивания для электротехнической стали (рисунок 3) определяем погрешности трансформатора тока (ТТ):

$\varepsilon_1 = 0,1$ - полная относительная погрешность ТТ установленных со стороны нейтрали электродвигателя в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей.

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

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

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

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

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

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

1.8.12 Выполняем расчет коэффициента торможения защиты:

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

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

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

1.8.13 Определяем максимальное значение тока небаланса при номинальном токе двигателя:

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

1.8.14 Определяем значение уставки $I_{ДЗТ}$:

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

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

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

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

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

1.8.16 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимаются нулевыми.

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

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

Поскольку коэффициент чувствительности больше 2, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

1.8.18 Строим характеристику работы защиты.

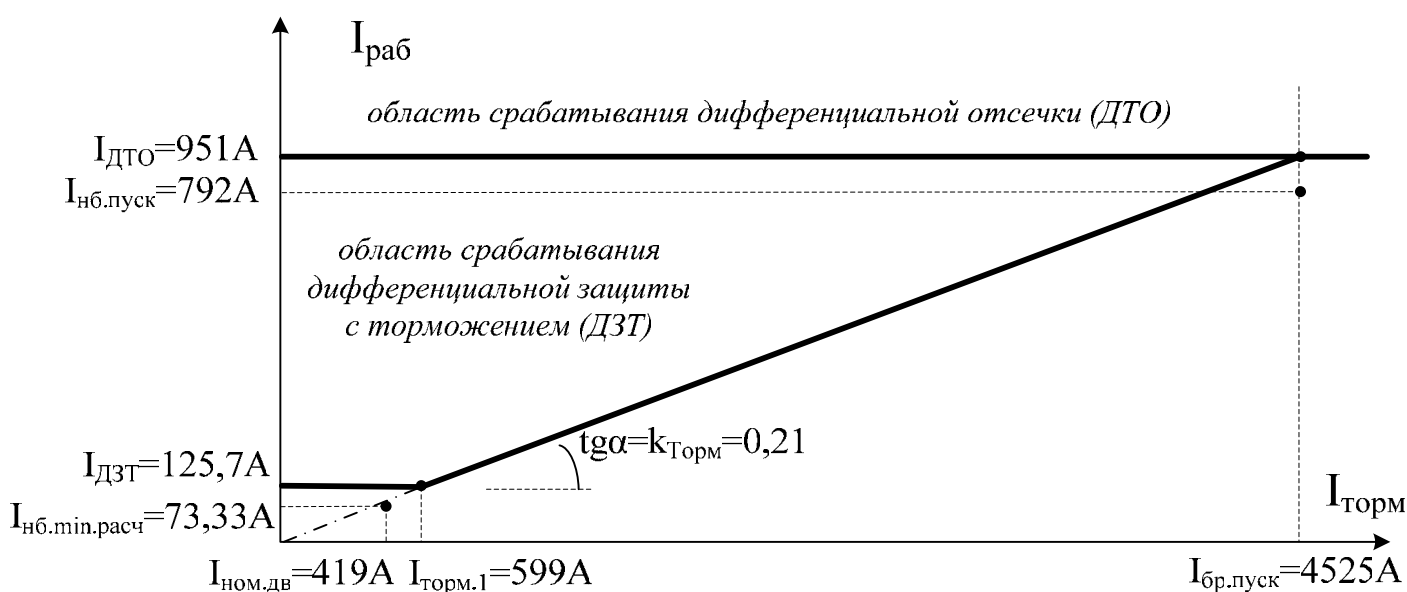


Рисунок 7 - Характеристика дифференциальной защиты двигателя СДНЗ мощностью 6300 кВт

1.9 Пример расчета защиты от междуфазных замыканий для синхронного двигателя с реакторным пуском (с применением ДТО с током срабатывания меньше номинального тока электродвигателя)

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

Данные для расчета:

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

Коэффициент мощности: $\cos \varphi = 0,9$ см. [11]

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

КПД: $\eta = 0,972$

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

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

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

Двигатель в самозапуске не участвует.

Длительно допустимый ток реактора: 1000 А

Номинальное индуктивное сопротивление реактора: 0,35 Ом

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

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

1.9.2 Определяем индуктивное сопротивление сети:

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

1.9.3 Определяем значение номинального тока электродвигателя:

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

Выбираем трансформаторы тока стороны питания электродвигателя ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $k_{тр} = 300/5$. Трансформатор тока ТЛМ10-5-82 имеет погрешность не более 10 % (относительно номинального тока трансформатора, равного 300 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом) при кратности тока до 17 (до 5100 А) (см. [3], стр.118, рис. П2-6).

1.9.5 Определяем максимальный бросок пускового тока электродвигателя при прямом пуске:

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

1.9.6 Определяем полное пусковое индуктивное сопротивление двигателя:

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

1.9.7 Определяем максимальный бросок пускового тока двигателя при реакторном пуске:

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

1.9.8 Выбираем ток срабатывания ТО $I_{>>>} = 1000 \text{ A}$.

1.9.9 Поскольку при токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>} = 1100 \text{ A}$ трансформаторы тока обеспечивают погрешность не более 10 %, они пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки (см. «ПУЭ» [1] п.3.2.29).

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

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1700 \text{ A} \approx 1472 \text{ A}$$
$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{кз}}^{(2)}}{I_{>>>}} = \frac{1472}{1000} \approx 1,47$$

1.9.11 Выдержку времени защиты принимаем равной нулю.

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

1.9.13 Выбираем трансформаторы тока, устанавливаемые со стороны нейтрали электродвигателя аналогичные трансформаторам, устанавливаемым со стороны питания – ТЛМ10-5-82. Трансформатор тока ТЛМ10-5-82 имеет погрешность не более 10 % при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 300 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом) до 12 (до 3600 А) (см. [3], стр.118, рисунок П2-6).

Трансформаторы удовлетворяют требованиям (см. «ПУЭ» [1] п.3.2.29) по установке в цепях дифференциальной защиты, поскольку обеспечивают погрешность не более 10 % при номинальном токе двигателя.

1.9.14 По типовой кривой намагничивания для электротехнической стали (рисунок 3) определяем погрешности трансформатора тока (ТТ):

$\varepsilon_1 = 0,1$ - полная относительная погрешность ТТ установленных со стороны нейтрали электродвигателя в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей.

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

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

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

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

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

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

1.9.17 Выполняем расчет коэффициента торможения защиты:

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

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

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

1.9.18 Определяем максимальное значение тока небаланса при номинальном токе:

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

1.9.19 Определяем значение уставки $I_{ДЗТ}$:

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

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

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

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

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

1.9.21 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимаются нулевыми.

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

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

Поскольку коэффициент чувствительности больше 2, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

1.9.23 Строим характеристику работы защиты.

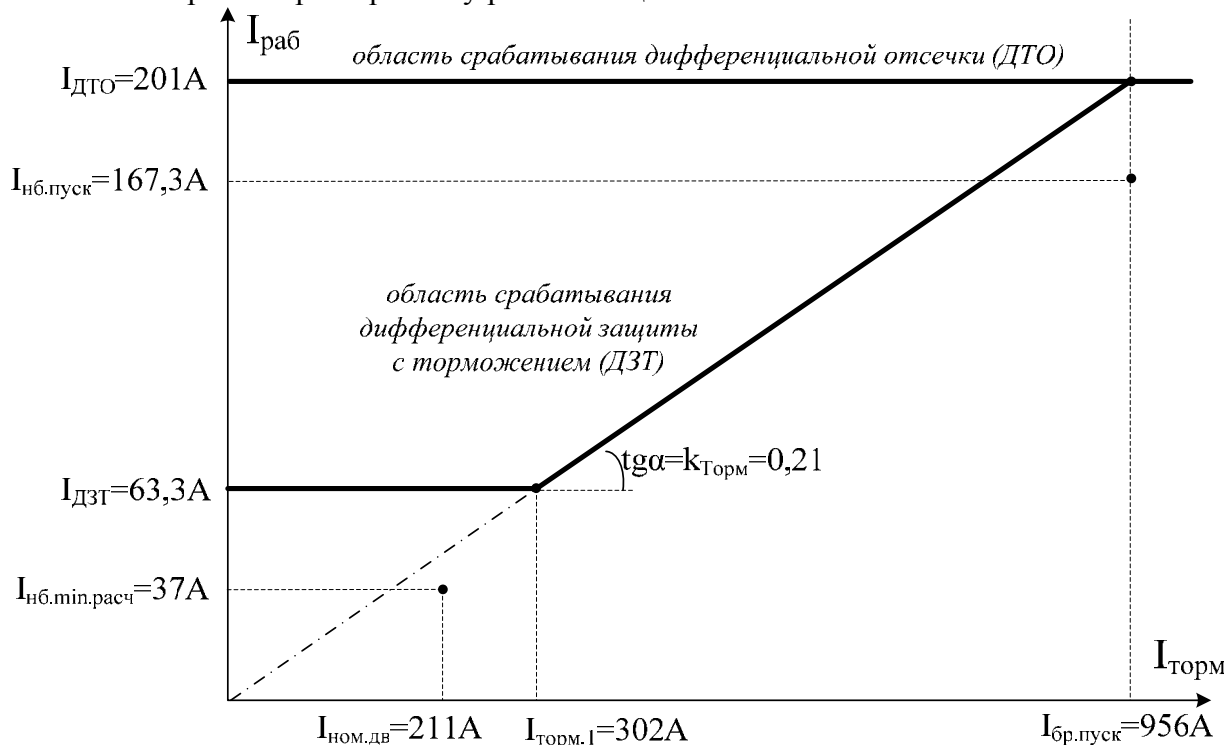


Рисунок 8 - Характеристика дифференциальной защиты двигателя СТД-3200-2 с реакторным пуском

1.10 Пример расчета защиты от междуфазных замыканий для асинхронного двухскоростного двигателя (с применением ТО)

1.10.1 Требуется определить параметры защиты от междуфазных замыканий двухскоростного асинхронного электродвигателя АДО-1600/1000-10/12

Данные для расчета:

Мощность на валу двигателя 1-я скорость: $P_{ном.дв.1} = 1000 \text{ кВт}$

Мощность на валу двигателя 2-я скорость: $P_{ном.дв.2} = 1600 \text{ кВт}$

Коэффициент мощности 1-я скорость: $\cos \varphi_1 = 0,53$

Коэффициент мощности 2-я скорость: $\cos \varphi_2 = 0,8$

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

КПД 1-я скорость: $\eta_1 = 0,92$

КПД 2-я скорость: $\eta_2 = 0,95$

Кратность пускового тока 1-я скорость: $k_{пуск1} = 6,7$

Кратность пускового тока 2-я скорость: $k_{пуск2} = 6,5$

Значение тока трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя: $I_{ш}^{(3)} = 8 \text{ кА}$

Пуск двигателя прямой, с 1-й скорости.

Двигатель участвует в самозапуске. Самозапуск может осуществляться как с 1-й так и со 2-й скорости.

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

Выполняем расчет защиты от междуфазных замыканий для 1-й скорости

1.10.2 Определяем значение номинального тока электродвигателя для 1-й скорости:

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

Выбираем трансформаторы тока стороны питания электродвигателя: ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $k_{тр} = 200/5$. Трансформатор тока ТЛМ10-5-82 имеет погрешность не более 10 % при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 200 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом) до 17 (до 3400 А) (см. [3], стр.118, рис. П2-6).

1.10.3 Определяем максимальный бросок пускового тока электродвигателя для 1-й скорости при условии, что он участвует в самозапуске:

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

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

1.10.5 Поскольку при токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>1} = 3685 \text{ А}$ погрешность трансформаторов тока превышает 10 %, они непригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки.

Для выполнения указанного требования, выбираем трансформаторы тока ТЛМ10-5-82 с коэффициентом трансформации 300/5, которые обеспечивают погрешность не более 10 % при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 300 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом) до 17 (до 5100 А).

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

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

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

1.10.7 Выдержку времени защиты устанавливаем нулевой.

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

Выполняем расчет защиты от междуфазных замыканий для 2-й скорости

1.10.9 Определяем значение номинального тока электродвигателя:

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

Выбираем трансформаторы тока стороны питания электродвигателя: ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $k_{тр} = 300/5$. Трансформатор тока ТЛМ10-5-82 имеет погрешность не более 10 % при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 300 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом) до 17 (до 5100 А) (см. [3], стр.118, рис. П2-6).

1.10.10 Определяем максимальный бросок тока самозапуска электродвигателя при его работе на 2-й скорости:

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

1.10.11 Выбираем ток срабатывания ТО $I_{>>>2} = 3350 A$.

1.10.12 Поскольку при токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>2} = 3685 A$ погрешность трансформаторов тока не превышает 10 %, они пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки.

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

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

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

1.10.14 Выдержку времени защиты устанавливаем нулевой.

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

1.11 Пример расчета защиты от междуфазных замыканий для асинхронного двигателя с устройством плавного пуска (с применением ДЗТ с током срабатывания больше номинального тока двигателя)

1.11.1 Требуется определить параметры защиты от междуфазных замыканий асинхронного электродвигателя АО-3150-6000

Данные для расчета:

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

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

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

КПД: $\eta = 0,968$

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

Значение тока трехфазного КЗ на вводах питания электродвигателя и на вводах УПП:
 $I_{ш}^{(3)} = 8 \text{ кА}$

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

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

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

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

1.11.2 Выбираем схему защиты двигателя в соответствии с рисунком:

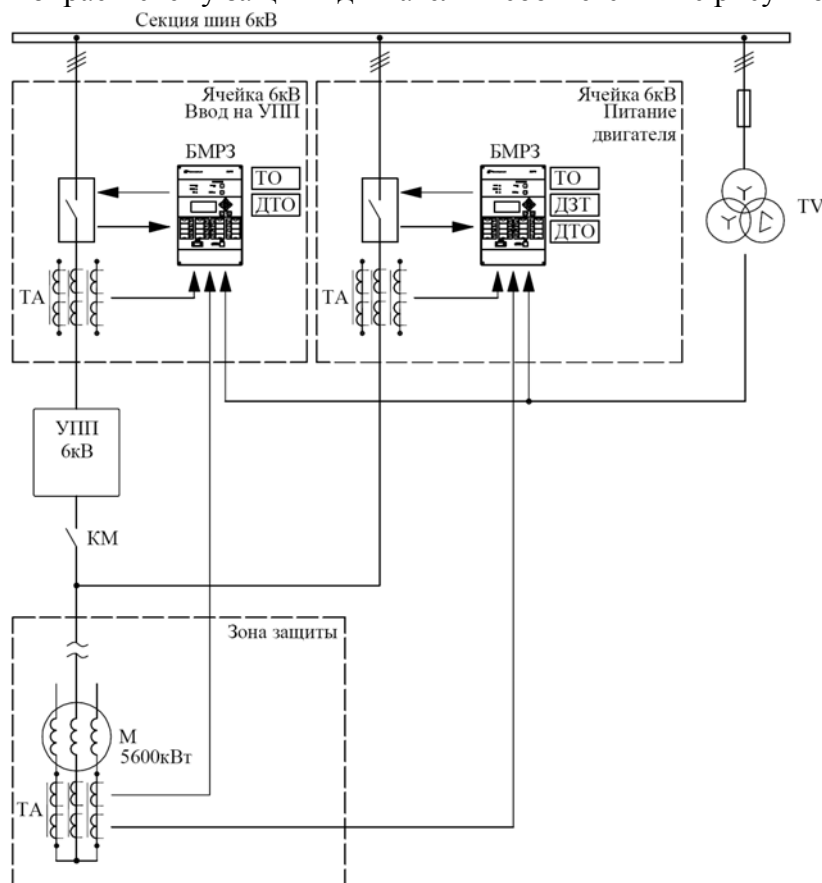


Рисунок 9 - Схема защиты двигателя АДО-3150-6000 с плавным пуском

1.11.3 Расчет уставок защит ячейки питания двигателя от сети

1.11.3.1 Определяем значение номинального тока электродвигателя:

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

Выбираем трансформаторы тока стороны питания электродвигателя: ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $k_{тр} = 400/5$. Трансформатор тока ТЛМ10-5-82 имеет погрешность не более 10 % при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 400 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом) до 22 (до 8800 А) (см. [3], стр.118, рис. П2-6).

1.11.3.2 Определяем максимальный бросок пускового тока электродвигателя (при прямом пуске) при условии, что он участвует в самозапуске (в том числе при переключении ячеек питания):

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

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

1.11.3.4 Поскольку при токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>} = 5775 \text{ А}$ трансформаторы тока обеспечивают погрешность не более 10 %, они пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки.

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

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

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

1.11.3.6 Выдержку времени защиты устанавливаем нулевой.

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

1.11.3.8 Выбираем трансформаторы тока, устанавливаемые со стороны нейтрали электродвигателя аналогичные трансформаторам, устанавливаемым со стороны питания – ТЛМ10-5-82. Трансформатор тока ТЛМ10-5-82 имеет погрешность не более 10 % при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 400 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом) до 15 (до 6000 А) (см. [3], стр.118, рис. П2-6).

1.11.3.9 По типовой кривой намагничивания для электротехнической стали (рисунок 3) определяем погрешности трансформатора тока (ТТ):

$\varepsilon_1 = 0,1$ - полная относительная погрешность ТТ установленных со стороны нейтрали электродвигателя в режиме, соответствующем максимальному значению броска пускового тока электродвигателя с учётом апериодической составляющей.

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

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

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

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

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

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

1.11.3.12 Выполняем расчет коэффициента торможения защиты:

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

Округляем коэффициент до сотых в большую сторону.

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

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

1.11.3.13 Определяем максимальное значение тока небаланса при номинальном токе двигателя:

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

1.11.3.14 Определяем значение уставки $I_{ДЗТ}$:

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

$I_{ДЗТ}$ выбираем больше номинального тока электродвигателя:

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

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

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

Трансформаторы удовлетворяют требованиям (см. «ПУЭ» [1] п.3.2.29) по установке в цепях дифференциальной защиты, поскольку обеспечивают погрешность не более 10 % при токе двигателя соответствующем $I_{торм.1}$.

1.11.3.16 Выдержки времени ДЗТ и ДТО принимаются нулевыми.

1.11.3.17 Вводим блокировку дифференциальных защит при снижении максимального из трёх фазных токов стороны питания электродвигателя ниже значения равного 75 % холостого хода ЭД.

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

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

Поскольку коэффициент чувствительности больше 2, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

1.11.3.19 Строим характеристику работы защиты.

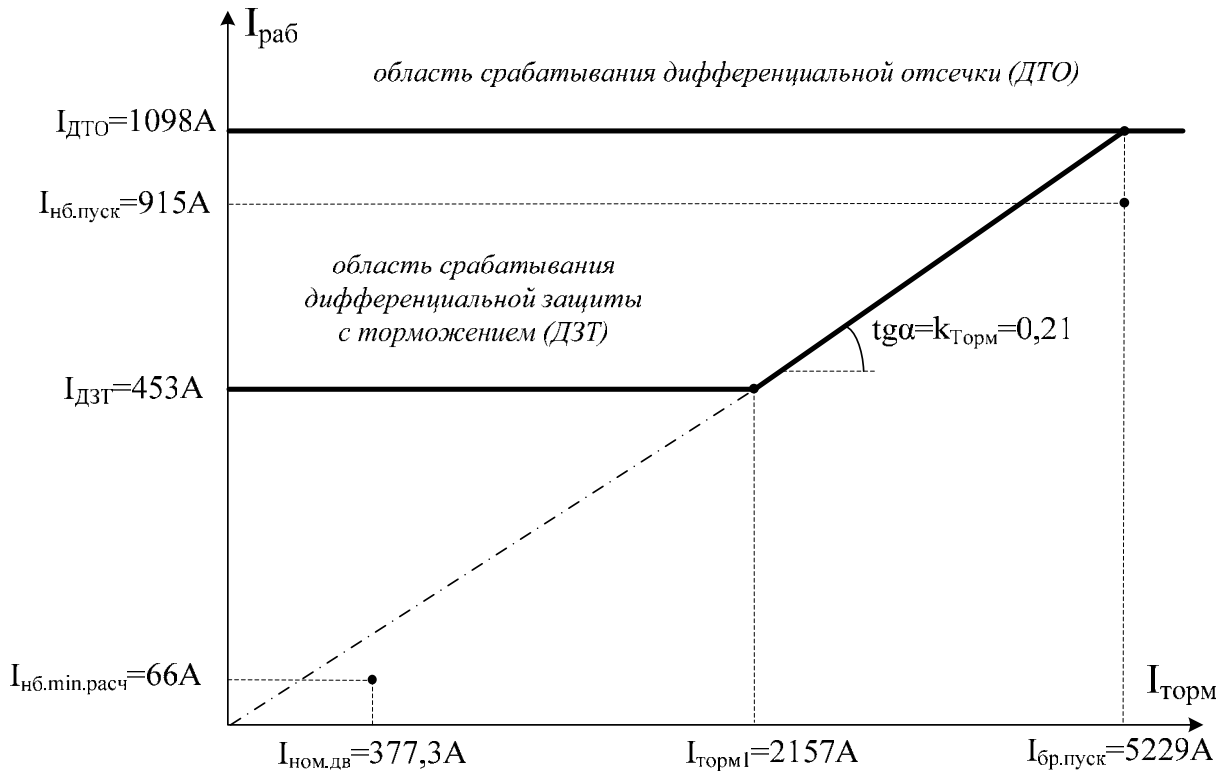


Рисунок 10 - Характеристика дифференциальной защиты двигателя АО-3150-6000 (устанавливаемой в ячейке питания двигателя от сети).

1.11.4 Расчет уставок защит ячейки питания УПП от сети

1.11.4.1 Трансформаторы тока стороны питания УПП и стороны нейтрали электродвигателя выбираем аналогичные сетевой ячейке: ТЛМ10-5-82 с сердечником типа Р, коэффициентом трансформации $k_{тр} = 400/5$. Трансформатор тока ТЛМ10-5-82 имеет погрешность не более 10 % при кратности тока (относительно номинального тока трансформатора, равного 400 А, при максимальном сопротивлении токовых цепей не более 1 Ом) до 15 (до 6000 А) (см. [3], стр.118, рис. П2-6).

1.11.4.2 Определяем максимальный бросок пускового тока электродвигателя (при прямом пуске) при условии, что он участвует в самозапуске (в том числе при переключении ячеек питания):

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

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

1.11.4.4 Поскольку при токе двигателя $1,1 \cdot I_{>>>} = 5775 \text{ А}$ трансформаторы тока обеспечивают погрешность не более 10 %, они пригодны для применения в цепях максимальной токовой отсечки.

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

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

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

1.11.4.7 Выдержку времени защиты устанавливаем нулевой.

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

1.11.4.9 Определяем максимальный бросок пускового тока электродвигателя (при плавном пуске):

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

1.11.4.10 Определяем уставку срабатывания ДТО:

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

1.11.4.11 Трансформаторы удовлетворяют требованиям (см. «ПУЭ» [1] п.3.2.29) по установке в цепях дифференциальной защиты, поскольку обеспечивают погрешность не более 10 % при токе двигателя соответствующем $I_{ДТО}$.

1.11.4.12 Выдержку времени ДТО принимаем нулевой.

1.11.4.13 ДЗТ в ячейке питания УПП не используем.

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

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

Поскольку коэффициент чувствительности больше 2, защита удовлетворяет требованиям ПУЭ.

1.11.4.15 Строим характеристику работы защиты.

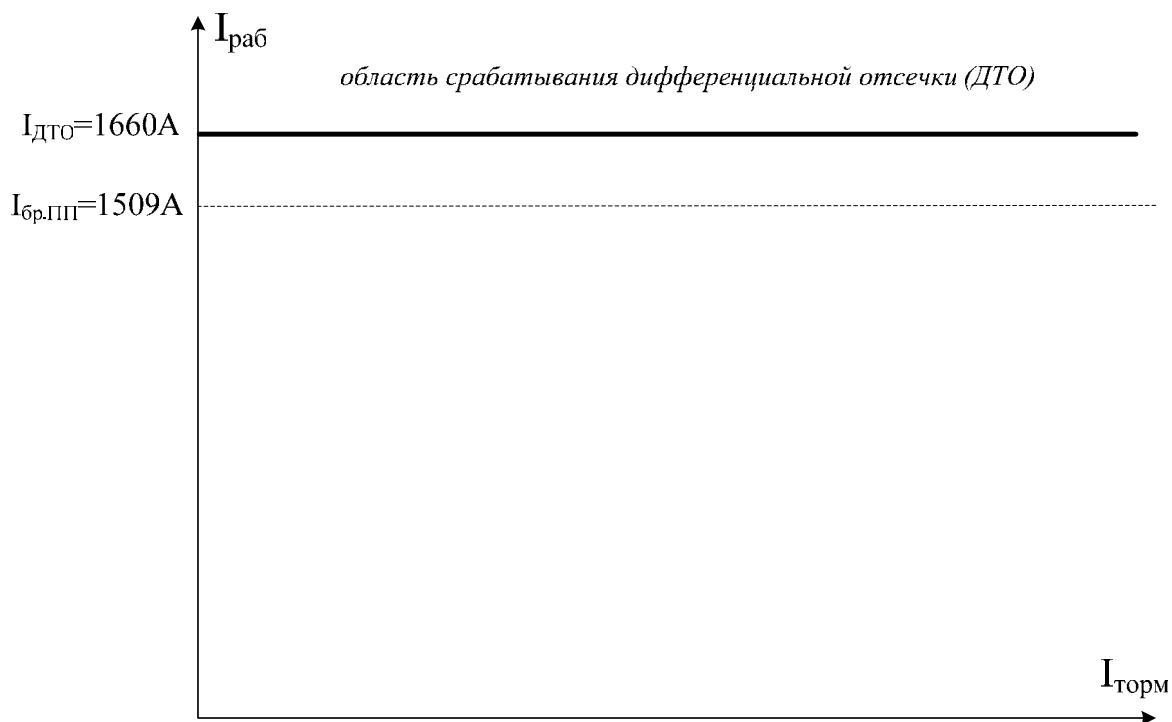


Рисунок 11 - Характеристика дифференциальной защиты двигателя АО-3150-6000 (устанавливаемой в ячейке питания УПП).

2 Расчеты защит от замыканий на землю

2.1 Требования ПУЭ к защите электродвигателей от однофазных замыканий на землю

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

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

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

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

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

2.2 Исполнение защиты от замыканий на землю с применением блоков БМРЗ

Защита от замыканий на землю (ОЗЗ) выполняется двухступенчатой:

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

2.3 Методика расчета уставок защиты от однофазных замыканий на землю

2.3.1 Часто при выполнении защиты от ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью защита выполняется по методике отстройки от собственного емкостного тока защищаемого присоединения. В зависимости от значения суммарного тока ОЗЗ может выполняться с действием на сигнализацию (при токах меньших, чем требуемые «ПУЭ», см. выше) или отключение поврежденного электродвигателя [1]. Принцип работы защиты поясняется на рисунке 12.

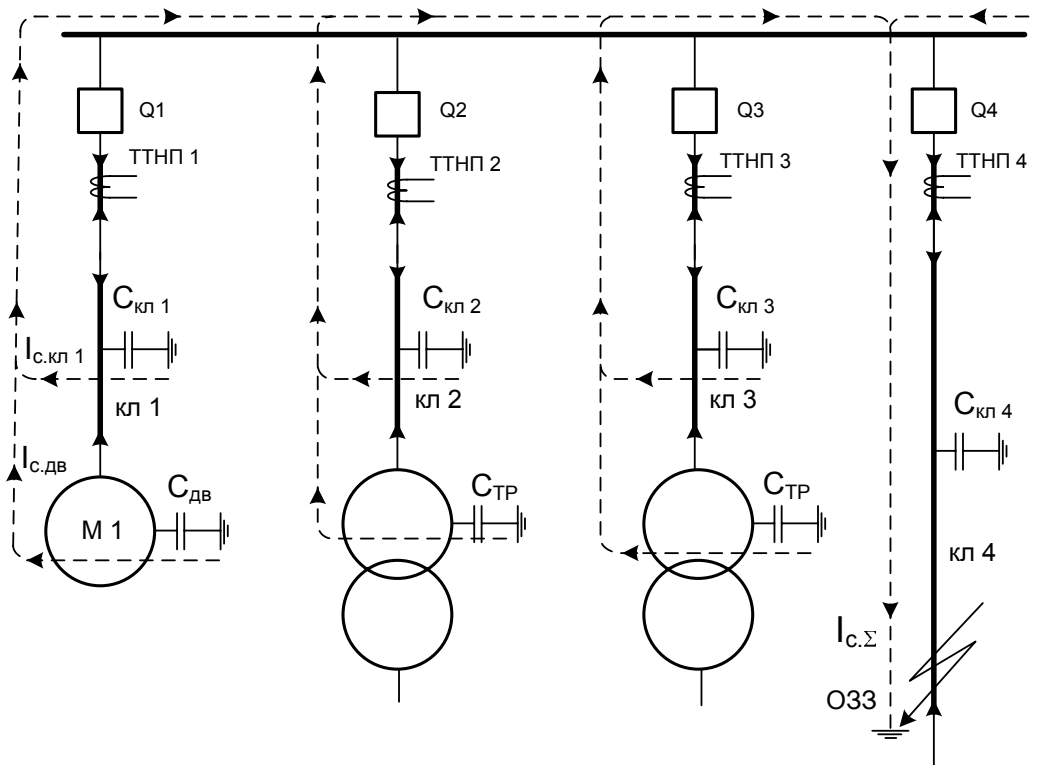


Рисунок 12 - Схема фрагмента сети с изолированной нейтралью с ОЗЗ

В кабельной линии 4 возникло ОЗЗ. После установления переходного процесса, связанного с перезарядом емкостей сети, весь суммарный емкостной ток двух неповрежденных фаз этой сети будет протекать в точку ОЗЗ. То есть через все присоединения сети, где нет ОЗЗ, будет протекать свой собственный емкостной ток защищаемых присоединений в направлении места ОЗЗ. Методика отстройки от собственного емкостного тока защищаемого присоединения заключается в отстройке срабатывания защит от ОЗЗ от значения этого тока.

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

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

$$3I_{0>} = \frac{k_{отс}}{k_{возврат}} \cdot k_{бр} \cdot (I_{емк.дв} + I_{емк.кл}) \text{ А}, \quad (23)$$

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

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

$k_{бр}$ – коэффициент броска емкостного тока, обусловленного перезарядом емкостей электрической сети при ОЗЗ. В данном случае этот коэффициент, показывающий ослабление броска аperiodической составляющей емкостного тока цифровыми фильтрами терминала.

Для блоков БМРЗ коэффициент броска емкостного тока защиты от ОЗЗ принимается $k_{\text{бр}} = 2$ (для электромеханических и статических реле коэффициент броска емкостного тока принимают $k_{\text{бр}} = 3 \div 5$);

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

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

2.3.3 В некоторых сетях с изолированной нейтралью токи ОЗЗ малы. Поэтому, при недостаточной чувствительности ненаправленной токовой защиты – применяют направленную токовую защиту от ОЗЗ. Ток срабатывания направленной токовой защиты от ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью определяют по формуле (23), но $k_{\text{бр}}$ принимают равным единице, и это позволяет в два раза повысить чувствительность защиты.

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

Для некоторых турбодвигателей значения электрической ёмкости статорной обмотки на землю приведены в таблице 1 [5].

Таблица 1

Тип турбодвигателя	Мощность СД, (кВт)	Значение емкости статорной обмотки в трех фазах, (мкФ) для СД напряжением 6 кВ	Значение емкости статорной обмотки в трех фазах, (мкФ) для СД напряжением 10 кВ
СТД - 5000 - 2	5000	0,085	0,11
СТД - 6300 - 2	6300	0,11	0,11
СТД - 8000 - 2	8000	0,11	0,17
СТД - 10000 - 2	10000	0,15	0,17
СТД - 12500 - 2	125000	0,15	0,22

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

Для определения емкостного тока АД напряжением выше 1 кВ можно применить следующие формулы [8]:

$$- \text{ для АД напряжением 6 кВ: } I_{\text{емк.дв}} \approx 0,017 \cdot S_{\text{ном.дв}} \text{ А;} \quad (24)$$

$$- \text{ для АД напряжением 10 кВ: } I_{\text{емк.дв}} \approx 0,03 \cdot S_{\text{ном.дв}} \text{ А,} \quad (25)$$

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

$$S_{\text{ном.дв}} = \frac{P_{\text{ном.дв}}}{\cos \varphi \cdot \eta} \text{ МВА,} \quad (26)$$

где $P_{\text{ном.дв}}$ - номинальная мощность на валу электродвигателя в МВт.

Для более точного определения емкостного тока двигателя напряжением выше 1 кВ применяются следующие формулы [7]:

– для СД емкостной ток при ОЗЗ определяется из формулы:

$$I_{\text{емк.дв}} = 2\pi \cdot f_{\text{ном}} \cdot \sqrt{3} \cdot C_{\text{дв}} \cdot U_{\text{ном.дв}} \text{ А,} \quad (27)$$

где $C_{\text{дв}}$ - электрическая емкость двигателя в фарадах (Ф);

$U_{\text{ном.дв}}$ - номинальное напряжение двигателя в вольтах (В);

$f_{\text{ном}}$ - номинальная частота питающей сети в герцах (Гц).

– для явнополюсных синхронных двигателей $C_{дв}$ определяется по формуле:

$$C_{дв} \approx \frac{40^4 \sqrt{S_{ном.дв}^3} \cdot 10^{-6}}{3 \cdot (U_{ном.дв} + 3600) \cdot \sqrt[3]{n}}, \quad (28)$$

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

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

n – синхронная скорость вращения двигателя (об/мин);

– для неявнополюсных синхронных двигателей и асинхронных двигателей – $C_{дв}$ определяется по формуле:

$$C_{дв} \approx \frac{0,0187 \cdot S_{ном.дв} \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{U_{ном.дв} \cdot (1 + 0,08 \cdot U_{ном.дв})}}, \quad (29)$$

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

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

2.3.6 Точное значение емкостного тока кабельной линии $I_{с.кл}$ с бумажной изоляцией определяется из таблицы 2 [8]:

Таблица 2

Сечение жил кабеля мм ²	Удельное значение емкостного тока 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

При отсутствии данных на параметры кабельной линии емкостной ток кабельной линии можно, в крайнем случае, определить по приближенной формуле [8]:

$$I_{емк.кл} \approx \frac{U_{ном.кл} \cdot l}{10} \text{ А}, \quad (30)$$

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

l – длина кабельной линии, км.

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

2.3.7 Работа сети в режиме с изолированной нейтралью допускается «ПУЭ» [1] в тех случаях, когда суммарный емкостной ток $I_{с\sum}$ не превышает 30 А для сети 6 кВ и 20 А - для сети 10 кВ.

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

$$I_{O33\Sigma}^{(1)} = \sqrt{I_{c.\Sigma}^2 + I_R^2} \text{ А,} \quad (31)$$

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

I_R - активный ток, протекающий через резистор резистивного заземления нейтрали.

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

2.3.9 Для проверки чувствительности защиты выполняем оценку коэффициента чувствительности при ОЗЗ:

$$k_q^{(1)} = \frac{I_{O33\Sigma}^{(1)}}{3I_0} >, \quad (32)$$

где $I_{O33\Sigma}^{(1)}$ – суммарное значение емкостного тока сети при ОЗЗ, А.

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

Коэффициенты трансформации ТТНП приведены в таблице 3.

Таблица 3

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

2.4 Расчет уставок защиты от двойных замыканий на землю

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

Защита работает без выдержки времени и должна выполняться с параметрами срабатывания по току 50 – 200 А [1].

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

$$3I_0 \gg = k_{отс} \cdot k_{нес} \cdot I_{пуск.дв} = k_{отс} \cdot k_{нес} \cdot k_n \cdot I_{ном.дв} \text{ А,} \quad (33)$$

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

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

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

k_n - коэффициент пуска;

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

2.5 Пример расчета защиты от замыканий на землю для асинхронного двигателя

2.5.1 Требуется определить параметры защиты от междуфазных замыканий асинхронного электродвигателя серии А4, работающего в сети с изолированной нейтралью.

Данные для расчета:

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

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

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

КПД: $\eta = 0,952$

Кратность пускового тока: $k_n = 5,5$

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

Электродвигатель подключен медным кабелем с бумажной изоляцией сечением 185 мм^2 длиной 40 метров.

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

Трансформатор тока нулевой последовательности применен типа ТЗР.

2.5.2 Определяем полную мощность двигателя:

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

2.5.3 Определяем значение емкостного тока двигателя:

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

2.5.4 Определим значение емкостного тока двигателя вторым способом.

Определим значение электрической ёмкости электродвигателя:

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

и по формуле (26) выполним расчет значения емкостного тока двигателя:

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

Результаты расчетов значения емкостного тока электродвигателя обоими способами одинаковы.

2.5.5 По таблице 2 определяем значение емкостного тока кабельной линии:

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

2.5.6 Определяем первичное значение параметра срабатывания защиты по току от ОЗЗ:

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

2.5.7 Определяем коэффициент чувствительности защиты при ОЗЗ:

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

Полученное значение коэффициента чувствительности соответствует требованиям «ПУЭ» [1] (не менее 1,5).

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

$$3I_{0\text{ втор}} \geq \frac{3I_0}{k_{тр}} = \frac{0,159}{18} = 0,0088A \approx 0,01A$$

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

2.5.10 Определяем номинальный ток электродвигателя:

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

2.5.11 Определяем уставку срабатывания защиты от двойных замыканий на землю

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

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

$$3I_0 \gg 100A$$

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

2.6 Направленная токовая защита от однофазных замыканий на землю

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

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

Необходимым условием применения направленной защиты является обеспечение суммарного тока при ОЗЗ на защищаемом присоединении – не менее 40 % от номинального тока трансформатора тока нулевой последовательности (угловая погрешность ТТНП не превышает 36°, см. рис. 13, [16]).

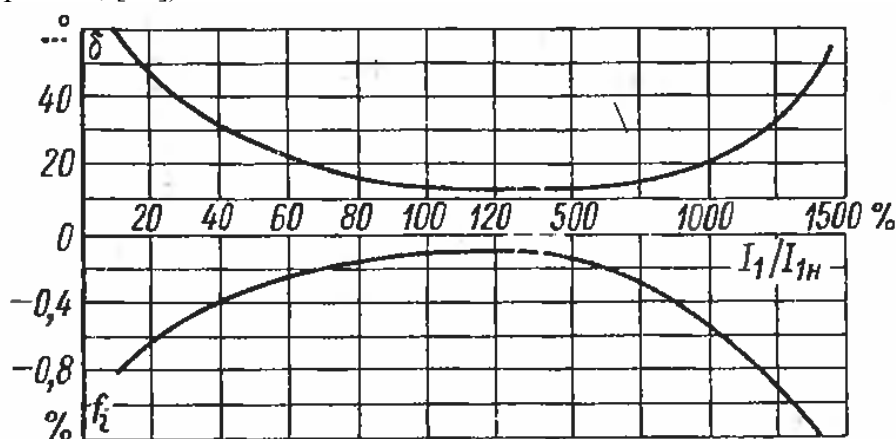


Рисунок 13 - Зависимость токовой f_i и угловой δ погрешности некомпенсированного ТТ от кратности протекаемого первичного тока I_1 к номинальному току ТТНП $I_{1н}$

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

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

Для повышения чувствительности – защита выполняется с выдержкой времени 0,1 с. Время срабатывания токовой защиты от ОЗЗ $t_{с.з.} = 0,1$ с выбрано по условию отстройки от длительности переходных процессов.

Значение параметра срабатывания защиты выбирается исходя из соблюдения условия:

$$I_{с.з.} < I_{ОЗЗ}^{(1)} \Sigma$$

Характеристика направленной защиты от ОЗЗ для сети с изолированной нейтралью приведена на рисунке 14.

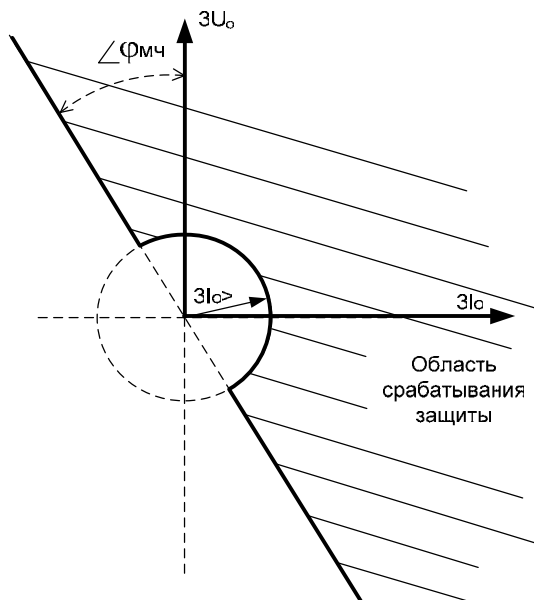


Рисунок 14 - Характеристика выполнения направленной защиты от ОЗЗ для сетей с изолированной нейтралью

Характеристика направленной защиты от ОЗЗ для сети с нейтралью заземленной через высокоомный резистор приведена на рисунке 15.

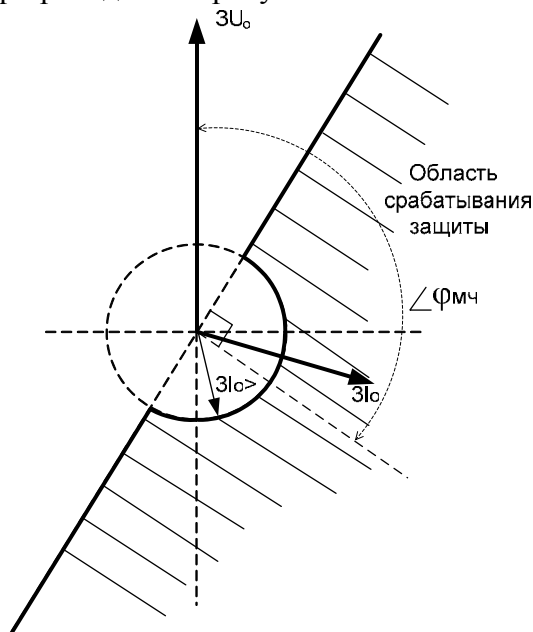


Рисунок 15 - Характеристика выполнения направленной защиты от ОЗЗ для сетей с нейтралью заземленной через высокоомный резистор

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

Для сети с изолированной нейтралью рекомендуется устанавливать угол $\varphi_{мч}$ равным минус 36° . Это обусловлено тем, что емкостной ток сети на поврежденном присоединении будет отставать от напряжения $3U_0$ на 90° , при этом возможные угловые погрешности трансформаторов тока нулевой последовательности компенсируются смещением характеристики на указанный угол.

Для сети с нейтралью заземленной через высокоомный резистор вектор тока ОЗЗ (см. рисунок 15) будет находиться в 4-м квадранте, рекомендуется устанавливать угол $\varphi_{мч}$ равным плюс 45° . В этом случае рекомендуется проверка корректности работы реле направления мощности нулевой последовательности на основании расчета угла тока сети при ОЗЗ на поврежденном соединении. 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:

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

где $I_{акт}$ - активная составляющая тока ОЗЗ, А;

$I_{емк}$ - ёмкостная составляющая тока ОЗЗ, А.

2.7 Пример расчета защиты от замыканий на землю для синхронного двигателя

2.7.1 Выполняем защиту от междуфазных замыканий синхронного электродвигателя типа СТД-6300-2, работающего в сети с изолированной нейтралью.

Данные для расчета:

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

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

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

КПД: $\eta = 0,975$

Кратность пускового тока: $k_n = 6,28$

Двигатель подключен тремя медными кабелями с бумажной изоляцией сечением 185 мм^2 длиной 30 метров.

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

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

2.7.2 Значение емкости статорной обмотки этого двигателя выбираем из таблицы 1 и выполняем расчет значения емкостного тока этого электродвигателя:

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

2.7.3 Определяем значение емкостного тока трех кабельных линий:

$$I_{емк.кл} \approx \frac{U_{ном.кл} \cdot l}{10} = 3 \cdot \frac{10 \cdot 0,03}{10} = 0,09 \text{ А}$$

2.7.4 Первичный ток срабатывания защиты от ОЗЗ электродвигателя СТД-6300-2 выбираем аналогично ненаправленной защите:

$$3I_0 > = \frac{k_{отс}}{k_{возврат}} \cdot k_{бр} \cdot (I_{емк.дв} + I_{емк.кл}) = \frac{1,2}{0,95} \cdot 2 \cdot (0,004 + 0,09) = 0,237 \text{ А}$$

Условие $I_{с.з.} < I_{ОЗЗ\Sigma}^{(1)}$ выполняется.

2.7.5 Выполняем расчет коэффициента чувствительности защиты:

$$k_{ч}^{(1)} = \frac{I_{ОЗЗ\Sigma}^{(1)}}{3I_0 >} = \frac{4}{0,237} = 16,88$$

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

$$3I_{0 \text{ втор}} \geq \frac{3I_0}{k_{тр}} = \frac{0,237}{18} = 0,0132 \text{ А} \approx 0,01 \text{ А}$$

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

2.7.8 Определяем номинальный ток электродвигателя:

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

2.7.9 Определяем уставку срабатывания защиты от двойных замыканий на землю

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

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

$$3I_0 \gg 100 A.$$

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

3 Расчеты защит минимального напряжения

3.1 Требования ПУЭ к защитам минимального напряжения электродвигателей

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

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

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

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

3.1.2 Защита минимального напряжения с выдержкой времени не более 10 с и уставкой по напряжению, как правило, не выше 50 % номинального напряжения (кроме случаев, приведенных в **3.1.1**) должна устанавливаться на электродвигателях ответственных механизмов также в случаях, когда самозапуск механизмов после останова недопустим по условиям технологического процесса или по условиям безопасности и, кроме того, когда не может быть обеспечен самозапуск всех электродвигателей ответственных механизмов (см. **3.1.1**).

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

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

3.2 Исполнение защиты минимального напряжения с применением блоков БМРЗ

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

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

$$U_{\ll} = (0,6 \div 0,7) \cdot U_{ном.дв} \text{ В} \quad (34)$$

Время срабатывания этой ступени составит $T_{зми} \ll = 0,5 \div 0,9$ с.

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

$$U_{<} = (0,4 \div 0,5) \cdot U_{ном.дв} \text{ В.} \quad (35)$$

Время срабатывания второй ступени составляет $T_{зми} \ll = 3 \div 9$ с. Значение времени срабатывания защиты выбирается в зависимости от скорости затормаживания основных АД. Такая настройка защиты предназначена для отключения ответственных АД при длительном отсутствии напряжения по требованиям безопасности, или для последовательного пуска механизмов при невозможности их одновременного разворота.

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

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

4 Расчеты защиты от потери питания (ЗПП)

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

4.1 Требования ПУЭ к защитам от потери питания электродвигателей

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

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

4.2 Выполнение защиты от потери питания синхронных электродвигателей на базе блоков БМРЗ

Защита от потери питания может быть организована на следующих принципах:

1. **Понижение напряжения.** Поскольку при потере питания напряжение генерируется синхронными двигателями, то процесс снижения напряжения на шинах СД характеризуется большой длительностью, поэтому по такому принципу ЗПП не выполняется. Защита минимального напряжения, выполненная по такому принципу, применяется как вспомогательная.
2. **Снижение частоты.** В чистом виде этот принцип не используется, так как устройства, выполненные по этому принципу, не способны различить снижение частоты при потере питания от снижения частоты при дефиците мощности в ЭЭС при системных авариях. При этом отключение СД не только будет излишним, но и может усугубить дефицит реактивной мощности в энергосистеме.
3. **Устройства, контролирующие снижение частоты на разных секциях подстанции с синхронными двигателями.** Схема работает только при питании секций подстанции от отдельных вводов и используется только для частотного пуска устройства АВР секционного выключателя.
4. **Устройства, реагирующие на скорость снижения частоты,** могут применяться только в тех случаях, когда скорость снижения частоты при выбеге двигателя в $3 \div 4$ раза превышает скорость снижения частоты при аварийном дефиците мощности в ЭЭС, т.е. может применяться не всегда, кроме того скорость снижения частоты при выбеге синхронных двигателей зависит от их нагрузки.
5. **Устройства, построенные на принципе изменения направления активной мощности** - не отстроены от качаний, возможна их ложная работа, кроме того, они имеют большую выдержку времени из-за необходимости согласования с РЗ от замыканий на землю отходящих от шин питающих ПС смежных линий электропередачи.
6. **Схема, реагирующая на снижение частоты и изменение направления активной мощности** избавлена от недостатков предыдущих схем и является наиболее универсальной, поэтому рекомендуется применять данную схему защиты от потери питания. Параметр срабатывания реле минимальной частоты выбирается меньше значения частоты срабатывания первой ступени АЧР-1:

$$f_{c.з} = 48,3 \dots 48,4 \text{ Гц}$$

Блокировка по направлению мощности позволяет выполнить эту защиту быстродействующей. Время срабатывания защиты составляет $t_{c.з} = (0,3 \dots 0,4) c$ (в соответствии с [17] и на основе опыта эксплуатации синхронных двигателей ОАО «Газпром»).

При определении направления мощности блок БМРЗ по состояниям цифровых реле направления мощности для каждой из пар входных сигналов I_A , U_{BC} и I_C , U_{AB} определяет направление активной мощности P в присоединении, либо сигнализирует о неправильной фазировке. Цифровые реле активной мощности БМРЗ имеют характеристику, показанную на рисунке 16.

Поскольку цифровое реле направления мощности включается по 90-градусной схеме, значение уставки φ_{3C} следует выбирать из диапазона $30^\circ \div 60^\circ$ [19].

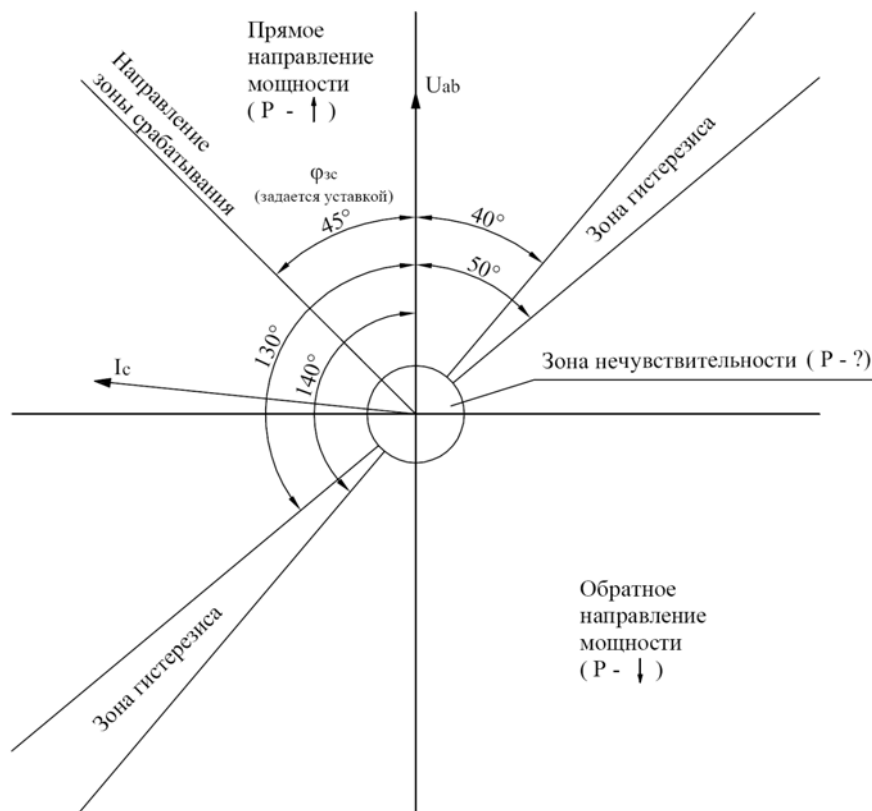


Рисунок 16 - Характеристика реле направления мощности

5 Защита от неполнофазного режима работы электродвигателя

5.1 Требования ПУЭ к защите двигателей от неполнофазных режимов работы

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

Согласно требованиям «ПУЭ» [1] для электродвигателей, которые защищаются от токов КЗ предохранителями, не имеющими вспомогательных контактов для сигнализации об их перегорании, должна предусматриваться защита от перегрузки в двух фазах. Однако ввиду возможности обрыва фазы на линии внешнего электроснабжения рекомендуется применять защиту от неполнофазного режима для всех двигателей.

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

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

$$I_{\text{дв}} = 1,6 \dots 2,5 I_{\text{ном.дв}}$$

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

Защита срабатывает при выполнении двух условий:

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

Время срабатывания защиты на отключение электродвигателя выбирается из диапазона 0,5 – 1 с и отстраивается от времени ликвидации неполнофазного режима системами автоматика внешнего электроснабжения.

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

6 Защита электродвигателей от перегрузок

6.1 Требования ПУЭ к защите электродвигателей от перегрузок

Защита от перегрузки должна предусматриваться на электродвигателях:

- подверженных перегрузке по технологическим причинам;
- с особо тяжелыми условиями пуска и самозапуска (длительность прямого пуска непосредственно от сети 20 с и более);
- перегрузка которых возможна при чрезмерном увеличении длительности пускового периода вследствие понижения напряжения в сети.

Защиту от перегрузки следует предусматривать в одной фазе с зависимой или независимой от тока выдержкой времени, отстроенной от длительности пуска электродвигателя в нормальных условиях и самозапуска после действия АВР и АПВ. Выдержка времени защиты от перегрузки синхронных электродвигателей во избежание излишних срабатываний при длительной форсировке возбуждения должна быть по возможности близкой к наибольшей допустимой по тепловой характеристике электродвигателя.

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

Действие защиты на отключение электродвигателя допускается:

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

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

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

6.2 Исполнение защиты двигателей от перегрузок на базе блоков БМРЗ

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

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

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

Рекомендуется применение защиты от симметричных перегрузок с действием на отключение, а действие защиты на базе тепловой модели рекомендуется на сигнализацию. Решение о действии тепловой защиты на отключение должно приниматься совместно с технологическим персоналом и утверждаться главным инженером. При принятии решения должны быть сопоставлены размеры материального ущерба при повреждении электродвигателя вследствие его неотключения и материальный ущерб технологическому процессу вследствие неправильного отключения электродвигателя.

6.3 Методика расчета уставок защиты от симметричных перегрузок

6.3.1 Защита электродвигателя от симметричных перегрузок выполняется трёхступенчатой в соответствии с рисунком 17. Защита работает по максимальному фазному току. Каждая ступень может быть введена и выведена независимо от других.

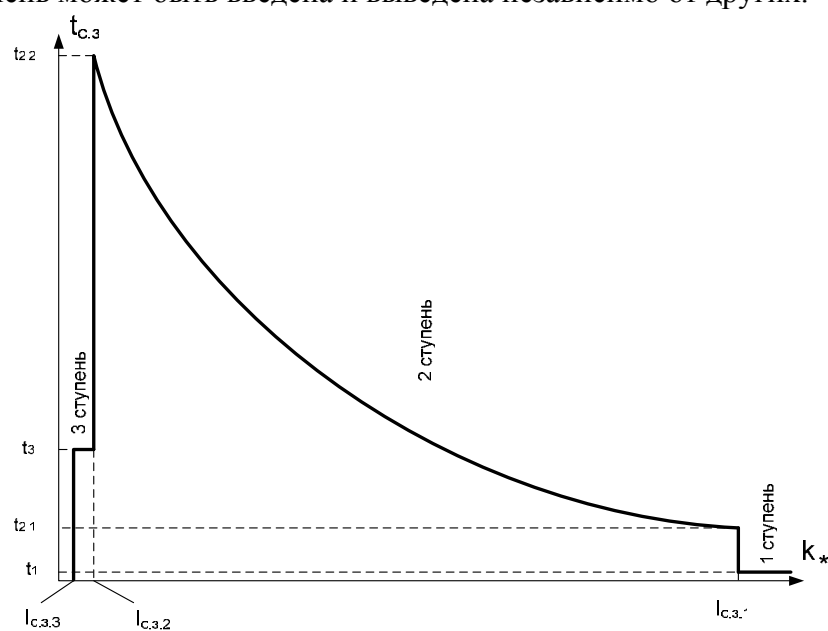


Рисунок 17 - Характеристика защиты от симметричных перегрузок электродвигателя

Основной характеристикой является вторая ступень, она является защитой от любых перегрузок и должна соответствовать перегрузочной характеристике двигателя (см. п. 6.3.3). Первая ступень предназначена для быстрого отключения двигателя в случае блокировки ротора (см. п. 6.3.2), а также выполняет функцию ближнего резервирования при отказе максимальной токовой отсечки. Третья ступень действует на сигнализацию при малой кратности перегрузки за заранее заданный отрезок времени (см. п. 6.3.5).

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

$$I_{c.з.1} = \frac{1,2 \cdot k_{\text{пуск}}}{k_e} \cdot I_{\text{ном.дв}}, \quad (36)$$

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

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

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

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

Время срабатывания защиты определяется по формуле:

$$t_{c.з.} = \frac{A}{k_*^2 - 1}, \quad (37)$$

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

k_*^2 - кратность тока статорной обмотки двигателя.

Ток срабатывания второй ступени определяется по формуле:

$$I_{c.з.2} = \frac{1,08}{k_e} \cdot I_{\text{ном.дв}} \text{ А}, \quad (38)$$

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

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

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства изготавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52776-2007 [11] (введен 01.01.2008), согласно которым:

- трехфазные двигатели переменного тока мощностью не менее 0,55 кВт с косвенным охлаждением обмоток статора должны выдерживать ток, равный 1,5 номинального тока, в течение 2 мин.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства изготовленные ранее 01.07.2010 могут быть изготовлены по ГОСТ 183-74 [10]. Двигатели, изготовленные по ГОСТ 183-74, также должны соответствовать приведенному выше требованию.

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

$$A = t_{\text{дон}} \cdot (k_i^2 - 1) = 120 \cdot (1,5^2 - 1) = 150 \text{ с}, \quad (39)$$

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

$t_{\text{дон}}$ - допустимое время работы при кратности тока k_i .

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

$$I_{с.з.3} = \frac{k_{омс}}{k_{в}} \cdot I_{ном.дв} \text{ А,} \quad (40)$$

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

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

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

6.3.7 Пример расчета защиты от симметричных перегрузок двигателя серии А4

6.3.7.1

Данные для расчета:

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

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

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

Кратность пускового тока: $k_n = 5,5$

АД соответствует требованиям ГОСТ 183-74.

Пуск АД прямой от напряжения питающей сети.

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

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

6.3.7.2 Определяем первичный ток срабатывания первой ступени защиты от симметричных перегрузок:

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

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

6.3.7.3 Вторая ступень защиты выполняется с инверсной характеристикой и работает с действием на отключение электродвигателя. Пуск защиты выполняется при кратности тока $k_* = 1,08 I_{ном.дв}$. Первичный ток пуска второй ступени защиты составит:

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

Время срабатывания защиты рассчитывается БМРЗ по формуле (37) в случае $A = 150 \text{ с}$:

$$t_{с.з} = \frac{150}{k_*^2 - 1}.$$

6.3.7.4 Третью ступень защиты выполняем с независимой характеристикой с действием на сигнализацию. Первичный ток срабатывания третьей ступени максимальной токовой защиты электродвигателя определяем по формуле (40):

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

АД не подвержен технологическим перегрузкам, а расчетное время пуска АД составляет $t_{пуск} = 5 \text{ с}$. Из этих соображений выбираем время срабатывания третьей ступени защиты на сигнализацию $t_{с.з} = 10 \text{ с}$.

Характеристика защиты от симметричных перегрузок электродвигателя, выполненная по результатам расчета, приведена на рисунке 18.

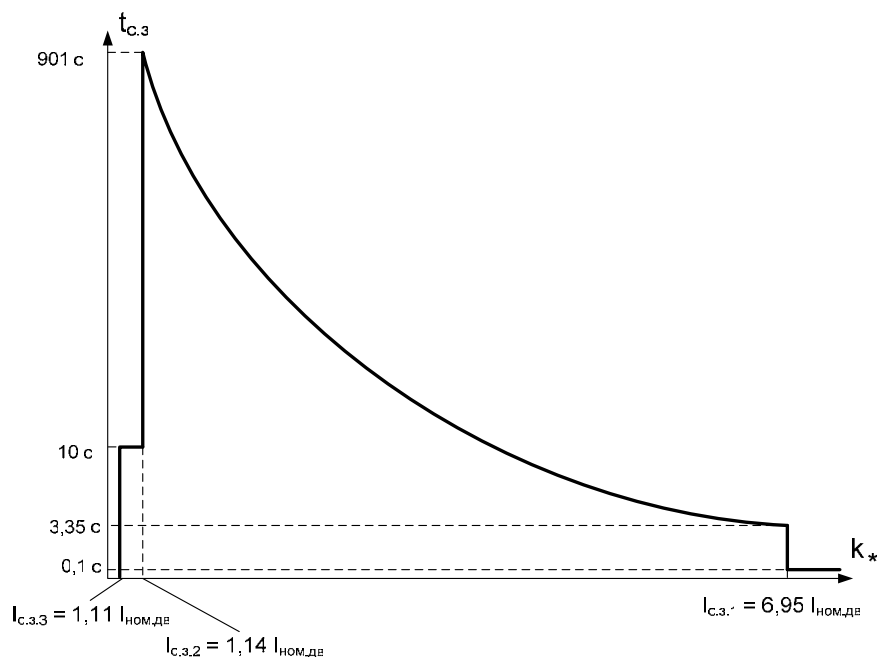


Рисунок 18 - Характеристика защиты от симметричных перегрузок электродвигателя серии А4 мощностью 800кВт

6.4 Методика выбора уставок защиты от затянутого пуска

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

Уставка по времени защиты от затянутого пуска t_n должна быть отстроена от максимального времени пуска (самозапуска) электродвигателя с учетом увеличения времени пуска из-за возможного снижения напряжения на 10 % (см. [11]).

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

6.5 Методика расчета уставок тепловой защиты электродвигателей

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

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

Поскольку при нагреве двигателя критической величиной является температура, которую может выдержать его изоляция, очевидно, что при колебаниях температуры окружающей среды двигатель может допускать большую или меньшую величину и длительность перегрузки. Для более полного использования перегрузочных способностей двигателя рекомендуется, при наличии в термине возможности подключения датчика температуры окружающей среды, использование такого датчика. Отметим, что ГОСТ Р 52776-2007 [11] допускает увеличение предельно допустимого значения перегрева не более чем на 40°C (при температуре окружающей среды 0°C, зависит от класса изоляции, см. [11], [12]).

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

$$E_{нагр, \%} = 100 \cdot \left(\frac{I_{эkv}}{I_{ш}} \right)^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{нагр}}{T_{e1}}} \right) + E_{0, \%} e^{-\frac{t_{нагр}}{T_{e1}}} \%, \quad (41)$$

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

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

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

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

$t_{нагр}$ – время нагрева, мин.

В выражение (41) контроллер терминала 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 расчётное относительное значение температуры превышает относительное значение параметра срабатывания защиты, срабатывает защита от тепловой перегрузки.

Значение эквивалентного тока рассчитывается по формуле:

$$I_{эkv} = \sqrt{I_{фазн. макс.}^2 + 3 \cdot I_2^2} \text{ А}, \quad (42)$$

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

I_2 – значение тока обратной последовательности, А.

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

$$E_{охл, \%} = E_{0, \%} e^{-\frac{t_{охл}}{T_{e2}}} \%, \quad (43)$$

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

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

$t_{охл}$ – время охлаждения, мин.

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

Характеристика работы защиты представлена на рисунке 19.

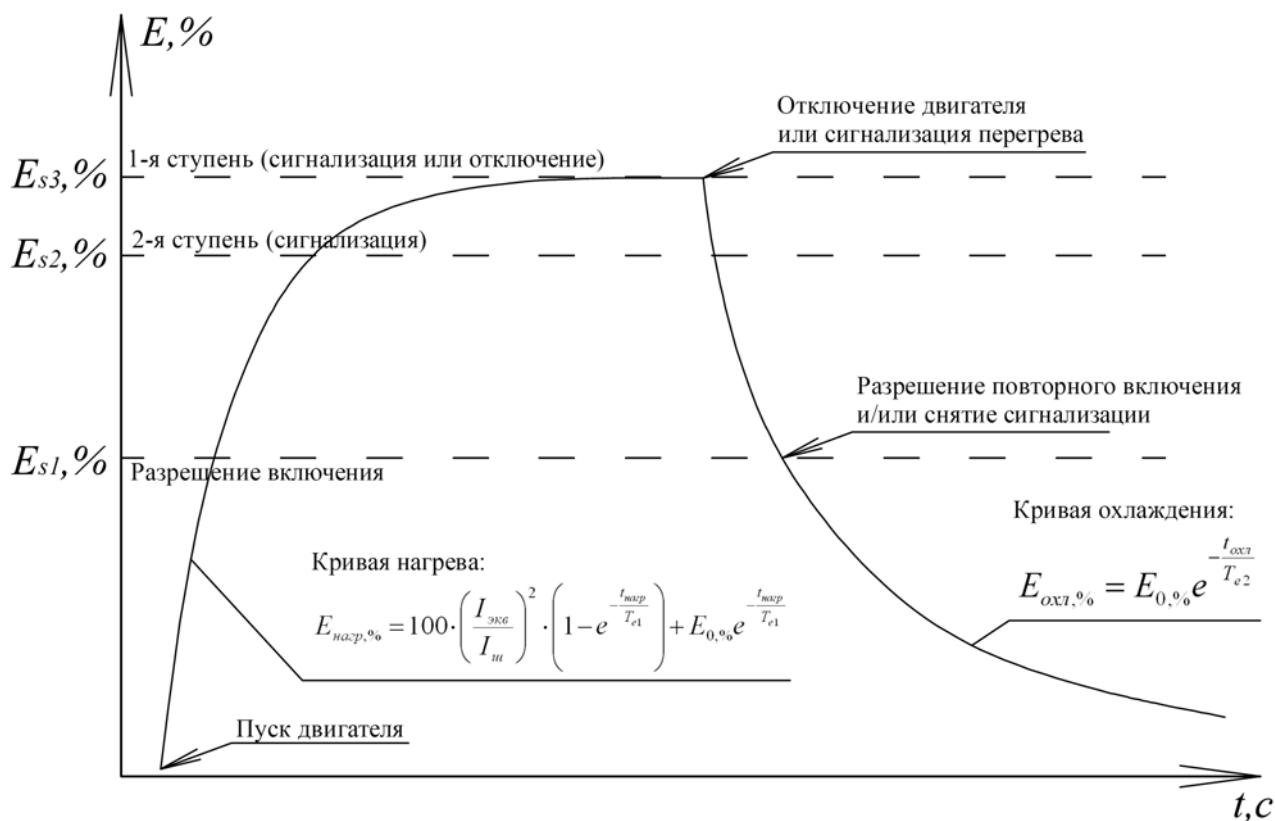


Рисунок 19 - Характеристика работы тепловой модели

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

6.5.4 Для настройки защиты используются следующие характеристики электродвигателя:

$I_{шт}$ – штатный ток двигателя (выбирается равным номинальному току двигателя);

T_{e1} - постоянная времени нагрева электродвигателя (задаётся заводом изготовителем или определяется способами, приведенными в п.6.5.5), мин;

T_{e2} - постоянная времени охлаждения электродвигателя (задаётся заводом изготовителем или определяется способами приведенными в п. 6.5.5), мин;

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

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

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

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

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства изготавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52776-2007 [11] (введен 01.01.2008), согласно которым:

- трехфазные двигатели переменного тока мощностью не менее 0,55 кВт с косвенным охлаждением обмоток статора должны выдерживать ток, равный 1,5 номинального тока, в течение 2 мин.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства, изготовленные ранее 01.07.2010, могут быть изготовлены по ГОСТ 183-74 [10]. Двигатели, изготовленные по ГОСТ 183-74, также должны соответствовать приведенному выше требованию.

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

$$A = t_{\text{дон}} \cdot (k^2 - 1) = 120 \cdot (1,5^2 - 1) = 150 \text{ с}, \quad (44)$$

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

$t_{\text{дон}}$ - допустимое время работы при кратности тока k , с.

Определим минимально допустимую постоянную времени нагрева электродвигателя T_{e1} по формуле (см. [9] стр. 150):

$$\frac{A}{T_{e1} \cdot 60} = \ln \left(\frac{k^2 - 1}{k^2 - k_{\text{max}}} \right), \quad (45)$$

откуда имеем:

$$T_{e1} = \frac{A}{60 \cdot \ln \left(\frac{k^2 - 1}{k^2 - k_{\text{max}}} \right)}, \text{ мин}, \quad (46)$$

где k_{max} - предельная кратность перегрева относительно перегрева при номинальном токе, определяется классом изоляции двигателя (см. таблицу 4, таблица составлена для работы двигателя при температуре окружающей среды 40°C на основе [12]; при составлении таблицы учитывалось, что при токах не превышающих номинальный ток двигателя изоляция обычно используется по более низкому температурному классу, например F с использованием по классу В, при других условиях работы машины требуется дополнительный расчет).

Таблица 4

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

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

6.5.6 Для полного использования перегрузочных возможностей машины рекомендуется при проведении пуско-наладочных работ экспериментальное определение реальных постоянных времени нагрева и охлаждения в соответствии с разделом 6.6.

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

$$E_{\text{пуск}} = k_{\text{пуск}}^2 \cdot (1 - e^{-\frac{t_n}{T_{e1}}}) \cdot 100\%, \quad (47)$$

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

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

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

$$E_{S1} \leq 100\% - E_{\text{пуск}} \%, \quad (48)$$

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

$$E_{S2,3} = 100\% \cdot \left(\frac{I_{\text{дв}}}{I_{\text{дв.ном}}}\right)^2, \quad (49)$$

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

$I_{\text{дв}}$ - ток, потребляемый электродвигателем,

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

- для первой ступени (сигнализация или отключение):

$$\frac{I_{\text{дв}}}{I_{\text{ном.дв}}} = 1,10, \text{ соответственно } E_{S3} = 100\% \cdot (1,10)^2 \approx 121\%;$$

Величина 1,1 выбрана исходя из допустимой возможной длительной работы электродвигателя в сети с напряжением составляющим 90 % от номинального, см. ГОСТ 13109-97 [13].

- для второй ступени (сигнализация):

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

Величина 0,9 выбрана исходя из возможной длительной работы двигателя в сети с напряжением составляющим 110 % от номинального, см. ГОСТ 13109-97 [13].

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

6.5.10 Пример расчета уставок тепловой защиты двигателей

6.5.10.1 Требуется определить параметры тепловой защиты АД серии А4

Данные для расчета:

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

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

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

Кратность пускового тока: $k_n = 5,5$

Кратность пускового момента 1,9

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

АД соответствует требованиям ГОСТ Р 52776-2007.

Пуск АД прямой от напряжения питающей сети.

Время пуска (по проекту): $t_n = 10 \text{ с}$

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

Класс изоляции двигателя: F с использованием по классу В.

6.5.10.2 Штатный ток выбираем равным номинальному току двигателя:

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

6.5.10.3 Рассчитаем минимально допустимую постоянную времени охлаждения статора:

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

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

$t_{дон}$ - допустимое время работы двигателя при перегрузке k_i^2 , поскольку двигатель соответствует ГОСТ 183-74, принимаем $t_{дон} = 120 \text{ с}$, $k_i = 1,5$.

6.5.10.4 Определим минимально допустимую постоянную времени нагрева электродвигателя T_{e1} с учётом его соответствия ГОСТ Р 52776-2007:

$$T_{e1} = \frac{A}{\ln\left(\frac{k^2 - 1}{k^2 - k_{max}}\right)} = \frac{150}{\ln\left(\frac{2^2 - 1}{2^2 - 1,278}\right)} \approx 1603 \text{ с} \approx 26,7 \text{ мин}$$

где k_{max} - предельная кратность перегрева, определяемая классом изоляции двигателя при изоляции класса F с использованием по классу В составляет 1,278 (см. таблицу 4).

6.5.10.5 Поскольку вентилятор охлаждения закреплен на валу двигателя, принимаем постоянную охлаждения двигателя:

$$T_{e2} = 4 \cdot T_{e1} \approx 107 \text{ мин},$$

6.5.10.6 Определяем относительный расчётный нагрев двигателя за время пуска:

$$E_{пуск} = k_{пуск}^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T_{e1}}}\right) \cdot 100 = 5,5^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{10}{1603}}\right) = 18,8 \%$$

Далее, исходя из допустимой относительной температуры двигателя, определяем максимально допустимое значение уставки E_{S1} :

$$E_{S1} \leq 100\% - E_{пуск} = 100\% - 18,8\% = 81,2$$

Принимаем:

$$E_{S1} = 80\%$$

6.5.10.7 В соответствии с методическими рекомендациями (см. п. 6.4.8) принимаем:

$$E_{s2} = 81\% ,$$

$$E_{s3} = 121\% .$$

6.5.10.8 Полученная характеристика работы тепловой модели приведена на рисунке 20.

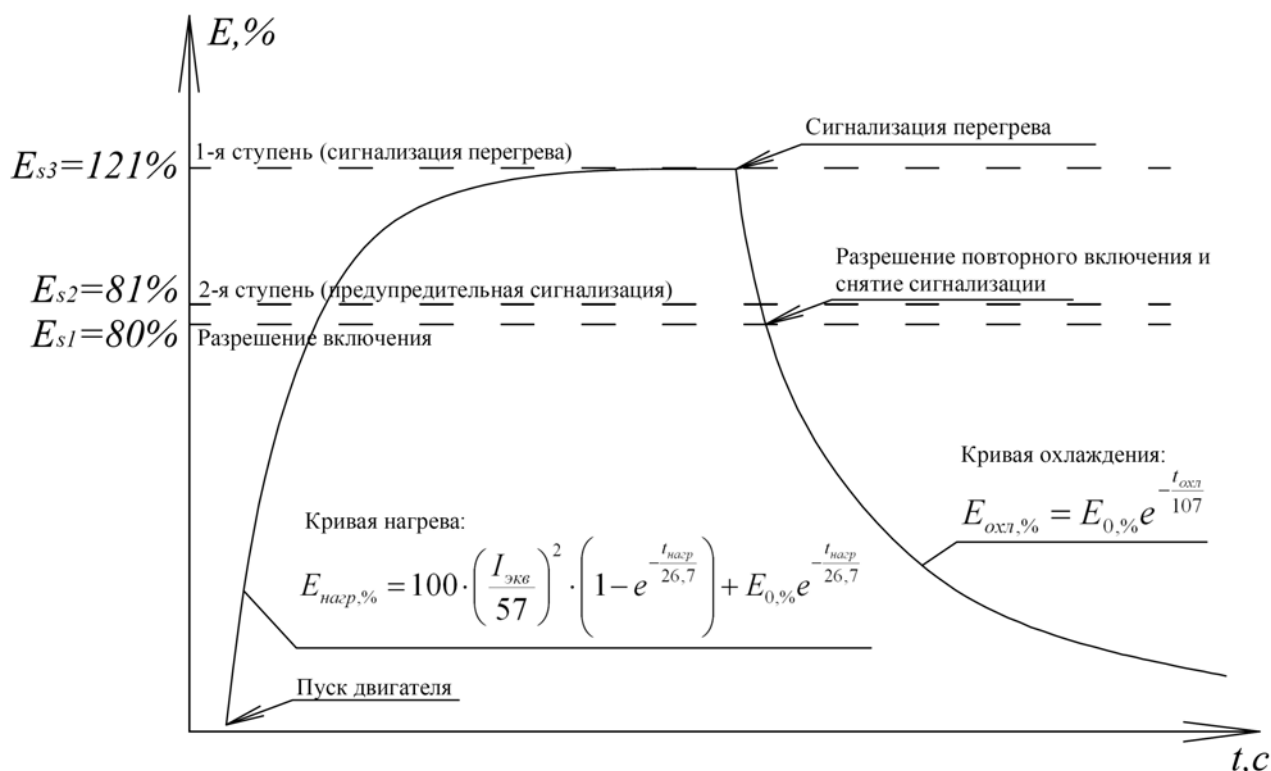


Рисунок 20 - Характеристика работы тепловой модели двигателя серии А4 мощностью 800 кВт

6.6 Экспериментальное определение постоянных времени тепловой модели двигателя

6.6.1 Тепловая модель включает в себя две постоянных времени – постоянную времени нагрева T_{e1} и постоянную времени охлаждения T_{e2} , а также уставку по штатному току двигателя $I_{ш}$.

Постоянные времена могут быть определены экспериментально путем оценки скорости нагрева и остывания двигателя. При наличии встроенных тепловых датчиков двигателя температура определяется по ним. При отсутствии встроенных датчиков, температура может быть определена косвенным образом - по температуре поверхности двигателя. Желательно, чтобы при проведении эксперимента температура окружающей двигатель среды оставалась постоянной. Рекомендуется всегда проводить экспериментальное определение параметров тепловой модели при проведении пуско-наладочных работ.

6.6.2 Методика определения уставок тепловой модели:

- 1) Электродвигатель останавливается на промежуток времени, необходимый для полного остывания, как внешней поверхности двигателя, так и его внутренних частей (зависит от конструкции двигателя, порядка 10 - 20 часов при отсутствии независимого охлаждения). При наличии независимого охлаждения двигателя, последнее должно быть включено на остановленном двигателе, в этом случае время охлаждения двигателя существенно сокращается (1 - 2 часа). Производится измерение температуры охлажденного двигателя, после чего двигатель запускается.
- 2) Снимается график (рисунок 21) процесса нагрева электродвигателя с интервалом времени – 60 секунд. Нагрузка двигателя – постоянная, не менее 50 % от номинальной нагрузки двигателя. Выполняется 120 измерений, или больше, если температура двигателя не достигла установившегося значения.
- 3) По полученному графику определяется установившееся значение температуры электродвигателя при постоянной нагрузке.
- 4) Двигатель останавливается и снимается график (рисунок 22) охлаждения остановленного двигателя аналогично п. 2. При наличии независимых устройств охлаждения двигателя они должны находиться в таком состоянии (включены или отключены), в каком они будут находиться при остановленном двигателе в процессе эксплуатации.
- 5) По полученному графику определяется установившееся значение температуры остановленного электродвигателя (должна соответствовать температуре до пуска).
- 6) Разница температур двигателя через 60 с после запуска из холодного состояния ($t_{\text{заверш.пуск.}}$) и двигателя при постоянной нагрузке ($t_{\text{пост.нагр.}}$) принимается за $\Delta t_{\text{нагр.}}$. Постоянная времени нагрева определяется как время от момента измерения температуры $t_{\text{заверш.пуск.}}$ до момента достижения температурой значения:

$$t_{\text{заверш.пуск.}} + \Delta t_{\text{нагр.}} * 0,632 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где, $t_{\text{заверш.пуск.}}$ – температура двигателя через 60 с после запуска из холодного состояния, $^\circ\text{C}$;
 $t_{\text{нагр.}} = t_{\text{пост.нагр.}} - t_{\text{заверш.пуск.}}$ – разница температур двигателя при постоянной нагрузке и температуры двигателя после завершения пуска, $^\circ\text{C}$.

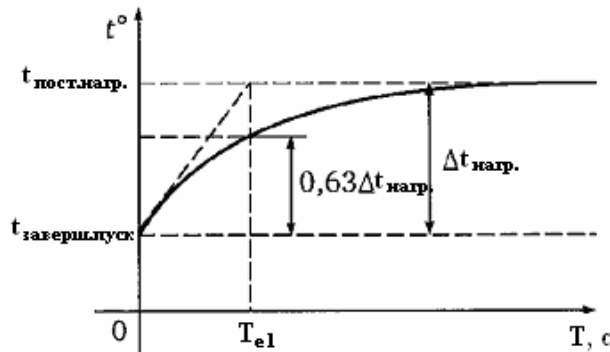


Рисунок 21 - Определение T_{e1} по графику нагрева двигателя

- 7) Разница температур двигателя при постоянной нагрузке ($t_{\text{пост.нагр.}}$) и полностью остывшего после включения на постоянную нагрузку двигателя ($t_{\text{полн.ост.2}}$) принимается за $\Delta t_{\text{ост.}}$. Постоянная времени охлаждения T_{e2} определяется как время от момента отключения двигателя до достижения температурой значения:

$$t_{\text{полн.ост.}} + \Delta t_{\text{ост.}} * 0,368 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $t_{\text{полн.ост.}}$ – температура полностью остывшего после включения на постоянную нагрузку двигателя, $^\circ\text{C}$;

$\Delta t_{\text{ост.}} = t_{\text{пост.нагр.}} - t_{\text{полн.ост.}}$ – разница температур двигателя при постоянной нагрузке и полностью остывшего двигателя, $^\circ\text{C}$.

Как правило, постоянная времени охлаждения в 2 - 4 раза больше постоянной времени нагрева.

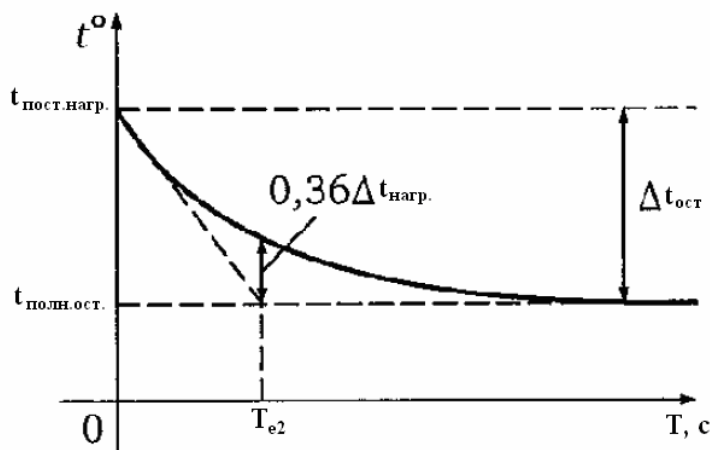


Рисунок 22 - Определение T_{e2} по графику охлаждения двигателя

- 8) Ток штатного режима $I_{ш}$ должен быть равен номинальному вторичному току двигателя.
- 9) После задания в блоке постоянных времени T_{e1} и T_{e2} , а также штатного тока двигателя $I_{ш}$ необходима проверка правильности работы тепловой модели. Проверка осуществляется аналогично пунктам 1 - 5, при этом кроме текущей температуры двигателя каждые 60 секунд фиксируется значение перегрева, индицируемое на дисплее БМРЗ. После завершения эксперимента на основе полученных значений строится график процессов нагрева и охлаждения, где установившееся значение перегрева, индицируемое БМРЗ, приравнивается к установившейся температуре двигателя при постоянной нагрузке. По графику проводится определение погрешности тепловой модели в каждой точке измерения по формуле:

$$\Delta t = \frac{t_{TM, \%} * t_{двиг.уст.}}{t_{TMуст.}} - t_{двиг}$$

где: $t_{TM, \%}$ - текущее значение перегрева, индицируемое БМРЗ, %;

$t_{двиг.уст.}$ - установившееся значение повышения температуры двигателя относительно температуры полностью остывшего двигателя, °C;

$t_{TMуст.}$ - установившееся значение перегрева, индицируемое БМРЗ, %;

$t_{двиг}$ - текущее значение повышения температуры двигателя относительно температуры полностью остывшего двигателя, °C.

Если погрешность не превышает ± 5 °C, настройка тепловой модели считается успешной.

- 10) На точность настройки тепловой модели существенное влияние оказывают условия охлаждения двигателя (изменение температуры окружающей среды, наличие ветра при наружной установке и т.п.). В случае, если погрешность превышает указанное допустимое значение, необходимо повторить шаги 1 - 8. При невозможности настройки модели путем повторного эксперимента, а также при существенном отличии полученных характеристик нагрева и охлаждения двигателя от представленных на рисунке 1 и 2, целесообразно направить экспериментальные данные для анализа в ООО «НТЦ» Механотроника».

7 Расчет защиты синхронных двигателей от асинхронного режима

7.1 Требования ПУЭ к защите синхронных двигателей от асинхронного режима

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

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

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

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

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

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

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

Длительная работа СД в асинхронном режиме (потеря возбуждения) приводит к тепловым перегрузкам и перегреву обмотки статора и демпферных контуров ротора. Защита СД от потери возбуждения, как правило, выполняется на основе максимальной токовой защиты с регулируемым временем возврата. Однако, такое исполнение защиты не позволяет защитить СД работающих с технологическими перегрузками. Поэтому целесообразно всегда выполнять защиту от асинхронного режима аналогично защите синхронных генераторов - на основе реле сопротивления [15].

По аналогии с генератором [18], проанализируем сопротивление на выводах питания двигателя (см. рисунок 23). При нормальном режиме работы (с опережающим $\cos \varphi = 0,9$) вектор полного сопротивления прямой последовательности на выводах питания двигателя находится во 2-м квадранте (двигатель отдает реактивную мощность, потребляет активную). При потере возбуждения двигатель начинает потреблять из сети значительную реактивную мощность, при этом продолжает потреблять активную мощность. При этом вектор полного сопротивления смещается в 3-й квадрант. Поэтому реле сопротивления включается так, чтобы окружность его характеристики размещалась в 3-м и 4-м квадрантах.

Согласно экспериментальным исследованиям [18], сопротивление на выводах синхронной машины при потере возбуждения может изменяться в диапазоне от $(0,3 \div 0,5) \times x''_d$ до $(1,1 \div 1,4) \times x_d$ (см. рисунок 23, кривая 1), где x''_d – сверхпереходное сопротивление СД, Ом, x_d – индуктивное сопротивление прямой последовательности СД, Ом.

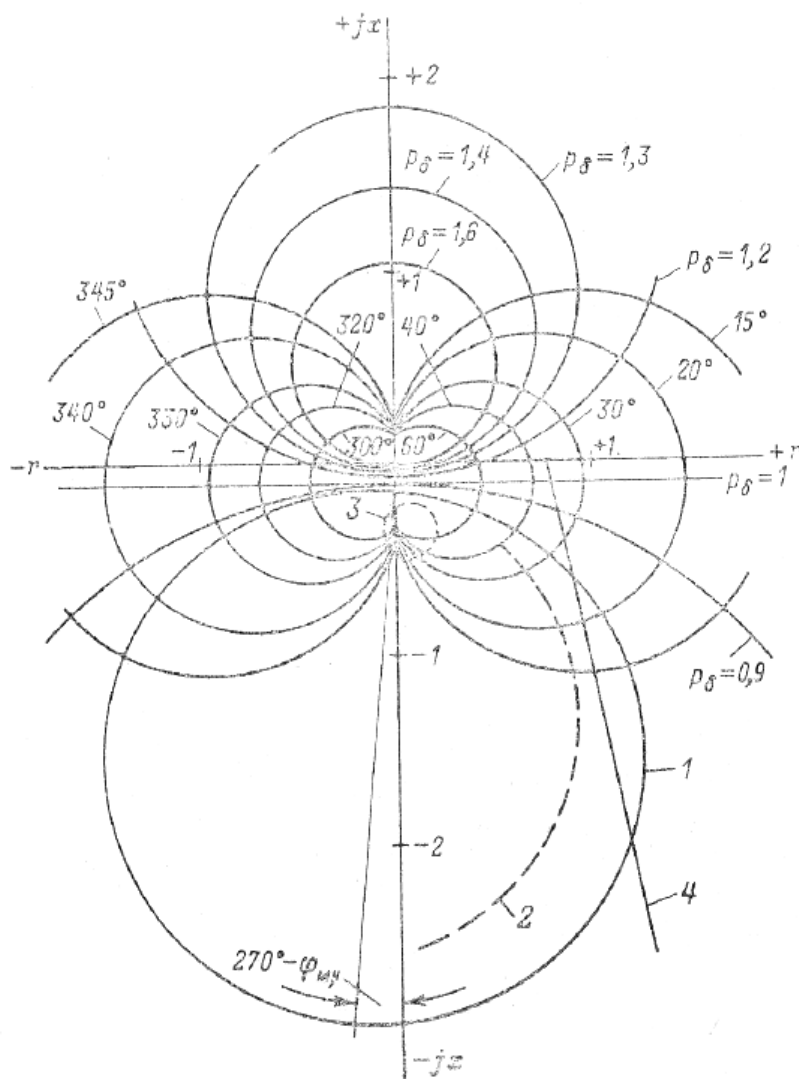


Рисунок 23 - Круговые диаграммы полного сопротивления на выводах синхронной машины и характеристика реле

В соответствии с вышесказанным, характеристика области срабатывания защиты выполняется в виде окружности, расположенной симметрично на комплексной плоскости относительно оси jX (рисунок 24) и проходит через точки с координатами:

$$(0,3 \div 0,5)x''_d \text{ и } (1,1 \div 1,4)x_d,$$

где x''_d – сверхпереходное сопротивление СД, Ом;

x_d – индуктивное сопротивление прямой последовательности СД, Ом.

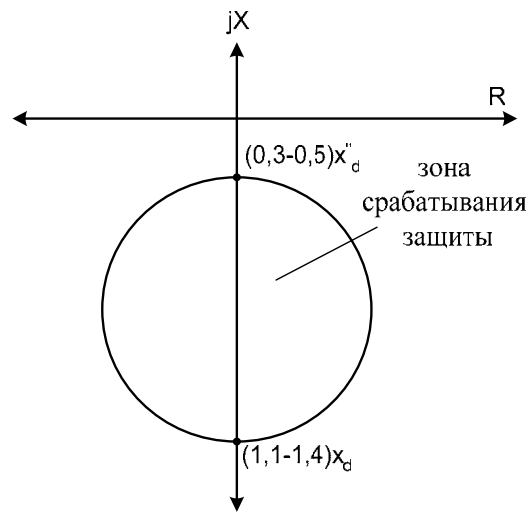


Рисунок 24 - Характеристика защиты электродвигателя от потери возбуждения

Время срабатывания защиты принимают $1 \div 2$ с.

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

К достоинствам такой защиты следует отнести корректность выявления потери возбуждения и простоту расчёта уставок, а к недостаткам – зависимость от исправности измерительных цепей напряжения.

7.3 Пример расчета защиты синхронного двигателя от асинхронного режима.

7.3.1 Требуется определить параметры защиты от потери возбуждения электродвигателя СТД-4000-2

Данные для расчета:

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

Полная мощность двигателя: $S_{ном.дв} = 4560$ кВА

Напряжение: $U_{ном.дв} = 10$ кВ

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

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

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

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

Сверхпереходное сопротивление двигателя в именованных единицах получаем из формулы:

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

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

$$x_d = \frac{x_d(\%) \cdot r_6}{100\%} = \frac{185,1\% \cdot 22}{100\%} \approx 40,7 \text{ Ом}$$

7.3.3 Строим характеристику работы защиты, см. рисунок 24.

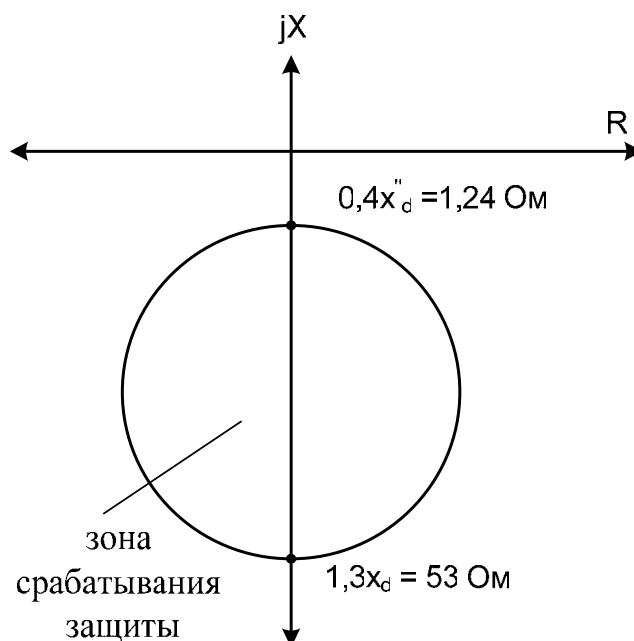


Рисунок 25 - Характеристика защиты электродвигателя СТД-4000-2 от потери возбуждения

8 Выбор уставок устройства резервирования при отказе выключателя (УРОВ)

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

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

Ток пуска УРОВ выбирают из диапазона: $I_{с.з} = 0,05 \div 0,20 I_{ном.дв.}$

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

$$I_{с.з} = (0,05 \div 0,1) I_{ном.дв} \text{ А} \quad (50)$$

Время задержки формирования выходного сигнала "УРОВ_д" при срабатывании защит, действующих на отключение, определяется из формулы [6, 15]:

$$t_{уров} = t_{вык} + t_{воз РЗ} + t_{ош РВ} + t_{зан}, \quad (51)$$

где $t_{вык}$ - время отключения выключателя (как правило: $0,05 \div 0,1$ с);

$t_{воз РЗ}$ - время, необходимое для возврата РЗ, пускающей УРОВ, (для терминала БМРЗ – $0,01$ с);

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

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

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

9 Защита минимального тока электродвигателя

Защита минимального тока является технологической защитой и предназначена для выявления ненормального режима работы при аварийном сбросе нагрузки на валу электродвигателя. Параметр срабатывания защиты по току выбирается из условий минимально возможной нагрузки электродвигателя во всех технологических режимах его работы при проведении пуско-наладочных работ и по согласованию с технологическим персоналом. Защита выполняется с действием на сигнализацию и с регулируемым значением параметра срабатывания по току:

$$I_{с.з} = (0,2 \div 0,6) I_{ном.дв}. \quad (52)$$

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

10 Функция опережающего отключения (ФОО)

Функция опережающего отключения предназначена для отключения синхронного двигателя при провале питающего напряжения (например, при близких КЗ) при появлении условий перехода двигателя в асинхронный режим.

10.1 Анализ устойчивости узлов нагрузки с синхронными электродвигателями [17]

10.1.1 Асинхронный режим в энергосистеме

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.

Асинхронный режим в энергосистеме характеризуется следующими процессами:

- 1) имеет место периодическое изменение угла между несинхронными ЭДС частей системы от 0° до 360° с частотой скольжения;
- 2) наблюдаются периодические качания напряжения, показанные на рисунке 26.

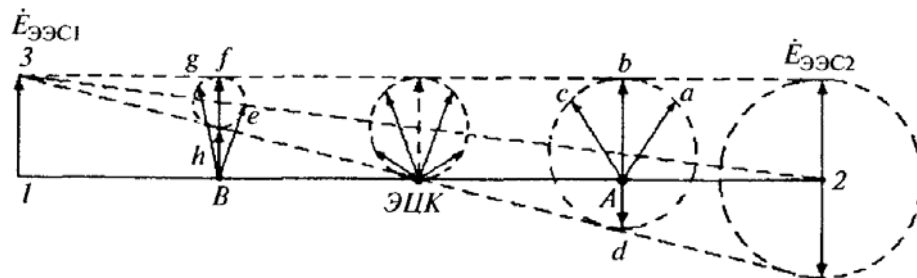


Рисунок 26 - Топографическая диаграмма качаний напряжения вдоль ЛЭП при асинхронном режиме

На рисунке по горизонтальной оси 1 - 2 в масштабе отложено сопротивление $X_{\dot{\epsilon}\epsilon C1} + X_L + X_{\dot{\epsilon}\epsilon C2}$ (для энергосистем бесконечной мощности - длина ЛЭП), по концам которой расположены $E_{\dot{\epsilon}\epsilon C1}$ и $E_{\dot{\epsilon}\epsilon C2}$. Условно принимаем, что вектор $E_{\dot{\epsilon}\epsilon C1}$ неподвижен, а $E_{\dot{\epsilon}\epsilon C2}$ вращается с частотой скольжения, поэтому начало вектора $E_{\dot{\epsilon}\epsilon C2}$ образует окружность. Соединяем верхнюю и нижнюю точки этой окружности, а также ее центр (точка 2) с точкой 3 прямыми линиями. Прямая 2 - 3 является геометрическим местом центров окружностей, на которых расположены начала векторов напряжений вдоль ЛЭП. Например, в точке А линии электропередачи напряжение будет периодически изменяться в соответствии с положением векторов aA, bA, cA, dA , в точке В векторов eB, fB, gB, hB . В точке ЭЦК (электрический центр качаний) напряжение периодически становится равным нулю. Характер изменения напряжения в разных точках ЛЭП показан на рисунке 27.

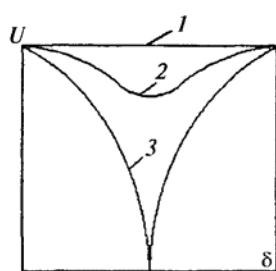


Рисунок 27 - Характер изменения напряжения в разных точках ЛЭП при асинхронном ходе: 1 – на концах ЛЭП, 2 – в точках А и В, 3 – в электрическом центре качаний

3) Периодически изменяется ток в ЛЭП, в соответствии с рисунком 28.

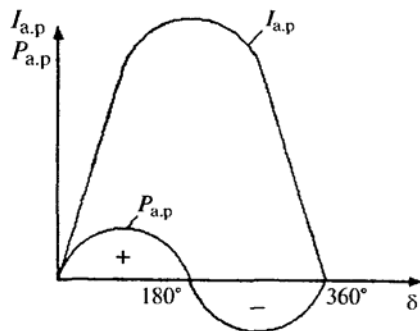


Рисунок 28 - Характер изменения мощности и тока в ЛЭП при асинхронном ходе
Ток асинхронного режима определяется по выражению:

$$I_{a.p.} = \frac{2E}{X_{\text{ЭЭС1}} + X_{\text{Л}} + X_{\text{ЭЭС2}}} \cdot \sin \frac{\delta}{2}$$

при $\delta = 0^\circ$ или 360° , $I_{a.p.} = 0$; при $\delta = 180^\circ$, $I_{a.p.} = \max$;

4) Периодически изменяется активная мощность в линии (происходят качания активной мощности). Из расчетного выражения мощности:

$$P_{a.p.} = \frac{E_{\text{ЭЭС1}} \cdot E_{\text{ЭЭС2}}}{X_{\text{ЭЭС1}} + X_{\text{Л}} + X_{\text{ЭЭС2}}} \cdot \sin \delta$$

видно, что средняя активная мощность за период качаний равна нулю, т.е. активная мощность по линии не передается.

10.1.2 Статическая устойчивость синхронных двигателей (СД)

Мощность, потребляемая синхронным двигателем от питающей энергосистемы, характеризуется уравнением:

$$P_{\text{ДВ}} = \frac{U \cdot E_{\text{ДВ}}}{X_{\text{экв}}} \cdot \sin \delta,$$

где U - напряжение на шинах энергосистемы;

$E_{\text{ДВ}}$ - ЭДС электродвигателя;

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

δ - фазовый угол между ЭДС электродвигателя и напряжением энергосистемы.

Характеристика зависимости $P_{\text{ДВ}}$ от угла δ показана на рисунке 29.

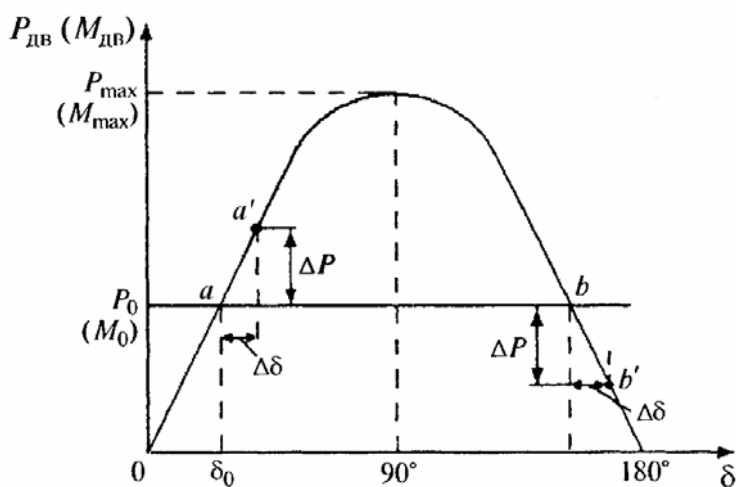


Рисунок 29 - Угловая характеристика синхронного двигателя

Из характеристики видно, что мощность электродвигателя при увеличении угла δ сначала возрастает, достигая максимума, и затем падает. При заданных $E_{дв}$ и U существует максимум мощности (при угле 90°), который зависит от сопротивления питающей сети.

При синхронной частоте вращения относительные значения мощности двигателя и момента численно равны, поэтому кривая $P = f(\delta)$ является и характеристикой вращающего момента двигателя. Характеристика момента сопротивления изображена прямой линией: $P_0 = f(\delta)$. Точки пересечения a и b определяют возможные режимы работы двигателя, однако устойчиво двигатель может работать только в точке a (соответствует углу δ_0). Действительно, при работе в точке a и случайном кратковременном увеличении угла δ на величину $\Delta\delta$ увеличивается и электромагнитный момент синхронного двигателя на величину ΔP , под влиянием которого ротор несколько ускоряется. При этом угол δ уменьшается, и после нескольких колебаний возвращается к значению δ_0 . При случайном кратковременном уменьшении угла δ ротор несколько притормаживается, угол δ возрастает и после нескольких колебаний вновь возвращается к значению δ_0 . Если же подобное кратковременное увеличение угла на $\Delta\delta$ произойдет в точке b , то электромагнитный момент не увеличится, а уменьшится. Это вызовет дальнейшее прогрессивное увеличение угла δ , в результате чего двигатель выйдет из синхронизма.

Таким образом, восходящая ветвь характеристики на рисунке 29 это 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 $\frac{M_{\max}}{M_{ном}}$ и $\cos\varphi$ двигателя. Чем меньше загрузка двигателя и чем больше каталожное отношение $\frac{M_{\max}}{M_{ном}}$, тем больше запас устойчивости. Обычно двигатели конструируют для работы с опережающим $\cos\varphi = 0,9$. При переходе в режим с $\cos\varphi = 1$ или отстающим устойчивость ухудшается вследствие уменьшения ЭДС двигателя. Например, для СТД-12500-2 при его работе с номинальной загрузкой и опережающим $\cos\varphi = 0,9$ $\delta_0 \approx 45^\circ$, а запас устойчивости составляет 42 %. При работе с той же загрузкой и $\cos\varphi = 1$ $\delta_0 \approx 62^\circ$, а запас устойчивости 12 %. При загрузке 80 % и $\cos\varphi = 1$ $\delta_0 \approx 57^\circ$, а запас устойчивости 20 %. Эти данные приведены для случая питания от шин бесконечной мощности.

10.1.3 Динамическая устойчивость синхронных двигателей (СД)

Рассмотрим случай внезапного возмущения во внешней сети, например близкого трехфазного КЗ на одной из линий W1÷W5 (см. рисунок 30). Угловая характеристика мощности до КЗ показана на рисунке 31, кривая 1.

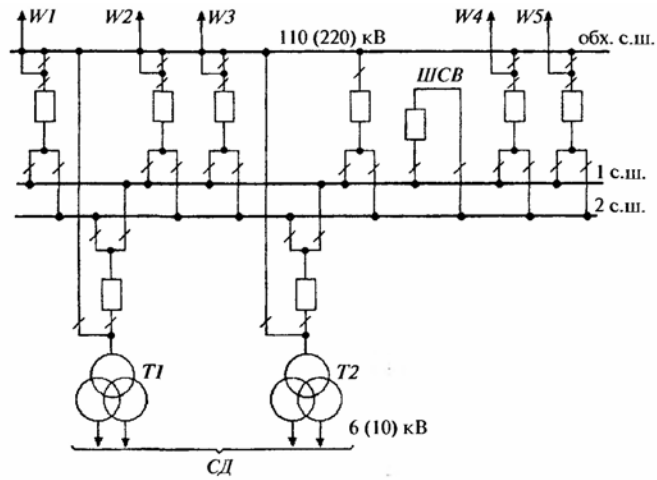


Рисунок 30 - Типовая схема узловой подстанции 110(220) кВ с синхронной нагрузкой

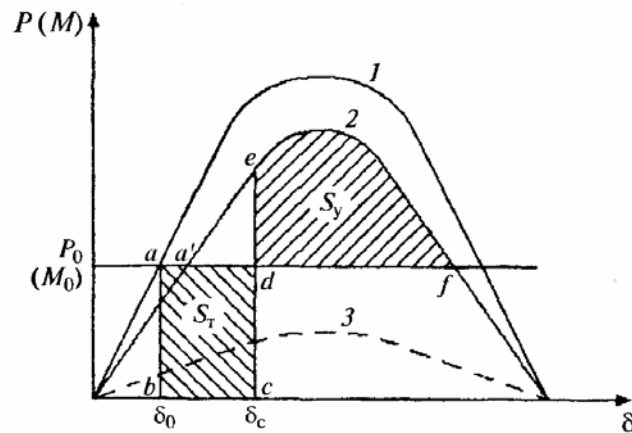


Рисунок 31 - Характеристика мощности синхронного двигателя при отключении близкого трехфазного КЗ

Синхронный двигатель работал устойчиво с моментом сопротивления на валу M_0 и внутренним углом δ_0 . В аварийном режиме вращающий момент двигателя становится равным нулю, его характеристика переходит из точки a в точку b . Пока КЗ не отключено, двигатель тормозится и угол δ_0 увеличивается до δ_c . В момент отключения КЗ характеристика переходит из точки c в точку e , лежащую на кривой 2, соответствующей новому режиму работы энергосистемы. Энергия торможения двигателя соответствует площадке $abcd$, называемой площадкой торможения S_τ . Площадка edf называется площадкой ускорения S_ν , она соответствует энергии ускорения, которую приобретет двигатель в новом режиме. Если $S_\nu > S_\tau$ то устойчивость сохранится, режим установится в точке a' после некоторых колебаний. Если $S_\tau > S_\nu$ то двигатель теряет устойчивость.

При удаленном трехфазном КЗ на смежной линии или при несимметричном КЗ, напряжение прямой последовательности в линии связи двигатель-энергосистема не снижается до нуля; характеристика этого режима показана на рисунке 31 штриховой линией 3, соответственно и площадка торможения будет меньше (без нижней части, отрезаемой кривой 3). Очевидно, что этот режим легче, чем режим близкого трехфазного КЗ.

Таким образом, на динамическую устойчивость влияют:

- 1) **вид, удаленность и длительность КЗ.** Наиболее опасны близкие КЗ. Удаленные КЗ менее опасны. По видам КЗ наиболее опасно - трехфазное. Если внешнее возмущение приводит к потере устойчивости СД, то возникает процесс, аналогичный описанному выше для энергосистемы ЭЭС2. Разница заключается в скорости протекания переходного процесса. В начальной фазе, когда возникло КЗ, генераторы начинают ускоряться, а двигатели тормозиться. Потери в цепи КЗ создают дополнительный тормозной момент, который, притормаживая генератор, замедляет рост угла δ , а притормаживая двигатель, способствует увеличению угла δ . Увеличению угла δ двигателей способствуют и повышенные по сравнению с мощными синхронными генераторами активные потери в статоре и роторе двигателя. После отключения КЗ угол δ 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 с потерей устойчивости узла нагрузки с СД показан на рисунке 33, без потери устойчивости - на рисунке 32;

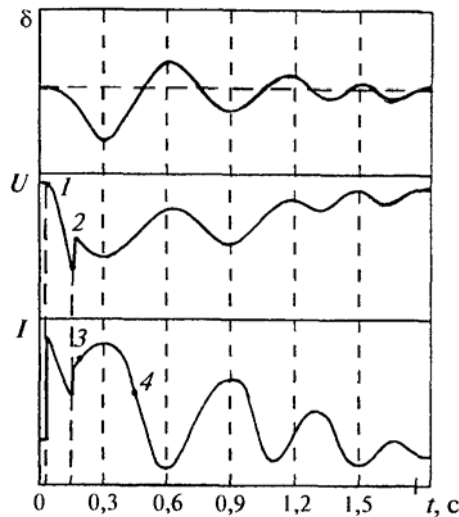


Рисунок 32 - Качания угла δ , напряжения на шинах секции U и тока через ввод I при переходном процессе без потери устойчивости

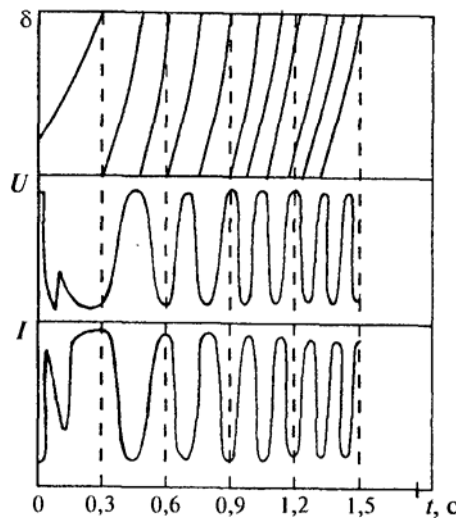


Рисунок 33 - Качания угла δ , напряжения на шинах секции U и тока через ввод I при переходном процессе с потерей устойчивости

- 2) **нагрузка СД.** Чем больше нагрузка СД в предшествующем режиме, тем опаснее внешние возмущения;
- 3) **условия послеаварийного режима.** Опаснее послеаварийный режим, в котором сопротивление внешней сети возрастает по сравнению с доаварийным режимом (например, опаснее отключение одной из двух питающих линий 110 (220) кВ, чем отключение любой другой отходящей от шин подстанции 110 (220) кВ линии), поскольку снижается вся угловая характеристика мощности.

10.1.4 Поведение узла нагрузки с СД при потере устойчивости

Особый интерес для анализа поведения релейной защиты и противоаварийной автоматики представляет характер переходных процессов в линиях связи, на вводах к секциям, от которых питаются СД, и на сборных шинах.

Известно, что СД сохраняют синхронный выбег, пока генерируемое ими напряжение не снизится до значения примерно $0,4 \cdot U_{ном.дв}$, в пределах этого критерия все СД узла нагрузки можно представить (эквивалентировать) одним электродвигателем, особенно если их мощность, инерционные постоянные и загрузка примерно одинаковы. Поэтому все вышеизложенное для одного двигателя справедливо и для узла нагрузки с СД.

Если внешнее возмущение не приводит к нарушению устойчивости группы СД, то переходный процесс носит характер затухающих колебаний, показанных на рисунке 32. 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 максимальная токовая защита (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 $2 \div 3$ 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 натуральных экспериментов.

10.2 Исполнение функции опережающего отключения на базе терминала БМРЗ-ДС

Для исключения асинхронных режимов работы с возбуждением, рекомендуется использовать функцию опережающего отключения, назначение которой заключается в том, чтобы выявить условия, при которых электродвигатель гарантированно перейдет в асинхронный режим. В этом случае производится отключение электродвигателя с «опережением» и до возникновения опасных процессов связанных с асинхронным ходом.

Функция опережающего отключения (далее ФОО) имеет грубую, точную и резервную ступени. Пуск ФОО производится при возникновении КЗ во внешней сети, которое фиксируется по факту одновременного скачкообразного снижения напряжения, активной мощности и увеличения тока прямой (обратной) последовательности.

После пуска в темпе переходного процесса идет накопление информации, необходимой для работы точной ступени (длительность этого процесса, как правило, составляет не более 250 мс). В течение этого времени по результатам каждого измерения проводится проверка условий срабатывания грубой ступени, которая определяет условия перехода синхронного двигателя в асинхронный режим по факту достижения приращения угла ротора уставки в радианах, определяемой автоматически по эмпирической формуле:

$$\Delta\delta_{ср\grave{а}б} = 2,8 - 1,1 \cdot \frac{P_{доав}}{P_{ном}} \text{ рад.}, \quad (53)$$

где $P_{доав}$ – мощность синхронного двигателя в доаварийном режиме;
 $P_{ном}$ – номинальная мощность синхронного двигателя.

При этом приращение угла $\Delta\delta_{ср\grave{а}б}$ рассчитывается в темпе переходного процесса по выражениям:

$$\Delta\delta = \int_{t_0}^t s \, dt \text{ рад.}, \quad (54)$$

$$s = \frac{1}{T_J} \int_{t_0}^t (P_{доав} - P - R_{э\grave{к}в} \cdot \sum i^2) \cdot dt \quad (55)$$

где s – скольжение ротора синхронного двигателя в текущий момент времени;

P – текущая мощность синхронного двигателя в переходном процессе, Вт;

$R_{э\grave{к}в}$ – эквивалентное сопротивление активных потерь СД в режиме КЗ, Ом;

$\sum i^2$ – сумма квадратов текущих мгновенных значений фазных токов СД, А;

T_J – постоянная инерции двигателя совместно с приводом, с.

Если грубая ступень сработала, то выдается команда на отключение двигателя. Если грубая ступень не сработала, то после отключения КЗ вступает в работу точная ступень, которая прогнозирует переход СД в асинхронный режим путем сравнения энергий (площадей) торможения и ускорения (см. рисунок 31). Для устойчивой работы двигателя должно выполняться соотношение:

$$\frac{s_Y - s_T}{s_Y} \geq k_D, \quad (56)$$

где k_D – коэффициент динамической устойчивости, принят экспериментально равным 0,22.

Расчет энергий (см. рисунок 31) торможения и ускорения выполняется в течение переходного процесса по уравнениям, которые здесь не приводятся. Если ни грубая, ни точная ступени не сработали (процесс устойчив), то производится их возврат в исходное состояние.

На случай отказа грубой и точной ступеней, например при неправильно введенных уставках, предусмотрена резервная ступень, отключающая СД после его перехода в асинхронный режим с возбуждением. Пуск этой ступени происходит на время 0,4 с после возврата грубой и точной ступеней. Команда на отключение СД формируется, если в течение 60 мс одновременно выполняются следующие условия:

$$\begin{cases} P < P_{доав}; \\ U < 0,8 \cdot U_{ном}; \\ I > 1,5 \cdot I_{ном}. \end{cases} \quad (57)$$

10.3 Методика расчета уставок функции опережающего отключения

10.3.1 Расчет уставки по номинальной активной мощности:

$$P_{ном} = \frac{1000 \cdot P_{ном.дв}}{K_I \cdot K_U} \text{ Вт}, \quad (58)$$

где $P_{ном.дв}$ - номинальная мощность электродвигателя, кВт;
 K_I – коэффициент трансформации трансформаторов тока;
 K_U – коэффициент трансформации трансформаторов напряжения.

10.3.2 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 динамики.

10.3.3 Постоянная инерции двигателя совместно с приводом:

$$T_J = \frac{GD_{дв}^2 \cdot n_{ном.дв}^2 + GD_{мех}^2 \cdot n_{ном.мех}^2}{365 \cdot P_{ном.дв}} \text{ с}, \quad (59)$$

где $GD_{дв}^2$ - собственный маховый момент двигателя, $\text{т} \cdot \text{м}^2$;

$GD_{мех}^2$ - маховый момент приводного механизма $\text{т} \cdot \text{м}^2$;

$n_{ном.дв}$ - номинальная скорость вращения двигателя, об/мин;

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

$P_{ном.дв}$ - номинальная мощность двигателя, кВт.

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

10.3.4 Эквивалентное сопротивление активных потерь в синхронном двигателе во время КЗ $R_{экв}$, Ом, определяется по формуле:

$$R_{экв} = (R_{экв.дв} + R_{экв.сети}) \cdot \frac{K_I}{K_U} \text{ Ом}, \quad (60)$$

где K_I – коэффициент трансформации трансформаторов тока;

K_U – коэффициент трансформации трансформаторов напряжения;

$R_{экв.дв}$ - приведенное к напряжению статора эквивалентное сопротивление активных потерь в синхронном двигателе, рассчитывается по паспортным данным синхронных двигателей, для некоторых типов двигателей значения приведены в таблице 5, Ом;

Таблица 5

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

$R_{экв.сети}$ - активное сопротивление внешней сети от зажимов синхронного двигателя до точки подключения измерительных трансформаторов напряжения, Ом.

11 Защита от колебаний нагрузки

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

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

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

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

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

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

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

$$A_{кол} = \frac{\Delta P_{мин}}{P_{ном.дв}} \%, \quad (61)$$

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

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

11.3 Характеристика работы защиты представлена на рисунке 34.

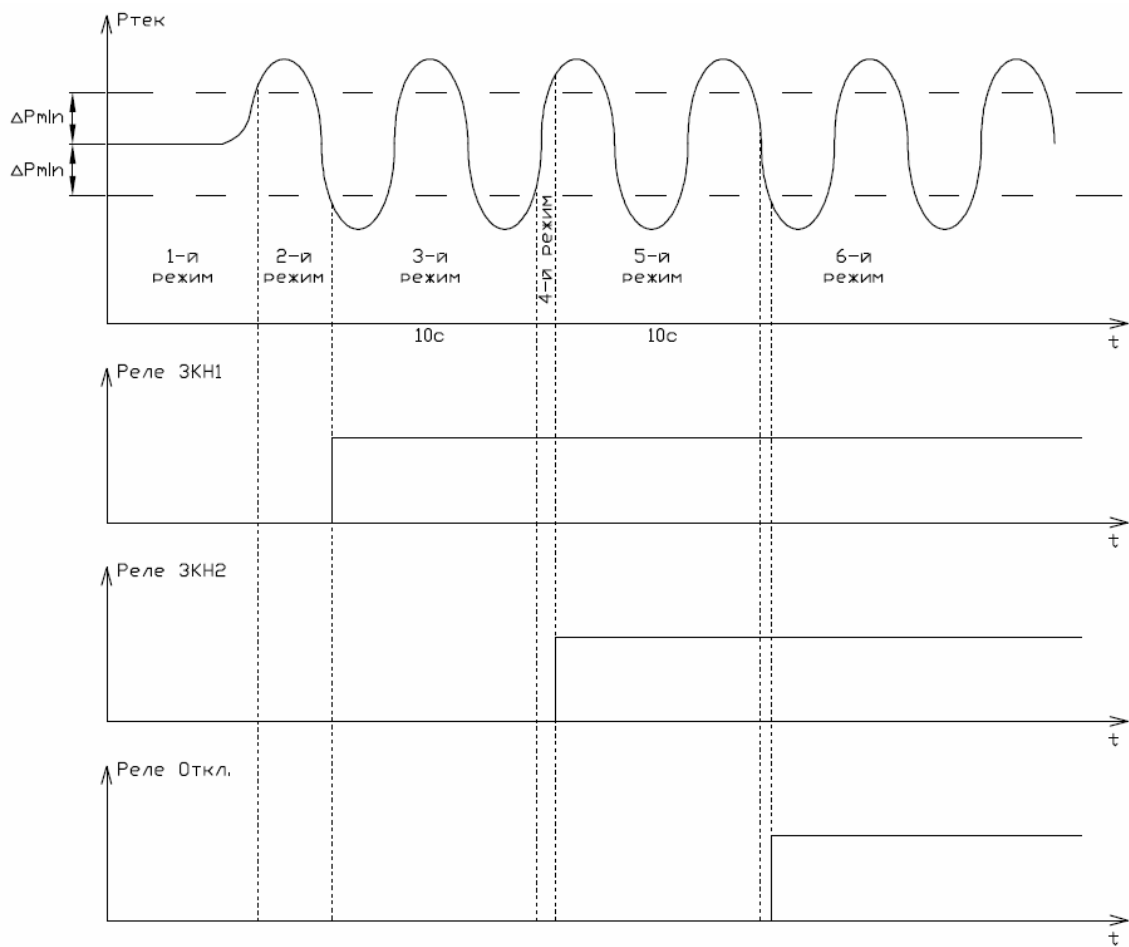


Рисунок 34 - Характеристика работы защиты от колебаний нагрузки

12 Сводная таблица по применению защит

Таблица 6. Рекомендации по применению защит

Вид потребителя	Вид защиты		
	ТО	ДЗТ	ДТО
Однокоростной асинхронный двигатель	Необходима	Необходима при мощности двигателя более 5 МВт либо если ТО не удовлетворяет требованиям по чувствительности	Рекомендуется к применению всегда в качестве вспомогательного элемента при использовании ДЗТ
Двухкоростной асинхронный двигатель	Необходима на каждую скорость		
Синхронный двигатель	Необходима		

Таблица 6. Рекомендации по применению защит (продолжение)

Вид потребителя	Вид защиты		
	Защита от ЗЗ	ЗМН	ЗПП
Однокоростной асинхронный двигатель	При мощности менее 2 МВт необходима	Необходима, если двигатель не участвует в самозапуске	Не используется
Двухкоростной асинхронный двигатель	при токе замыкания на землю 10 А и более, при мощности более 2 МВт - необходима при токе замыкания	Необходима, если двигатель не участвует в самозапуске, должна переводить двигатель на низшую скорость вращения	
Синхронный двигатель	на землю 5 А и более. Рекомендуется к применению всегда.	Неприменима	Необходима, если двигатель не участвует в самозапуске

Таблица 6. Рекомендации по применению защит (продолжение)

Вид потребителя	Вид защиты		
	ЗНР	ЗП	ЗАР
Односкоростной асинхронный двигатель	Рекомендуется к применению всегда	Рекомендуется к применению всегда	Неприменима
Двухскоростной асинхронный двигатель			
Синхронный двигатель			Необходима

Таблица 6. Рекомендации по применению защит (окончание)

Вид потребителя	Вид защиты		
	УРОВ	ФОО	ЗКН
Односкоростной асинхронный двигатель	Рекомендуется к применению всегда	Неприменима	Необходима в случае возможности режима колебаний нагрузки
Двухскоростной асинхронный двигатель			
Синхронный двигатель		Рекомендуется к применению всегда	

В таблице 6 приняты следующие обозначения и сокращения:

ТО – токовая отсечка;

ДЗТ – дифференциальная защита с торможением;

ДТО – дифференциальная токовая отсечка;

Защита от ЗЗ – защита от замыканий на землю;

ЗМН – защита минимального напряжения;

ЗПП – защита от потери питания;

ЗНР – защита от неполнофазного режима;

ЗП – защита от перегрузки;

ЗАР – защита от асинхронной работы;

УРОВ – устройство резервирования при отказе выключателя;

ФОО – функция опережающего отключения;

ЗКН – защита от колебаний нагрузки.

Список использованных источников

1. Правила устройства электроустановок. Шестое издание.
2. РД 153-34.0-35.301-2002. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения.
3. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. – М.:«Энергия», 1980
4. Шабад М.А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты, Экспериментальная и расчетные проверки, конспект лекций. – СПб, ПЭИПК, 2010.
5. Корогодский В.И., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – М.:Энергоатомиздат, 1987
6. Александров А.М. Выбор уставок срабатывания защит асинхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – СПб: ПЭИПК, 2010
7. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных двигателей. – М.:«Энергия», 1977
8. Шабад М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6 – 35 кВ. – СПб, ПЭИПК, 2001.
9. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М. Энергоатомиздат, 1984.
10. ГОСТ 183-74. Межгосударственный стандарт. Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия, изд. июль 2001 г. (отменен 01.07.2010 г)
11. ГОСТ Р 52776-2007. Национальный стандарт РФ. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики. (введен 01.01.2008 г.)
12. ГОСТ 8865-93 Межгосударственный стандарт. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация.
13. ГОСТ 13109-97 Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
14. ГОСТ 7746-2001 Межгосударственный стандарт. Трансформаторы тока. Общие технические условия.
15. Соловьёв А.Л. Защита генераторов малой и средней мощности терминалами «Сириус-ГС». – М.:НТФ «Энергопресс» 2009 г.
16. Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Кибель В.М. и др. Трансформаторы тока. – Л.:Энергоатомиздат, 1989 г.
17. Беляев А.В. Противоаварийное управление в узлах нагрузки с синхронными двигателями большой мощности. – М.: НТФ «Энергопресс», 2004
18. Вавин В.Н. Релейная защита блоков турбогенератор-трансформатор. – М.: Энергоиздат, 1982
19. Чернобровов Н.В. Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем. – М.:Энергоатомиздат, 1998