

Выпуск № 40

Методические указания по расчету продольной дифференциальной токовой защиты ANSI 87M

М.Г. Попов

Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет (СПбГТУ)
каф. «Электрические станции и автоматизация энергосистем»

В настоящих методических указаниях приводятся основные технические требования к продольной дифференциальной защите генераторов и двигателей, необходимые для реализации соответствующих проектных решений.

Методические указания разработаны в соответствии с действующими (на момент написания, 2011 год) нормативными и методическими материалами по проектированию и развитию электроэнергетических систем.

Содержание

Стр.

ПРИНЯТЫЕ ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	4
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОЧНЫХ И ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НОРМАТИВНО – ТЕХНИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ.....	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЕ ГЕНЕРАТОРОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ.....	7
1.1. Схема подключения дифференциальной защиты блоков микропроцессорных защит SEPAM 1000+ серии 80.....	7
1.2. Функциональный алгоритм дифференциальной защиты блоков микропроцессорных защит SEPAM 1000+ серии 80.....	9
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ.....	11
2.1. Основные технические требования к трансформаторам тока, используемым для подключения блоков МП РЗА SEPAM 1000+ G87 (M87)	11
2.1.1. Методика проверки трансформатора тока с использованием паспортных характеристик предельной кратности	13
2.1.2. Методика определения расчетной предельной кратности трансформатора тока с использованием вольтамперной и основной характеристики намагничивания.....	14
2.2. Методические указания по расчету параметров срабатывания продольной дифференциальной токовой защиты генераторов и двигателей.....	17
2.2.1. Методика расчета тока трехфазного короткого замыкания на выводах генератора или двигателя	20
2.2.2. Методика расчета уравнительного тока в двухчастотном асинхронном режиме синхронной машины	21
3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ.....	23
3.1. Пример расчета параметров срабатывания продольной дифференциальной защиты синхронного генератора (SEPAM 1000+ G87)	23
3.1.1. Расчет уравнительного тока двухчастотного асинхронного режима и тока трехфазного короткого замыкания на выводах синхронного генератора.....	23
3.1.2. Проверка нагрузочной способности измерительных трансформаторов тока по паспортным характеристикам допустимой кратности тока	24
3.1.3. Расчет параметров срабатывания и проверка чувствительности продольной дифференциальной защиты ANSI 87M синхронного генератора	25
3.2. Пример расчета параметров срабатывания продольной дифференциальной защиты асинхронного двигателя (SEPAM 1000+ M87)	26
3.2.1. Расчет пускового тока и тока трехфазного короткого замыкания на выводах асинхронного двигателя.....	27
3.2.2. Проверка нагрузочной способности измерительных трансформаторов тока по паспортным характеристикам допустимой кратности тока и вольтамперной характеристике.....	27
3.2.3. Расчет параметров срабатывания и проверка чувствительности продольной дифференциальной защиты ANSI 87M асинхронного двигателя	28

Условные обозначения параметров и переменных:

ВАХ – вольтамперная характеристика;

КЗ – короткое замыкание;

МП (МПУ) – микропроцессорное (устройство);

МП РЗА – микропроцессорное устройство релейной защиты и автоматики;

МЭК – Международная электротехническая комиссия (англ. International Electrotechnical Commission, IEC)

ПУЭ – Правила устройства электроустановок;

РЗ – релейная защита;

РЗА – релейная защита и автоматика;

ТТ – трансформатор тока;

УРОВ – устройство резервирования отказа выключателя;

ЭДС – электродвижущая сила;

ANSI – американский национальный институт стандартов (англ. American National Standards Institute, ANSI);

ANSI 87M – идентификатор токовой продольной дифференциальной защиты электрической машины;

SEPRAM 1000+ – микропроцессорный блок релейной защиты и автоматики производства Schneider Electric;

$I_{ном.}, I_n$ – действующее значение номинального тока статора электрической машины;

x – обозначение, идентификатор электрической цепи фазы равный a, b, c или $1, 2, 3$;

$I_{diff.x}, I_{diff.x}$ – действующие значения токов фазных дифференциальных сигналов;

$I_{торм.x}, I_{т.x}$ – действующие значения токов фазных тормозных сигналов дифференциальной защиты.

Перечень ссылочных и используемых нормативно-технических документов

№	Название нормативно – технической документации
1	Общие требования к системам противоаварийной и режимной автоматики, релейной защиты и автоматики, телеметрической информации, технологической связи в ЕЭС России», утвержденные Приказом ОАО РАО «ЕЭС России» от 11.02.2008 № 57.
2	Письмо ОАО «СО - ЦДУ ЕЭС» № 212-1-17-3/1-4937 от 09.08.2007г. «О подготовке заданий настройки микропроцессорных устройств РЗА» в ОАО «ФСК ЕЭС» (п.п.1, 2, 3).
3	Правила устройства электроустановок (все действующие разделы шестого и седьмого издания с изменениями и дополнениями). Сибирское университетское издательство, 2008 г.
4	РД 34.35.310-97 Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем (с изм. № 1 1998 г.).
5	Sepram серии 80. Руководство по эксплуатации. Schneider Electric. 07/2006.
6	Булычев А. В., Ванин В. К., Наволочный А. А., Попов М.Г. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 211 с.
7	Федосеев А. М., Федосеев М. А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учебное пособие для вузов. – 2-е издание, переработанное и дополненное – М., Энергоатомиздат, 1992. - 528 с.: ил.
8	Ванин В. К., Попов М.Г. Системный анализ асинхронных режимов работы электросети. Асинхронные режимы электроэнергетических систем: Учеб. Пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 171 с.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие энергетических систем характеризуется включением на параллельную работу как новых, более совершенных и мощных блоков, так и электрических станций и отдельных энергосистем, т. е. созданием крупных энергообъединений. Надежность работы электроснабжения современных электроэнергетических систем определяется применением нормативных технических решений при их проектировании, а также быстродействием систем релейной защиты и автоматики электрооборудования, которые ликвидируют (локализуют) аварийные режимы их работы.

Повышение надежности функционирования системы релейной защиты и автоматики (РЗА) электрических генераторов и двигателей обеспечивается следующими мероприятиями организации функций ближнего и дальнего резервирования [1..4]:

- установкой на присоединениях основных и резервных защит;
- использованием устройства резервирования отказа выключателя (УРОВ);
- разделением комплектов защит по цепям переменного тока, а также по цепям оперативного постоянного тока и цепям отключения;
- размещением (по возможности) устройств, резервирующих друг друга, в разных шкафах;
- выполнением основных и резервных защит на разных принципах действия.

Основные средства релейной защиты (РЗ) генераторов, блоков генератор-трансформатор предназначены для работы при возникновении междуфазных коротких замыканий в цепях статора генераторов, витковых (однофазных) коротких замыканий, замыканий на землю в цепях статора, замыканий на землю в цепях ротора и других случаях, приводящих к потере возбуждения генератора. Резервные средства защиты работают при внешних коротких замыканиях, не попавших в зону действия основных, а также при отказах основных средств и возникновении симметричных и несимметричных перегрузок. Этим самым осуществляется ближнее резервирование. Кроме того, резервные средства защиты генератора предназначены работать при отказе основных и резервных средств защиты и автоматики смежных по отношению к генераторам элементов (трансформаторов, шин, линий электропередачи), осуществляя дальнейшее резервирование. Организация мероприятий по обеспечению ближнего и дальнего резервирования системы РЗА электрических двигателей аналогична описанному для генераторов подходу с некоторым упрощением подсистемы защиты цепей ротора.

Разделение по цепям переменного тока предполагает питание комплектов РЗА, резервирующих друг друга, от разных сердечников трансформатора тока. Цепи переменного тока должны быть выполнены отдельными экранированными кабелями, проложенными в разных кабельных каналах.

Разделение по цепям оперативного постоянного тока достигается подключением комплектов основных и резервных защит защищаемого присоединения к системам шин (секциям), питаемым от разных аккумуляторных батарей (при наличии двух батарей), через соответствующие автоматические выключатели. При этом схема оперативного постоянного тока должна удовлетворять требованиям гибкости (отыскание замыкания на землю без потери питания микропроцессорных средств РЗА) и надежности электроснабжения (повреждение любого элемента не должно приводить к одновременной потере питания основных и резервных защит, а также питания первого и второго электромагнита отключения любого присоединения). В этом случае каждое устройство микропроцессорной РЗА (МП РЗА) должно подключаться к системе оперативного постоянного тока через отдельные автоматические выключатели. При этом резервирование источников системы оперативного тока должно обеспечиваться соответствующей организацией схемы электрических соединений щита постоянного тока.

Обеспечение питания комплектов защит от разных аккумуляторных батарей позволяет ограничить объем отключений при КЗ с одновременным повреждением аккумуляторной батареи.

Разделение цепей отключения (при наличии у выключателя двух электромагнитов отключения) достигается воздействием каждого комплекта РЗА защищаемого присоединения на разные электромагниты отключения выключателя, а по возможности, каждого комплекта – на оба электромагнита отключения, что снижает вероятность отказов выключателей.

Питание схем управления электромагнитами по цепям постоянного тока следует осуществлять от разных аккумуляторных батарей (при наличии двух батарей). Цепи отключения от каждого комплекта должны прокладываться отдельными кабелями и, по возможности, разными трассами.

В настоящих методических указаниях приводятся основные технические требования к дифференциальной защите генераторов и двигателей, необходимые для реализации соответствующих проектных решений. Методические указания разработаны в соответствии с действующими (на момент написания, 2011 год) нормативными и методическими материалами по проектированию развития электроэнергетических систем.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТОКОВОЙ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЕ ГЕНЕРАТОРОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ

Продольная дифференциальная токовая защита электрических машин (генераторов, двигателей) предназначена для ликвидации аварийных повреждений (междуфазных коротких замыканий) в электрических цепях статора. В последующих разделах рассмотрены вопросы подключения блоков микропроцессорной релейной защиты и автоматики (МП РЗА) SEPAM 1000 + G87 (M87), в составе которых реализован функциональный алгоритм токовой продольной дифференциальной защиты электрической машины ANSI 87M. Здесь также изложены основные требования к подсистеме измерений данной защиты.

1.1. Схема подключения дифференциальной защиты блоков микропроцессорных защит SEPAM 1000+ серии 80

Классическая схема подключения токовой продольной дифференциальной защиты электрического генератора (двигателя) показана на рис. 1.1.

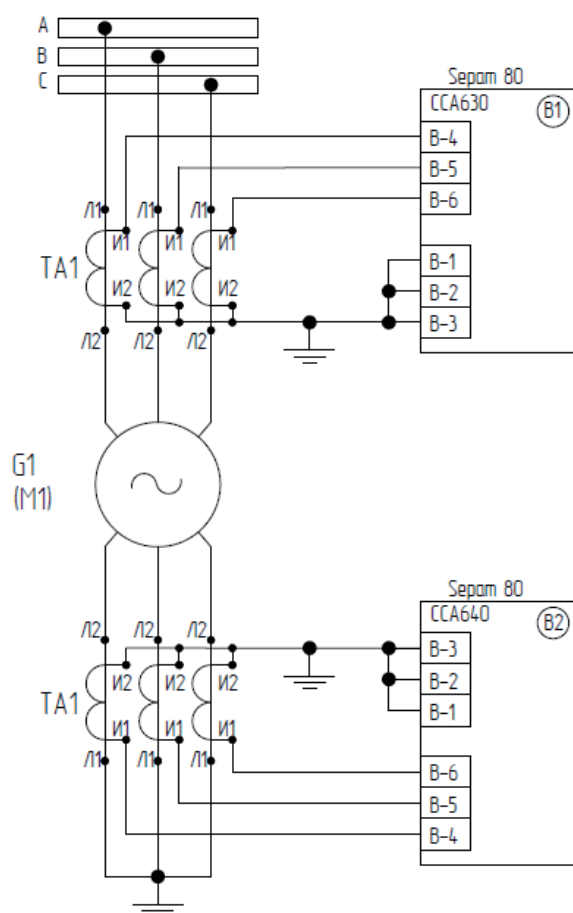


Рис. 1.1. Схема подключения Sepam 1000+ G87 (M87) к трансформаторам тока

В настоящих методических указаниях описание принципа действия продольной дифференциальной защиты ANSI 87M выполняется в символической, комплексной форме записи при допущениях линейности характеристик электрической машины и трансформаторов тока.

Для удовлетворения требований линейности электрических параметров (индуктивностей) трансформаторов тока должна быть выполнена их проверка по условиям внешней вторичной допустимой нагрузки (определение расчетной 10 % предельной кратности). Данная методика проверки измерительных трансформаторов тока достаточно подробно изложена в разделе 2.1 настоящих методических указаний.

Согласно указанной на схеме подключения SEPAM 1000+ полярности трансформаторов тока (см. зажимы Л1, И1, рис. 1.1) дифференциальный сигнал $\dot{I}_{дифф.х}$ в нормальном режиме работы или при внешних коротких замыканиях (на выводах) описывается векторной разностью токов плеч защиты:

$$\dot{I}_{дифф.х} = \dot{I}_{1.х} - \dot{I}_{2.х} \quad (1.1)$$

где

x – идентификатор фазы электрической цепи, обозначаемый a, b, c или $1, 2, 3$;

$\dot{I}_{дифф.х}$ – комплексное значение дифференциального сигнала соответствующей фазы защиты, А;

$\dot{I}_{1.х}, \dot{I}_{2.х}$ – комплексные значения фазных токов плеч дифференциальной защиты, А.

Следует отметить, что согласно международному стандарту ANSI может быть принято как буквенное (символьное) так и номерное (числовое) обозначение фазных электрических цепей в виде: фаза a (фаза 1), фаза b (фаза 2) и фаза c (фаза 3). Естественно, что при коротких замыканиях обмотки статора в зоне действия защиты дифференциальный сигнал представляет собой результат векторной суммы:

$$\dot{I}_{дифф.х} = \dot{I}_{1.х} + \dot{I}_{2.х} \quad (1.2)$$

Для исключения ложного срабатывания продольной дифференциальной защиты генераторов (двигателей) при обрывах соединительных кабелей трансформаторов тока должна осуществляться ее блокировка. Подсистема контроля целостности токовых измерительных цепей защиты ANSI 87M реализована в функциональном алгоритме, который рассмотрен в разделе 1.2. Кроме этого, в некоторых характерных режимах работы электрических генераторов и двигателей, сопровождающихся увеличенными (по отношению к номинальному току) значениями фазных токов, вводится торможение дифференциальной защиты согласно следующему функциональному алгоритму [5]:

$$I_{торм.х} = \frac{|\dot{I}_{1.х} - \dot{I}_{2.х}|}{2} \quad (1.3)$$

где:

$I_{торм.х}$ – действующие значения фазных токов тормозного сигнала защиты, А.

При этом дифференциальный сигнал защиты ANSI 87M формируется согласно выражению:

$$I_{дифф.х} = |\dot{I}_{1.х} + \dot{I}_{2.х}| \quad (1.4)$$

где:

$I_{дифф.х}$ – действующие значения фазных токов дифференциального сигнала защиты, А.

Рабочая характеристика срабатывания чувствительной ступени токовой продольной дифференциальной защиты с торможением ANSI 87M изображена на рис. 1.2. Функциональный алгоритм рассмотрен в нижеследующем разделе.

1.2. Функциональный алгоритм дифференциальной защиты блоков микропроцессорных защит SEPAM 1000+ серии 80

Токовая продольная дифференциальная защита электрических генераторов, двигателей ANSI 87M выполнена пофазной и имеет две ступени – грубую, дифференциальную отсечку, и чувствительную с торможением.

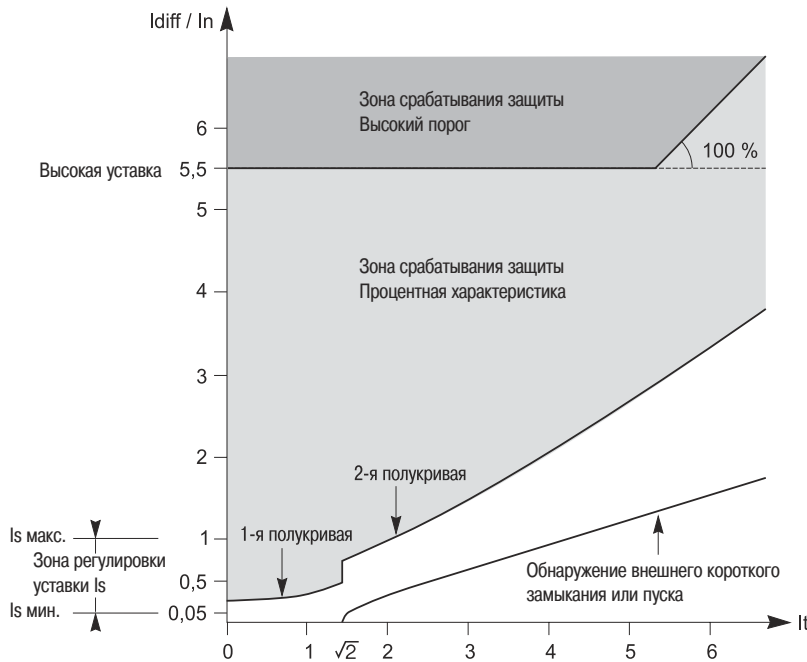


Рис. 1.2. Характеристика срабатывания продольной дифференциальной защиты ANSI 87M

Дифференциальная отсечка (см. рис. 1.2, 1.3) имеет высокий порог срабатывания ($5.5 I_{ном.}$) и является эффективной при повреждениях обмотки статора с большим уровнем токов короткого замыкания (например, при включении на «внезапное» короткое замыкание). Особенностью этой грубой ступени токовой продольной дифференциальной защиты производства Schneider Electric является ее линейная характеристика срабатывания при тормозном сигнале кратностью более $5.5 I_{ном.}$ (см. рис. 1.2).

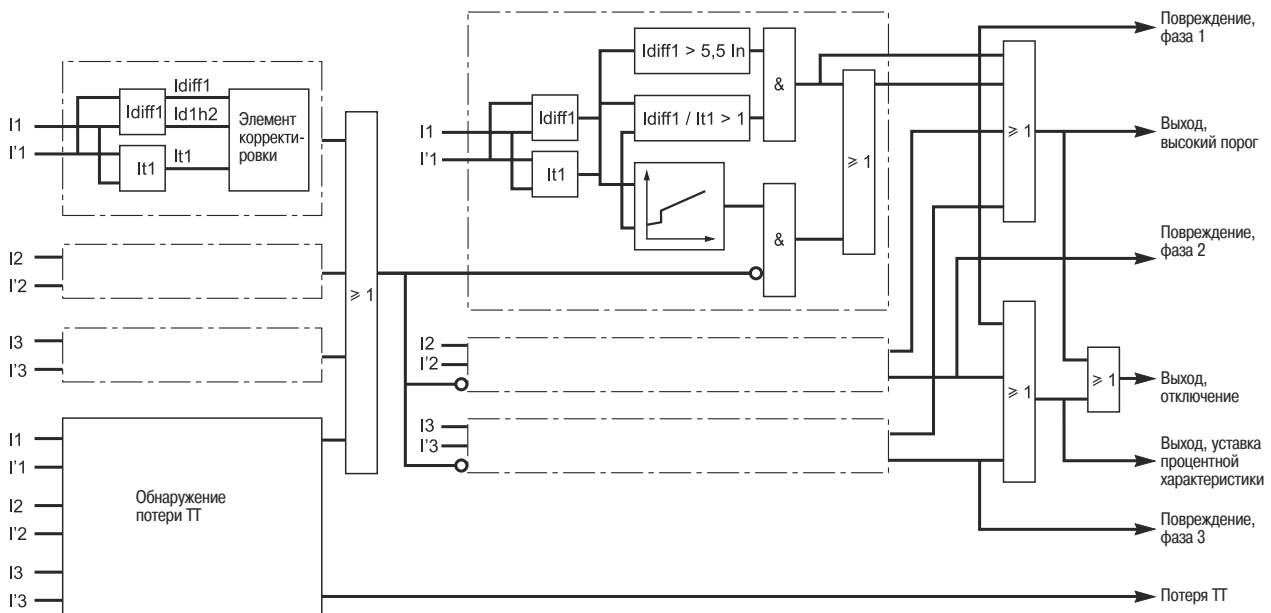


Рис. 1.3. Блок-схема функционального алгоритма защиты ANSI 87M

Чувствительная ступень продольной дифференциальной защиты с торможением ANSI 87M имеет нелинейную, параболическую характеристику срабатывания [5], состоящую из двух участков (см. рис. 1.2 и 1.3):

$$I_{\text{дифф.х}}^2 > I_{\text{СЗ.мин}}^2 + \frac{I_{\text{торм.х}}^2}{32} \text{ при } I_{\text{торм.х}} \in [0, \sqrt{2} \times I_{\text{ном.}}] \quad (1.5)$$

$$\frac{I_{\text{дифф.х}}^2}{8} > (0,005 \times I_{\text{ном.}})^2 + \frac{I_{\text{торм.х}}^2}{32} \text{ при } I_{\text{торм.х}} \in (\sqrt{2} \times I_{\text{ном.}}, +\infty] \quad (1.6)$$

где:

$I_{\text{СЗ.мин}}$ – минимальный ток срабатывания защиты, равный (0.05..0.5) $I_{\text{ном.}}$, А;

$I_{\text{ном.}}$ – номинальное значение тока статора генератора (двигателя), А.

Для исключения ложного срабатывания защиты при обрывах токовых цепей процедура «обнаружения потери измерительного трансформатора тока» (см. рис. 1.3) блокирует функциональный алгоритм защиты ANSI 87M.

Контроль целостности вторичных токовых цепей основан на принципе «постоянства измерений». Кроме этого, функциональный алгоритм содержит процедуру выявления насыщенного состояния измерительных трансформаторов тока с использованием следующего критерия:

$$\frac{I_{\text{дифф.х}}^2}{2} > - (0,25 \times I_{\text{ном.}})^2 + \frac{I_{\text{торм.х}}^2}{32} \quad (1.7)$$

По факту выявления насыщенного состояния (при соблюдении неравенства 1.7) трансформаторов тока, к которым подключается продольная дифференциальная защита, также вводится ее блокировка.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ

Методика расчета параметров срабатывания продольной дифференциальной защиты генераторов (двигателей) основана на отстройке от тока небаланса, обусловленного токами намагничивания трансформаторов тока, к которым подключается защита. В связи с этим в настоящем разделе рассматриваются основные технические требования, которым должны отвечать трансформаторы тока, используемые для подключения токовой продольной дифференциальной защиты, а также непосредственно сами методические указания по выбору параметров срабатывания защиты.

2.1. Основные технические требования к трансформаторам тока, используемым для подключения блоков МП РЗА SEPAM 1000+ G87 (M87)

Напомним, что выбор измерительных трансформаторов тока осуществляется по условиям соответствия паспортных данных значениям номинального напряжения ($U_{ном.ТТ} = U_{ном.}$) и максимального расчетного (номинального) тока ($I_{перв.ном.ТТ} \geq I_{раб.мах}$).

Проверка измерительных трансформаторов тока производится согласно следующим расчетным условиям:

- проверка на динамическую и термическую стойкость токам короткого замыкания;
- проверка по величине допустимой нагрузки (определение расчетной предельной кратности), отвечающей паспортному классу точности (погрешности) трансформатора тока.

Проверка измерительных трансформаторов тока по условиям их термической стойкости основана на расчете значения теплового импульса тока короткого замыкания за период времени, определяемый собственным временем выключателя, временем действия резервной защиты и выдержкой времени устройства резервирования отказов выключателя (УРОВ). При проверке на динамическую стойкость определяют максимальное допустимое значение полного (ударного) тока.

Определение расчетной предельной кратности трансформаторов тока, как правило, выполняется с помощью паспортных характеристик предельной кратности, предоставляемых производителем (см. рис. 2.1). В качестве примера на рис. 2.1, а показаны кривые предельных кратностей тока трансформаторов тока типа ТПЛ-10 при допустимой погрешности 10%: 1 – для ТТ с коэффициентами трансформации от 5/5 до 300/5 класса Р; 2 – для ТТ с коэффициентами трансформации от 5/5 до 300/5 класса 0,5; 3 – для ТТ с коэффициентом трансформации 400/5 класса Р; 4 – для ТТ с коэффициентом трансформации 400/5 класса 0,5. Аналогичные кривые для ТТ типа ТПЛ-10К приведены на рис. 2.1, б: 1 – для ТТ с коэффициентами трансформации от 5/5 до 60/5; 2 – для ТТ с коэффициентами трансформации от 100/5 до 400/5, 600/5; 3 – для ТТ с коэффициентом трансформации 800/5; 4 – для ТТ с коэффициентом трансформации 1000/5; 5 – для ТТ с коэффициентом трансформации 1500/5.

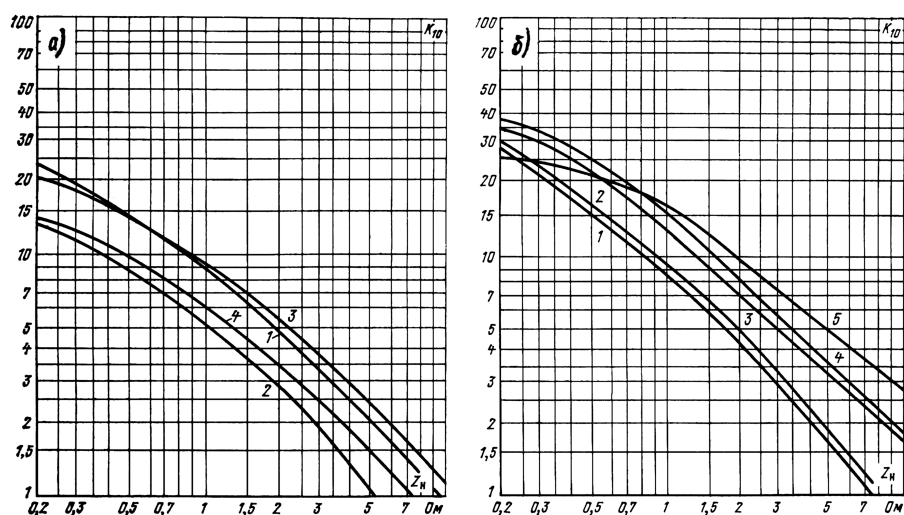


Рис. 2.1. Кривые предельных кратностей тока трансформаторов тока ТПЛ-10 (а) и ТПЛ-10К (б)

В случае отсутствия паспортных данных о зависимостях величины предельной кратности от сопротивления нагрузки допускается упрощенная оценка соответствия выбранных трансформаторов тока с использованием основной характеристики намагничивания или вольтамперной характеристики (ВАХ).

Проверка измерительных трансформаторов тока производится с учетом схемы их соединения согласно расчетным выражениям табл. 2.1 [6].

Табл. 2.1. Расчет сопротивления нагрузки трансформаторов тока

Схема соединения вторичных обмоток ТТ и устройств РЗА	Вид короткого замыкания	Сопротивление нагрузки относительно зажимов вторичной обмотки ТТ*
1. Звезда-звезда 	Трехфазное и двухфазное	$Z_H = R_K + Z_P + R_{ПЕР}$
	Однофазное	$Z_H = 2R_K + Z_P + Z_{P0} + R_{ПЕР}$

Примечание:* Z_H , R_K , Z_P , $R_{ПЕР}$ – сопротивление нагрузки ТТ, активное сопротивление жил соединительных (контрольных) кабелей, сопротивление устройств РЗА и переходное сопротивление в местах соединений проводников, соответственно; Z_{P0} – сопротивление устройств РЗА, подключаемых в обратный (нулевой) провод.

В виду малости реактивной составляющей сопротивления для упрощения расчетных выражений табл. 2.1 допускается арифметическое сложение значений полных и активных сопротивлений. При этом в расчетных формулах должны использоваться наибольшие значения сопротивлений (для наиболее загруженных фаз). Сопротивление жил кабелей определяется по их длине и удельному сопротивлению, а сопротивления подключаемых устройств РЗА – по потребляемой ими мощности.

2.1.1. Методика проверки трансформатора тока с использованием паспортных характеристик предельной кратности

Оценка соответствия измерительных трансформаторов тока осуществляется согласно условиям проверки на предельно допустимые значения сопротивления и кратности тока нагрузки:

$$Z_{н.расч.ТТ} \leq Z_{н.пред.пасп.ТТ} \quad (2.1)$$

$$K_{расч.ТТ} \leq K_{пред.пасп.ТТ} \quad (2.2)$$

где:

$Z_{н.расч.ТТ}$, $Z_{н.пред.пасп.ТТ}$ – расчетное и предельно допустимое значения сопротивления нагрузки трансформатора тока, Ом;

$K_{расч.ТТ}$, $K_{пред.пасп.ТТ}$ – расчетный и паспортный коэффициенты кратности тока нагрузки, о. е.

Проверка трансформатора тока по условиям (2.1), (2.2) производится в результате определения коэффициента допустимой предельной кратности тока $K_{пред.пасп.ТТ}$ по паспортным характеристикам трансформатора тока в расчетных режимах однофазного и трехфазного короткого замыкания при значениях сопротивления нагрузки $Z_{н.расч.ТТ}^{(1)}$ и $Z_{н.расч.ТТ}^{(3)}$, соответственно:

$$K_{расч.ТТ}^{(1)} = \frac{I_{КЗ}^{(1)}}{I_{перв.ном.ТТ}} \leq K_{пред.пасп.ТТ} (Z_{расч.ТТ}^{(1)}) \quad (2.3)$$

$$K_{расч.ТТ}^{(3)} = \frac{I_{КЗ}^{(3)}}{I_{перв.ном.ТТ}} \leq K_{пред.пасп.ТТ} (Z_{расч.ТТ}^{(3)}) \quad (2.4)$$

где:

$I_{КЗ}^{(1)}$, $I_{КЗ}^{(3)}$ – соответственно, действующие значения токов однофазного и трехфазного короткого замыкания, А;

$I_{перв.ном.ТТ}$ – номинальное значение первичного тока трансформатора тока, А.

Расчетные значения сопротивления нагрузки трансформаторов тока в режимах однофазного ($Z_{н.расч.ТТ}^{(1)}$) и трехфазного ($Z_{н.расч.ТТ}^{(3)}$) короткого замыкания при пренебрежении реактивной составляющей сопротивления соединительных кабелей вычисляются по уравнениям (см. табл. 2.1), Ом:

$$Z_{н.расч.ТТ}^{(1)} = \sqrt{(2 \times R_{каб.} + R_{РЗА} + R_{конт.соед.})^2 + (X_{РЗА})^2} \quad (2.5)$$

$$Z_{н.расч.ТТ}^{(3)} = \sqrt{(R_{каб.} + R_{РЗА} + R_{конт.соед.})^2 + (X_{РЗА})^2} \quad (2.6)$$

где:

$R_{каб.}$ – активная составляющая сопротивления контрольного кабеля, Ом;

$R_{РЗА}$, $X_{РЗА}$ – активная и реактивная составляющая входного сопротивления устройства РЗА, подключаемого к измерительному трансформатору тока, Ом;

$R_{конт.соед.}$ – переходное сопротивление контактных соединений, принимаемое равным 0.1 Ом

При отсутствии кривых предельной кратности (например, см. рис. 2.1), расчет допустимой предельной кратности тока, отвечающей фактическому (расчетному) сопротивлению нагрузки $Z_{н.расч.ТТ} = R_{н.расч.ТТ} + jX_{н.расч.ТТ}$, может быть выполнен по выражению:

$$K_{пред.насп.ТТ} = K_{ном.насп.ТТ} \cdot \frac{\sqrt{(R_{втор.ТТ} + R_{н.ном.ТТ})^2 + (X_{s.втор.ТТ} + X_{н.ном.ТТ})^2}}{\sqrt{(R_{втор.ТТ} + R_{н.расч.ТТ})^2 + (X_{s.втор.ТТ} + X_{н.расч.ТТ})^2}} \quad (2.7)$$

где:

$K_{ном.насп.ТТ}$ – коэффициент предельно допустимой кратности тока при номинальной нагрузке, о. е.;

$R_{втор.ТТ}$, $X_{s.втор.ТТ}$ – активное сопротивление и сопротивление рассеяния вторичной обмотки трансформатора тока, Ом;

$R_{н.ном.ТТ}$, $X_{н.ном.ТТ}$ – активная и реактивная составляющая номинального сопротивления нагрузки, Ом;

$R_{н.расч.ТТ}$, $X_{н.расч.ТТ}$ – действительная и мнимая составляющая расчетного (фактического) сопротивления нагрузки трансформатора тока, Ом.

Пренебрежение (в виду его малости по отношению к $R_{втор.ТТ}$) сопротивлением рассеяния вторичной обмотки трансформатора тока $X_{s.втор.ТТ}$ преобразует выражение (2.7) к виду:

$$K_{пред.насп.ТТ} = K_{ном.насп.ТТ} \cdot \frac{\sqrt{(R_{втор.ТТ} + R_{н.ном.ТТ})^2 + (X_{н.ном.ТТ})^2}}{\sqrt{(R_{втор.ТТ} + R_{н.расч.ТТ})^2 + (X_{н.расч.ТТ})^2}} \quad (2.8)$$

Активная и реактивная составляющие номинального сопротивления нагрузки трансформатора тока рассчитываются по его паспортным данным:

$$R_{н.ном.ТТ} = \frac{S_{н.ном.ТТ}}{I_{втор.ном.ТТ}^2} \cdot \cos \varphi_{н.ном.ТТ} \quad (2.9)$$

$$X_{н.ном.ТТ} = \frac{S_{н.ном.ТТ}}{I_{втор.ном.ТТ}^2} \cdot \sin \varphi_{н.ном.ТТ} \quad (2.10)$$

где:

$S_{н.ном.ТТ}$, $I_{втор.ном.ТТ}^2$ – номинальное значение мощности [ВА] нагрузки и вторичного тока [А] трансформатора тока;

$\cos \varphi_{н.ном.ТТ}$, $\sin \varphi_{н.ном.ТТ}$ – номинальные коэффициенты активной и реактивной мощности внешней нагрузки трансформатора тока, о. е.

2.1.2. Методика определения расчетной предельной кратности трансформатора тока с использованием вольтамперной и основной характеристики намагничивания

В ряде случаев паспортные данные измерительных трансформаторов тока не содержат информацию о характеристиках допустимой предельной кратности тока. Тем не менее, соответствие трансформаторов тока ранее описанным требованиям (2.1) и (2.2) может быть

выполнена с использованием вольтамперной характеристики (см. рис. 2.2, а) или основной характеристики намагничивания (см. рис. 2.2, б).

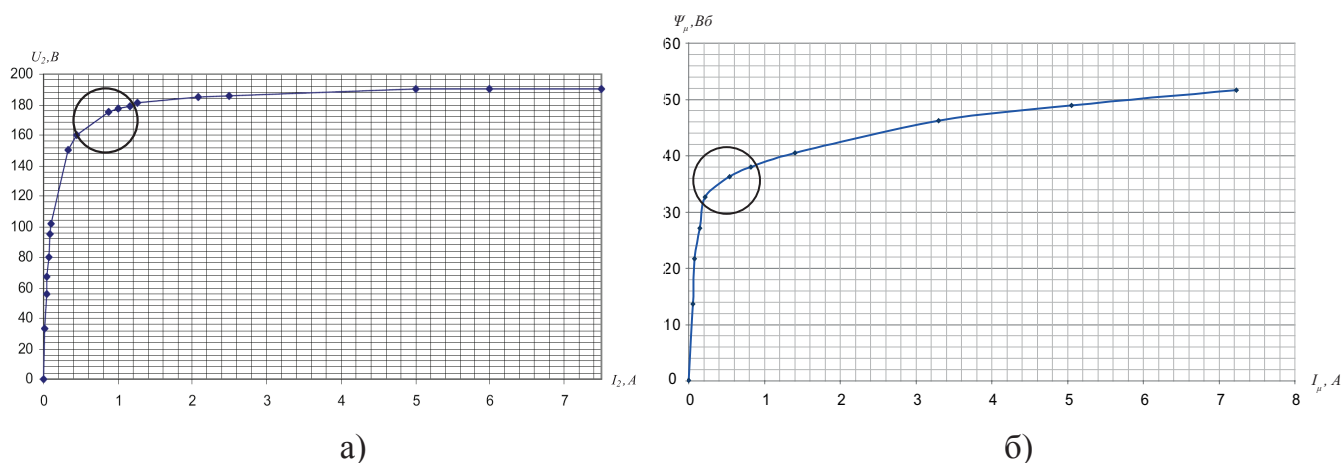


Рис. 2.2. Вольтамперная характеристика (а) и основная характеристика намагничивания (б) трансформатора тока

Расчет допустимой предельной кратности тока с использованием ВАХ или основной характеристики намагничивания трансформатора тока выполняется при введении понятия его ЭДС взаимоиндукции E_μ (см. рис. 2.3):

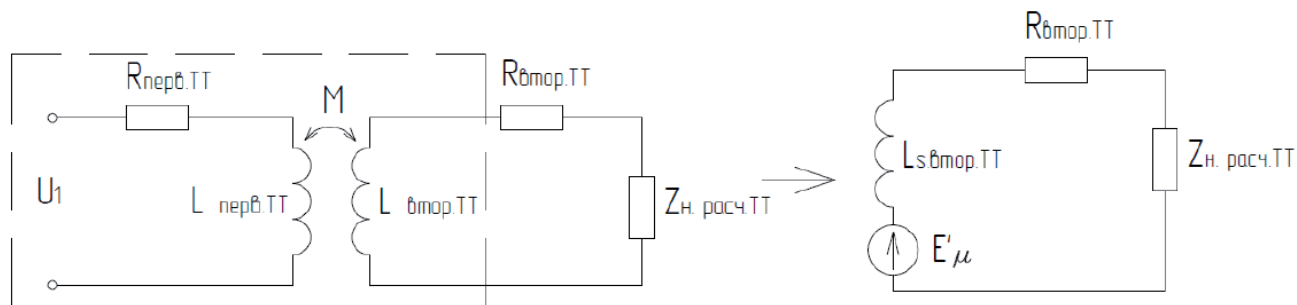


Рис. 2.3. Расчетная схема замещения трансформатора тока

$$K_{пред.насп.ТТ} = \frac{1}{I_{втор.ном.ТТ}} \cdot \frac{|\dot{E}_\mu|}{\sqrt{(R_{втор.ТТ} + R_{н.расч.ТТ})^2 + (X_{с.втор.ТТ} + X_{н.расч.ТТ})^2}} \quad (2.11)$$

где $|\dot{E}_\mu|$ – модуль комплексного значения внутренней ЭДС взаимоиндукции трансформатора тока, В.

Опуская промежуточные преобразования, выражения для определения модуля внутренней ЭДС взаимоиндукции E_μ трансформатора тока согласно опыта холостого хода (снятия вольтамперной характеристики, см. рис. 2.2, а) записывается в следующем виде:

$$|\dot{E}_\mu| = \sqrt{(E_\mu^{Re})^2 + (E_\mu^{Im})^2} \quad (2.12)$$

где:

E_μ^{Re} , E_μ^{Im} – вещественная и мнимая составляющие комплексного значения ЭДС взаимоиндукции трансформатора тока, В.

Проекции вектора ЭДС взаимной индукции \dot{E}_μ вычисляются для «полунасыщенного» состояния (см. выделенный фрагмент в точке перегиба вольтамперной характеристики рис. 2.2, а) трансформатора тока по уравнениям:

$$E_\mu^{\text{Re}} = U_{\text{нн.втор.ТТ}} - I_{\text{нн.втор.ТТ}} \cdot Z_{\text{s.втор.ТТ}} \cdot \cos(\gamma_I + \gamma_{Z_{\text{s.втор.ТТ}}}) \quad (2.13)$$

$$E_\mu^{\text{Im}} = I_{\text{нн.втор.ТТ}} \cdot Z_{\text{s.втор.ТТ}} \cdot \sin(\gamma_I + \gamma_{Z_{\text{s.втор.ТТ}}}) \quad (2.14)$$

где:

$U_{\text{нн.втор.ТТ}}$, $I_{\text{нн.втор.ТТ}}$ – модули векторов вторичного напряжения и тока, отвечающие «полунасыщенному» состоянию трансформатора тока;

$Z_{\text{s.втор.ТТ}} = \sqrt{(R_{\text{втор.ТТ}})^2 + (X_{\text{s.втор.ТТ}})^2}$ – модуль полного сопротивления вторичной обмотки трансформатора тока, Ом;

γ_I – угол между напряжением и током в точке перегиба вольтамперной характеристики трансформатора тока, градус;

$\gamma_{Z_{\text{s.втор.ТТ}}} = \arctg \frac{X_{\text{s.втор.ТТ}}}{R_{\text{втор.ТТ}}}$ – собственный угол комплексного сопротивления вторичной обмотки трансформатора тока, градус.

Выражения (2.13) и (2.14) могут быть получены в упрощенной форме при отстающем (угол нагрузки $\varphi @ -90^\circ$) токе в режиме холостого хода и неучете сопротивления рассеяния ($X_{\text{s.втор.ТТ}} = 0$) вторичной обмотки трансформатора тока:

$$E_\mu^{\text{Re}} = U_{\text{нн.втор.ТТ}} \quad (2.15)$$

$$E_\mu^{\text{Im}} = -I_{\text{нн.втор.ТТ}} \cdot R_{\text{втор.ТТ}} \quad (2.16)$$

Также следует отметить возможность расчета модуля внутренней ЭДС взаимной индукции \dot{E}_μ трансформатора тока при наличии информации о конструкции магнитопровода (s_m), числе витков вторичной обмотки $w_{\text{втор.}}$ и его основной характеристике намагничивания (см. рис. 2.2, б):

$$|\dot{E}_\mu| = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_{\text{синх}} \cdot w_{\text{втор.}} \cdot B_{\text{т.нн}} \cdot s_\mu \quad (2.17)$$

где:

$f_{\text{синх.}}$ – синхронная частота электрической сети, Гц;

$w_{\text{втор.}}$ – количество витков вторичной обмотки;

$B_{\text{т.нн.}}$ – амплитудное значение магнитной индукции в точке перегиба характеристики намагничивания трансформатора тока, Тл;

s_m – площадь поперечного сечения магнитопровода трансформатора тока, м².

При удовлетворении требований (2.1) и (2.2) по условиям допустимой нагрузки трансформаторов тока необходимо выполнить расчет параметров срабатывания токовой продольной дифференциальной защиты ANSI 87M согласно нижеизложенным методическим указаниям.

2.2. Методические указания по расчету параметров срабатывания токовой продольной дифференциальной защиты генераторов и двигателей

Расчет токовой продольной дифференциальной защиты генераторов (двигателей) микропроцессорных блоков SEPAM 1000+ G87 (M87) заключается в выборе параметров срабатывания дифференциальной отсечки и чувствительной ступени с торможением (см. рис. 1.2, разд. 1.2). Чувствительность дифференциальной защиты с торможением оценивается применительно к режиму двухфазного короткого замыкания обмотки статора машины.

Дифференциальная отсечка («грубая» ступень) защиты ANSI 87M имеет нерегулируемую (заданную аппаратно) характеристику срабатывания, описываемую неравенствами (см. рис. 1.2, разд. 1.2):

$$\begin{cases} \frac{I_{дифф.}}{I_{ном.}} > 5.5 \\ \frac{I_{дифф.}}{I_{торм.}} > 1.0 \end{cases} \quad (2.18)$$

где:

$I_{дифф.}$, $I_{торм.}$ – дифференциальный и тормозной ток, А;

$I_{ном.}$ – номинальное значение тока статора генератора (двигателя), А.

Минимальный ток срабатывания $I_{C3.min}$ чувствительной ступени продольной токовой дифференциальной защиты генератора (двигателя) рассчитывается исходя из условия отстройки от тока небаланса, обусловленного токами намагничивания трансформаторов тока, в режиме максимальной рабочей нагрузки:

$$I_{C3.min} = k_{от.} \cdot k_{одн.} \cdot \varepsilon \cdot I_{раб.маx} \quad (2.19)$$

$$I_{C3.min*} = \frac{I_{C3.min}}{I_{ном.}} \quad (2.20)$$

где:

$k_{от.}$ – коэффициент отстройки, принимаемый равным 1.2..1.5 о. е.;

$k_{одн.}$ – коэффициент, учитывающий однотипность характеристик и равномерность распределения нагрузки трансформаторов тока плеч дифференциальной защиты, о. е.;

ε – приведенная погрешность трансформаторов тока, определяемая его классом точности, о. е.;

$I_{раб.маx}$ – действующее значение максимального рабочего тока статора, А;

$I_{C3.min*}$ – относительное значение минимального тока срабатывания защиты, о. е.

Коэффициент однотипности $k_{одн.}$ в выражении (2.19) принимается равным $k_{одн.} = 0.5$ при условии равномерного распределения вторичной нагрузки (с учетом контрольных кабелей) и однотипности технических характеристик трансформаторов тока плеч дифференциальной защиты, в противном случае данный коэффициент выбирается равным $k_{одн.} = 1.0$.

Как правило, выбор параметров срабатывания современных микропроцессорных дифференциальных защит с торможением заключается в расчете минимального тока срабатывания и коэффициентов торможения участков рабочей характеристики. Поскольку функциональный алгоритм (см. разд. 1.2) токовой продольной дифференциальной защиты ANSI 87M имеет нерегулируемую нелинейную, квадратичную характеристику срабатывания, описываемую выражениями (1.5) и (1.6), имеет место обратная постановка задачи – проверка селективности защиты при аппаратно заданных коэффициентах торможения в характерных режимах работы генератора или двигателя. Проверка условий срабатывания или торможения чувствительной ступени дифференциальной защиты с торможением выполняется для наиболее тяжелых, характерных расчетных условий: в асинхронном режиме (только для синхронных машин), в режимах внутренних и внешних коротких замыканий на выводах генератора (двигателя), а также в пусковых режимах двигателя. В результате проверки определяется положение расчетной точки в координатной плоскости рабочей характеристики срабатывания. Координаты искомой расчетной точки ($I_{\text{торм.}*} = I_{\text{торм.}} / I_{\text{ном.}}$, $I_{\text{дифф.}*} = I_{\text{дифф.}} / I_{\text{ном.}}$) соответствуют дифференциальному и тормозному сигналам, которые рассчитываются по выражениям (1.4) и (1.3) с учетом погрешности трансформаторов тока плеч защиты. В случае попадания расчетной точки в зону неправильной, ложной работы (см. характеристику срабатывания, рис. 1.2) необходимо скорректировать (увеличить) относительное значение минимального тока срабатывания защиты $I_{\text{сз.мин}*}$, что приведет к соответствующему смещению по вертикали рабочей характеристики чувствительной ступени с торможением. Следует напомнить, что регулирование минимального тока срабатывания защиты $I_{\text{сз.мин}*}$ допускается в диапазоне 0.05...0.50 о. е. [5].

Расчетные условия (1.3) и (1.4) срабатывания дифференциальной защиты с торможением отвечают режиму внутреннего короткого замыкания вблизи выводов генератора (двигателя)

$$I_{\text{дифф.}}, I_{\text{торм.}} = f \left(I_{\text{м.КЗ.мах}}^{(3)}, I_{\text{экв.с.КЗ.мах}}^{(3)} \right);$$

$$I_{\text{дифф.}} = k_{\text{одн.}} \cdot k_{\text{ан.}} \cdot \left(I_{\text{м.КЗ.мах}}^{(3)} + I_{\text{экв.с.КЗ.мах}}^{(3)} \right) \quad (2.21)$$

$$I_{\text{торм.}} = k_{\text{одн.}} \cdot k_{\text{ан.}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\left| I_{\text{м.КЗ.мах}}^{(3)} - I_{\text{экв.с.КЗ.мах}}^{(3)} \right|}{2} \quad (2.22)$$

где:

$k_{\text{ан.}}$ – коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую тока короткого замыкания, равный 1.5..2.0 о. е.;

$I_{\text{м.КЗ.мах}}^{(3)}$, $I_{\text{экв.с.КЗ.мах}}^{(3)}$ – действующие значения периодической составляющей максимального тока трехфазного короткого замыкания в зоне действия защиты от генератора (двигателя) и эквивалента энергосистемы, А.

Относительные значения дифференциального и тормозного токов защиты определяются выражениями:

$$I_{\text{дифф.}*} = \frac{I_{\text{дифф.}}}{I_{\text{ном.}}} \quad (2.23)$$

$$I_{\text{торм.}*} = \frac{I_{\text{торм.}}}{I_{\text{ном.}}} \quad (2.24)$$

Оценка чувствительности дифференциальной защиты с торможением осуществляется с использованием следующего соотношения:

$$k_{\text{чувств.}} = \frac{I_{\text{м.КЗ.мин}}^{(2)}}{I_{\text{СЗ.мин}}} \quad (2.25)$$

где:

$I_{\text{м.КЗ.мин}}^{(2)}$ – действующего значения периодической составляющей минимального тока двухфазного короткого замыкания генератора (двигателя), А.

Относительно строгая методика проверки защитоспособности дифференциальной защиты изложена в [7] и основана на определении минимального тока двухфазного короткого замыкания цепи статора при вариации доли короткозамкнутых витков и величины переходного сопротивления $r_{\text{пер.}}$:

$$I_{\text{м.КЗ.мин}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\alpha \cdot |E_{\text{д.м}}''|}{\sqrt{(\alpha \cdot R_{\text{д.м}} + r_{\text{пер.}})^2 + (\alpha^2 \cdot X_{\text{д.м}}'')^2}} \quad (2.26)$$

где:

α – доля короткозамкнутых витков обмотки статора, отсчитываемая со стороны нейтральных выводов электрической машины (генератора, двигателя) по продольной оси, о. е.;

$E_{\text{д.м}}''$ – действующее значение сверхпереходной ЭДС фазы статора электрической машины (генератора, двигателя) по продольной оси, В;

$R_{\text{д.м}}$, $X_{\text{д.м}}''$ – активное и индуктивное сверхпереходное сопротивление статора электрической машины (генератора, двигателя) по продольной оси, Ом;

$r_{\text{пер.}}$ – активное переходное сопротивление в месте короткого замыкания обмотки статора электрической машины (генератора, двигателя), Ом.

Следует отметить, что также допустима упрощенная оценка чувствительности защиты, которая выполняется при пренебрежении в выражении (2.26) переходным сопротивлением ($r_{\text{пер.}} = 0$) и доле короткозамкнутых витков $\alpha = 100\%$ (повреждение на выводах машины).

Сверхпереходная фазная ЭДС статора генератора (двигателя) рассчитывается по выражениям (2.35)...(2.39) согласно методике, изложенной в разделе 2.2.1. Далее, при удовлетворении требований по чувствительности (2.25) и селективности срабатывания (2.21)...(2.24) дифференциальной защиты с торможением, следует выполнить проверку условий достаточности уровня тормозного сигнала при аварийных и пусковых режимах работы электрического генератора (двигателя).

Подчеркнем, что нижеприведенные расчетные выражения для проверки селективности дифференциальной защиты в режимах работы электрической машины, характеризующихся ее торможением, получены согласно функциональным алгоритмам формирования дифференциальных и тормозных сигналов тока с применением некоторых допущений. В частности, в этих выражениях различие по амплитуде и по углу фазных токов плеч защиты учитывается обобщенно с использованием понятия относительной погрешности ϵ трансформатора тока. Благодаря этому результат векторного сложения (1.4) при вычислении дифференциального сигнала или разности (1.3) при вычислении тормозного сигнала комплексных амплитуд фазных токов плеч защиты может быть выражен относительно действующего значения сквозного тока в расчетном режиме (при асинхронном ходе, внешнем коротком замыкании или при включении двигателя). Неравномерность распределения вторичной нагрузки между трансформаторами тока одноименных фаз дифференциальной защиты, а также различие их характеристик намагничивания учитывается коэффициентом однотипности $k_{\text{одн.}}$.

Согласно рабочей характеристике (см. рис. 1.2) торможение дифференциальной защиты синхронного генератора (двигателя) производится в асинхронном режиме $I_{дифф.}, I_{торм.} = f(I_{ур.ас.реж.мах})$ или при внешнем коротком замыкании $I_{дифф.}, I_{торм.} = f(I_{м.КЗ.мах}^{(3)})$:

$$I_{дифф.} = \begin{cases} k_{одн.} \cdot \varepsilon \cdot I_{ур.ас.реж.мах} \\ k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot \varepsilon \cdot I_{м.КЗ.мах}^{(3)} \end{cases} \quad (2.27)$$

$$I_{торм.} = \begin{cases} k_{одн.} \cdot I_{ур.ас.реж.мах} \\ k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot I_{м.КЗ.мах}^{(3)} \end{cases} \quad (2.28)$$

где:

$I_{ур.ас.реж.мах}$ – максимальная величина действующего значения уравнильного тока статора синхронной машины в асинхронном режиме, А.

Кроме этого, для проверки селективности чувствительной ступени защиты ANSI 87M синхронного двигателя должны быть дополнительно рассмотрены расчетные условия, которые отвечают включению на параллельную работу $I_{дифф.}, I_{торм.} = f(I_{пуск.})$ и характеризуются торможением защиты:

$$I_{дифф.} = \begin{cases} k_{одн.} \cdot \varepsilon \cdot I_{ур.ас.реж.мах} \\ k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot \varepsilon \cdot I_{м.КЗ.мах}^{(3)} \\ k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot \varepsilon \cdot I_{пуск.} \end{cases} \quad (2.29)$$

$$I_{торм.} = \begin{cases} k_{одн.} \cdot I_{ур.ас.реж.мах} \\ k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot I_{м.КЗ.мах}^{(3)} \\ k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot I_{пуск.} \end{cases} \quad (2.30)$$

где:

$I_{пуск.}$ – максимальная величина действующего значения пускового тока двигателя, А.

Действующее значение пускового тока $I_{пуск.}$ вычисляется по выражению:

$$I_{пуск.} = I_{пуск.*} \cdot I_{ном.} \quad (2.31)$$

где:

$I_{пуск.*}$ – кратность пускового тока двигателя, о. е.

В свою очередь торможение дифференциальной защиты асинхронного двигателя соответствует режимам пуска $I_{дифф.}, I_{торм.} = f(I_{пуск.})$ и внешнего короткого замыкания $I_{дифф.}, I_{торм.} = f(I_{м.КЗ.мах}^{(3)})$:

$$I_{дифф.} = \begin{cases} k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot \varepsilon \cdot I_{м.КЗ.мах}^{(3)} \\ k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot \varepsilon \cdot I_{пуск.} \end{cases} \quad (2.32)$$

$$I_{торм.} = \begin{cases} k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot I_{м.КЗ.мах}^{(3)} \\ k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot I_{пуск.} \end{cases} \quad (2.33)$$

Применение описанных выше методических указаний по расчету параметров срабатывания дифференциальной защиты ANSI 87M рассмотрено в главе 3. Далее описаны методы вычисления уравнительного тока $I_{ур.ас.режс.макс}$ в двухчастотном асинхронном режиме синхронной машины, а также тока трехфазного короткого замыкания $I_{м.КЗ.макс}^{(3)}$ на выводах генератора или двигателя.

2.2.1. Методика расчета тока трехфазного короткого замыкания на выводах генератора или двигателя

Максимальный ток внешнего трехфазного короткого замыкания $I_{м.КЗ.макс}^{(3)}$ на выводах синхронной машины (генератора или двигателя) рассчитывается исходя из уравнения:

$$I_{м.КЗ.макс}^{(3)} = \frac{|E_{dм}''|}{\sqrt{(R_{dм})^2 + (X_{dм}'')^2}} \quad (2.34)$$

где:

$E_{d.м}''$ – действующее значение сверхпереходной ЭДС фазы статора электрической машины (генератора, двигателя) по продольной оси, В;

$R_{d.м}$, $X_{d.м}''$ – активное и индуктивное сверхпереходное сопротивление статора электрической машины (генератора, двигателя) по продольной оси, Ом;

Действующее значение сверхпереходной фазной ЭДС статора электрической машины (генератора или двигателя) рассчитывается по выражениям:

$$|E_{d.м}''| = \sqrt{(E_{d.м}''^{Re})^2 + (E_{d.м}''^{Im})^2} \quad (2.35)$$

$$E_{d.м}''^{Re} = \frac{U_{ном.}}{\sqrt{3}} \pm I_{ном.} \cdot (R_{d.м} \cdot \cos \varphi_{ном.} - X_{d.м}'' \cdot \sin \varphi_{ном.}) \quad (2.36)$$

$$E_{d.м}''^{Im} = \pm I_{ном.} \cdot (R_{d.м} \cdot \sin \varphi_{ном.} + X_{d.м}'' \cdot \cos \varphi_{ном.}) \quad (2.37)$$

где:

$U_{ном.}$ – действующее значение номинального междуфазного напряжения статора электрической машины (генератора, двигателя), В.

$\cos \varphi_{ном.}$, $\sin \varphi_{ном.}$ – номинальные коэффициенты активной и реактивной мощности электрической машины, о. е.

При пренебрежении активной составляющей сопротивления статора по продольной оси $R_{d.м}$ данные выражения могут быть приведены к виду:

$$E_{d.м}''^{Re} = \frac{U_{ном.}}{\sqrt{3}} \pm I_{ном.} \cdot (-X_{d.м}'' \cdot \sin \varphi_{ном.}) \quad (2.38)$$

$$E_{d.м}''^{Im} = \pm I_{ном.} \cdot (X_{d.м}'' \cdot \cos \varphi_{ном.}) \quad (2.39)$$

Следует отметить, что в уравнениях (2.36), (2.37), (2.38) и (2.39) с учетом принятого положительного направления тока статора «к шинам» знак «+» перед $I_{ном.}$ используется при расчете проекций ЭДС генератора, а знак «-» при определении $E_{d.м}''^{Re}$, $E_{d.м}''^{Im}$ двигателя.

2.2.2. Методика расчета уравнивающего тока в двухчастотном асинхронном режиме синхронной машины

Основные трудности расчета электрических величин в асинхронных режимах электроэнергетических систем обусловлены необходимостью учета частотной зависимости электрических параметров (сопротивлений) схем замещения. В общем случае, многочастотный асинхронный режим рассчитывается с использованием метода наложения, при котором определяется реакция электрической сети на вынужденные колебания собственной частоты, возбуждаемые отдельно взятым источником (генератором). Строгая постановка задачи исследования многочастотных асинхронных режимов электросети выполнена в [8] и в связи с этим в настоящем пособии не рассматривается. Тем не менее, при незначительной разности частот источников электроэнергии с целью упрощения допускается применение символических методов расчета для некоторого усредненного значения частоты. Тогда, комплексное значение уравнивающего тока в двухчастотном асинхронном режиме возбужденной синхронной машины (генератора или двигателя) определяется согласно расчетной схеме замещения (см. рис. 2.4, при положительном направлении тока «к шинам») при допущении незначительной разницы частот ω_m и ω_c :

$$\dot{I}_{ур.ас.реж.} = - \frac{(E_{d.m}''^{Re} + jE_{d.m}''^{Im}) \cdot (1 - k_E \cdot e^{j\delta_{омн.}})}{\sqrt{(R_{с.экв} + R_{d.m})^2 + (X_{с.экв} + X_{d.m}'')^2}} \quad (2.40)$$

где:

$$k_E = \frac{|E_{с.экв}''|}{|E_{d.m}''|} - \text{коэффициент отношения модулей эквивалентной ЭДС системы и ЭДС}$$

синхронного генератора (двигателя) по продольной оси, о. е.;

$\delta_{омн.}$ – относительный угол между векторами ЭДС генератора и эквивалента энергосистемы, градус;

$R_{с.экв}$, $X_{с.экв}$ – активная и реактивная составляющая сопротивления эквивалента энергосистемы, Ом.

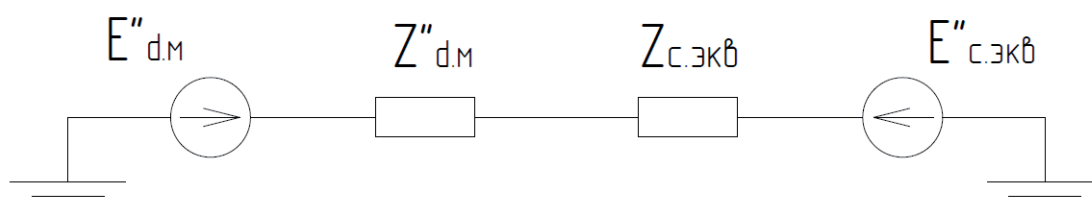


Рис. 2.4. Схема замещения для расчета уравнивающего тока при двухчастотном режиме $I_{ур.ас.реж. max}$

Максимальное значение модуля уравнивающего тока $\dot{I}_{ур.ас.реж. max}$ определяется по (2.40) для момента времени, отвечающего условию проворота ротора ($\delta_{омн.} = 180$ градусов):

$$|\dot{I}_{ур.ас.реж. max}| = \frac{(1 + k_E) \cdot |E_{d.m}''|}{\sqrt{(R_{с.экв} + R_{d.m})^2 + (X_{с.экв} + X_{d.m}'')^2}} \quad (2.41)$$

Примеры расчета параметров срабатывания дифференциальной защиты ANSI 87M синхронного генератора и асинхронного двигателя с использованием описанных выше методических указаний рассмотрены в последующих разделах.

3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ

В настоящем разделе рассмотрены характерные примеры расчета параметров срабатывания продольной дифференциальной токовой защиты синхронного генератора типа ТВФ-63-2УЗ ($U_{ном.} = 10.5$ кВ) и асинхронного двигателя марки 2А3М-5000/6000 ($U_{ном.} = 6.0$ кВ). В виду ограничений объема методических указаний здесь приводятся расчетные примеры при проверке измерительных трансформаторов тока на предельно допустимые значения сопротивления и кратности тока нагрузки с использованием кривых предельной кратности или вольтамперной характеристики. При этом оценка соответствия измерительных трансформаторов тока осуществляется с использованием расчетных выражений применительно только к режимам трехфазного короткого замыкания. Эта особенность расчетных условий проверки трансформаторов тока обусловлена изолированным режимом работы нейтрали электрической сети, к шинам которой коммутируется синхронный генератор ($U_{ном.} = 10.5$ кВ) или асинхронный двигатель ($U_{ном.} = 6.0$ кВ). Естественно, что указанный режим работы нейтрали характеризуется сравнительно малыми (по отношению к номинальному току статора, см. выражение (2.3), $K_{расч.ТТ}^{(1)} = \frac{I_{зам.}^{(1)}}{I_{перв.ном.ТТ}} \rightarrow 0$) значениями тока замыкания на землю. В остальных случаях, при больших уровнях тока короткого замыкания на землю (например, в сети 0.4 кВ) требуется полноценная проверка согласно вышеизложенным методическим указаниям.

Кроме этого, в настоящих методических указаниях не рассматриваются вопросы выбора измерительных трансформаторов тока, их проверки по условиям термической и динамической стойкости токам короткого замыкания. Однако при этом считается, что выбранные при проектировании главной схемы электроснабжения трансформаторы тока удовлетворяют данным требованиям.

Следует отметить, что для расчета тока трехфазного короткого замыкания, уравнительного тока двухчастотного асинхронного режима используется эквивалентная схема замещения, представленная на рис. 2.4. Также в настоящем разделе не решается проблема расчета параметров схемы замещения и определения в ней токораспределения в силу указанных выше причин.

3.1. Пример расчета параметров срабатывания продольной дифференциальной защиты синхронного генератора (SEPRAM 1000+ G87)

Паспортные данные о номинальных параметрах синхронного генератора типа ТВФ-63-2УЗ сведены в следующую таблицу:

$P_{ном.}$, МВт	$S_{ном.}$, МВА	$U_{ном.}$, кВ	$I_{ном.}$, А	$\cos \varphi_{ном.}$, о. е.	$\sin \varphi_{ном.}$, о. е.	x_d'' , о. е.	x_d'' , Ом
63.0	78.75	10.5	4330.0	0.80	0.60	0.153	0.214

Параметры схемы замещения (см. рис. 2.4) эквивалентного генератора энергосистемы рассчитываются согласно его исходным данным ($S_{ном.} = 100$ МВА; $U_{ном.} = 10.5$ кВ; $X_{э.к.с}^* = 0.3$ о. е.): $X_{э.к.с} = 0.5$ Ом; $E_{э.к.с} = 6062.178$ В.

3.1.1. Расчет уравнивающего тока двухчастотного асинхронного режима и тока трехфазного короткого замыкания на выводах синхронного генератора

Действующее значение сверхпереходной фазной ЭДС статора генератора при пренебрежении активной составляющей сопротивления статора по продольной оси по выражениям (2.35), (2.38) и (2.39):

$$E_{d.m}'' \text{ Re} = \frac{U_{ном.}}{\sqrt{3}} + I_{ном.}(-X_{d.m}'' \cdot \sin \varphi_{ном.}) = \frac{10,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} + 4330 \cdot (-0,214 \cdot 0,6) = 5506,206 \text{ В}$$

$$E_{d.m}'' \text{ Im} = I_{ном.}(X_{d.m}'' \cdot \cos \varphi_{ном.}) = 4330 \cdot (0,214 \cdot 0,8) = 741,296 \text{ В}$$

$$|E_{d.m}''| = \sqrt{(E_{d.m}'' \text{ Re})^2 + (E_{d.m}'' \text{ Im})^2} = \sqrt{5506,206^2 + 741,296^2} = 5555,882 \text{ В}$$

Рассчитываем максимальный ток внешнего трехфазного короткого замыкания $I_{м.КЗ.маx}^{(3)}$ на выводах синхронного генератора по выражению (2.34):

$$I_{м.КЗ.маx}^{(3)} = \frac{|E_{d.m}''|}{X_{d.m}''} = \frac{5555,882}{0,214} = 25962,065 \text{ А}$$

Действующее значение периодической составляющей максимального тока трехфазного короткого замыкания от эквивалента энергосистемы:

$$I_{эв.с.КЗ.маx}^{(3)} = \frac{|E_{эв.с}|}{X_{эв.с}} = \frac{6062,178}{0,331} = 18314,737 \text{ А}$$

Максимальное значение модуля уравнивающего тока определяется по выражению (2.41) при пренебрежении активной составляющей сопротивления эквивалента энергосистемы и активной составляющей сопротивления статора:

$$|\dot{i}_{ур.ас.реж.маx}| = \frac{(1+k_E) \cdot |E_{d.m}''|}{X_{с.эв} + X_{d.m}''} = \frac{\left(1 + \frac{6062,178}{5555,882}\right) \cdot 5555,882}{0,331 + 0,214} \approx 21317,54 \text{ А}$$

3.1.2. Проверка нагрузочной способности измерительных трансформаторов тока по паспортным характеристикам допустимой кратности тока

Блок микропроцессорных защит SEPAM 1000+ G87, в составе которого реализован функциональный алгоритм токовой продольной дифференциальной защиты синхронного генератора ТВФ-63-2УЗ, подключается согласно схеме рис. 1.1 к измерительным трансформаторам тока марки ТШЛ-10 ($U_{ном.ТТ} = 11 \text{ кВ}$; $I_{перв.ном.ТТ} = 5000 \text{ А}$; $I_{втор.ном.ТТ} = 5 \text{ А}$; $S_{н.ном.ТТ} = 30 \text{ ВА}$; $R_{втор.ТТ} = 1.1 \text{ Ом}$). Активная (2.9) и реактивная (2.10) составляющие номинального сопротивления внешней (вторичной) нагрузки трансформатора тока:

$$R_{н.ном.ТТ} = \frac{S_{н.ном.ТТ}}{I_{втор.ном.ТТ}^2} \cos \varphi_{н.ном.ТТ} = \frac{30}{5^2} \cdot 0,8 = 0,96 \text{ Ом}$$

$$X_{н.ном.ТТ} = \frac{S_{н.ном.ТТ}}{I_{втор.ном.ТТ}^2} \sin \varphi_{н.ном.ТТ} = \frac{30}{5^2} \cdot 0,6 = 0,72 \text{ Ом}$$

Составляющие расчетного сопротивления нагрузки трансформаторов тока в режиме трехфазного ($R_{н.расч.ТТ}^{(3)}$, $X_{н.расч.ТТ}^{(3)}$) короткого замыкания рассчитываются по выражению (2.6), см. табл. 2.1:

$$R_{н.расч.ТТ}^{(3)} = R_{каб.} + R_{P3A} + R_{конт.соед.} = 0,6 + 0,0 + 0,1 = 0,700 \text{ Ом}$$

$$X_{н.расч.ТТ}^{(3)} = X_{P3A} = 0,001 \text{ Ом}$$

Расчет допустимой предельной кратности тока при пренебрежении сопротивлением рассеяния вторичной обмотки трансформатора тока производится по выражению (2.8):

$$K_{пред.насп.ТТ} (Z_{расч.ТТ}^{(3)}) = K_{ном.насп.ТТ} \cdot \frac{\sqrt{(R_{втор.ТТ} + R_{н.ном.ТТ})^2 + (X_{н.ном.ТТ})^2}}{\sqrt{(R_{втор.ТТ} + R_{н.расч.ТТ}^{(3)})^2 + (X_{н.расч.ТТ}^{(3)})^2}} =$$

$$= 18 \cdot \frac{\sqrt{(1,1 + 0,96)^2 + 0,72^2}}{\sqrt{(1,1 + 0,700)^2 + 0,001^2}} \approx 21,82$$

Нагрузочная способность трансформаторов тока проверяется согласно (2.4):

$$K_{расч.ТТ}^{(3)} = \frac{I_{м.КЗ.макс}^{(3)}}{I_{перв.ном.ТТ}} = \frac{25962,065}{5000} \approx 5,19$$

Поскольку $K_{расч.ТТ}^{(3)} < K_{пред.насп.ТТ} (Z_{расч.ТТ}^{(3)})$ трансформаторы тока удовлетворяют требованиям по нагрузочной способности.

3.1.3. Расчет параметров срабатывания и проверка чувствительности продольной дифференциальной защиты ANSI 87M синхронного генератора

Находим минимальный ток срабатывания чувствительной ступени продольной токовой дифференциальной защиты генератора по выражению (2.19):

$$I_{СЗ.мин} = k_{от.} \cdot k_{одн.} \cdot \varepsilon \cdot I_{раб.макс} = 1,2 \cdot 0,5 \cdot 0,1 \cdot 4558,028 = 273,482 \text{ А}$$

где:

$$I_{раб.макс} = \frac{S_{ном.}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.} \cdot 0,95} = \frac{78,75 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 4558,028 \text{ А}$$

$$I_{СЗ.мин}^* = \frac{I_{СЗ.мин}}{I_{ном.}} = \frac{273,482}{4330} = 0,063 \text{ о.е.}$$

Расчетные условия срабатывания дифференциальной защиты с торможением отвечают режиму внутреннего короткого замыкания вблизи выводов генератора (2.21..2.22):

$$I_{дифф.} = k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot (I_{м.КЗ.макс}^{(3)} + I_{экв.с.КЗ.макс}^{(3)}) = 0,5 \cdot 1,5 \cdot (25962,05 + 18314,737) = 33207,59 \text{ А}$$

$$I_{торм.} = k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot \varepsilon \cdot \frac{|I_{м.КЗ.макс}^{(3)} - I_{экв.с.КЗ.макс}^{(3)}|}{2} = 0,5 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot \frac{|25962,05 - 18314,737|}{2} = 286,774 \text{ А}$$

По выражениям (2.23) и (2.24) вычисляются относительные значения дифференциального и тормозного токов защиты:

$$I_{дифф.*} = \frac{I_{дифф.}}{I_{ном.}} = \frac{33207,59}{4330} = 7,669 \text{ о.е.}$$

$$I_{\text{торм.}^*} = \frac{I_{\text{торм.}}}{I_{\text{ном.}}} = \frac{286,774}{4330} = 0,066 \text{ о.е.}$$

Действующее значение периодической составляющей минимального тока двухфазного короткого замыкания генератора согласно (2.26):

$$I_{\text{м.КЗ.мин}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} |E_{d.m}''|}{2 X_{d.m}''} = \frac{\sqrt{3} 5555,882}{2 \cdot 0,214} = 22483,808 \text{ А}$$

Оценка чувствительности дифференциальной защиты с торможением осуществляется по выражению (2.25):

$$k_{\text{чувств.}} = \frac{I_{\text{м.КЗ.мин}}^{(2)}}{I_{\text{СЗ.мин}}} = \frac{22483,808}{273,482} = 82,213$$

Выполним проверку условий достаточности уровня тормозного сигнала при аварийных режимах работы. Согласно рабочей характеристике (см. рис. 3.1) торможение дифференциальной защиты синхронного генератора производится в асинхронном режиме или при внешнем коротком замыкании:

$$I_{\text{дифф.}} = \begin{cases} k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon \cdot I_{\text{ур.ас.реж.мах}} = 0,5 \cdot 0,1 \cdot 21317,54 = 1065,877 \text{ А} \\ k_{\text{одн.}} \cdot k_{\text{ан.}} \cdot \varepsilon \cdot I_{\text{м.КЗ.мах}}^{(3)} = 0,5 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 25962,065 = 1947,155 \text{ А} \end{cases}$$

$$I_{\text{торм.}} = \begin{cases} k_{\text{одн.}} \cdot I_{\text{ур.ас.реж.мах}} = 0,5 \cdot 47036,68 = 10658,77 \text{ А} \\ k_{\text{одн.}} \cdot k_{\text{ан.}} \cdot I_{\text{м.КЗ.мах}}^{(3)} = 0,5 \cdot 1,5 \cdot 25962,065 = 19471,549 \text{ А} \end{cases}$$

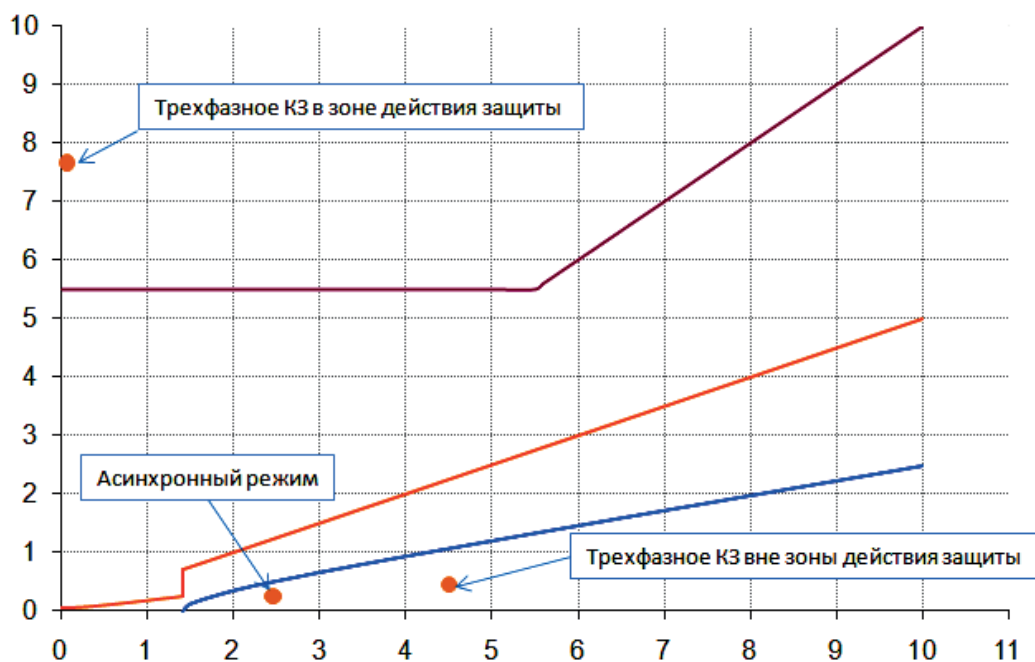


Рис. 3.1. Характеристика срабатывания продольной дифференциальной защиты синхронного генератора ANSI 87 M

$$I_{\text{дифф.}^*} = \begin{cases} \frac{I_{\text{дифф.}}}{I_{\text{ном.}}} = \frac{1065,877}{4330} = 0,246 \text{ о.е.} \\ \frac{I_{\text{дифф.}}}{I_{\text{ном.}}} = \frac{1947,155}{4330} = 0,45 \text{ о.е.} \end{cases} \quad I_{\text{торм.}^*} = \begin{cases} \frac{I_{\text{торм.}}}{I_{\text{ном.}}} = \frac{10658,77}{4330} = 2,462 \text{ о.е.} \\ \frac{I_{\text{торм.}}}{I_{\text{ном.}}} = \frac{19471,549}{4330} = 4,497 \text{ о.е.} \end{cases}$$

3.2. Пример расчета параметров срабатывания продольной дифференциальной защиты асинхронного двигателя (SERAM 1000+ M87)

В данном разделе приводятся расчетные выражения для определения параметров срабатывания продольной дифференциальной защиты обмотки статора асинхронного двигателя марки 2АЗМ-5000/6000. Номинальные параметры данного двигателя приведены ниже.

$P_{ном.},$ МВт	$S_{ном.},$ МВА	$U_{ном.},$ кВ	$I_{ном.},$ А	$\cos \varphi_{ном.},$ о. е.	$\sin \varphi_{ном.},$ о. е.	$x''_d,$ о. е.	$x''_d,$ Ом
5.0	6.098	6.0	536.922	0.92	0.39	6.50	0.974

Исходные данные об эквивалентном генераторе энергосистемы (см. рис. 2.4):
 $U_{ном.} = 6.0$ кВ; $X_{экв.с} = 0.5$ Ом; $E_{экв.с} = 3464.102$ В.

3.2.1. Расчет пускового тока и тока трехфазного короткого замыкания на выводах асинхронного двигателя

По выражению (2.31) находим действующее значение пускового тока:

$$I_{пуск.} = I_{пуск.*} \cdot I_{ном.} = 6,5 \cdot 536,922 = 3489,994 \text{ А}$$

Действующее значение периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания на выводах асинхронного двигателя:

$$I_{м.кз.маx}^{(3)} \approx I_{пуск.*} \cdot I_{ном.} = 3489,994 \text{ А}$$

Действующее значение периодической составляющей максимального тока трехфазного короткого замыкания от эквивалента энергосистемы:

$$I_{экв.с.кз.маx}^{(3)} = \frac{|E_{экв.с.}|}{X_{экв.с.}} = \frac{3464,102}{0,5} = 6928,204 \text{ А}$$

3.2.2. Проверка нагрузочной способности измерительных трансформаторов тока по паспортным характеристикам допустимой кратности тока и вольтамперной характеристике

Рассмотрим пример, когда токовая продольная дифференциальная защита асинхронного двигателя типа 2АЗМ-5000/6000, реализованная в блоке микропроцессорных защит SERAM 1000+ M87, подключается по схеме рис. 1.1 к измерительным трансформаторам тока производства Schneider Electric марки ARJP2/N2J (см. паспортные характеристики, табл. 3.1) с номинальным классом точности 5 P ($U_{ном.ТТ} = 6$ кВ; $I_{перв.ном.ТТ} = 800$ А; $I_{втор.ном.ТТ} = 5$ А; $S_{н.ном.ТТ} = 10$ ВА; $R_{втор.ТТ} = 0.14$ Ом). Активная и реактивная составляющие номинального сопротивления внешней (вторичной) нагрузки трансформатора тока вычисляются по выражениям (2.9) и (2.10):

$$R_{н.ном.ТТ} = \frac{S_{н.ном.ТТ}}{I_{втор.ном.ТТ}^2} \cos \varphi_{н.ном.ТТ} = \frac{10}{5^2} \cdot 0,8 = 0,32 \text{ Ом}$$

$$X_{н.ном.ТТ} = \frac{S_{н.ном.ТТ}}{I_{втор.ном.ТТ}^2} \sin \varphi_{н.ном.ТТ} = \frac{10}{5^2} \cdot 0,6 = 0,24 \text{ Ом}$$

Составляющие расчетного сопротивления нагрузки трансформаторов тока в режиме трехфазного ($R_{н.расч.ТТ}^{(3)}$, $X_{н.расч.ТТ}^{(3)}$) короткого замыкания рассчитываются по выражению (2.6), см. табл. 2.1:

$$R_{н.расч.ТТ}^{(3)} = R_{каб.} + R_{P3A} + R_{конт.соед.} = 0,2 + 0,0 + 0,1 = 0,30 \text{ Ом}$$

$$X_{н.расч.ТТ}^{(3)} = X_{P3A} = 0,001 \text{ Ом}$$

Расчет допустимой предельной кратности тока при пренебрежении сопротивлением рассеяния вторичной обмотки трансформатора тока производится по выражению (2.8):

$$K_{пред.нап.ТТ} (Z_{расч.ТТ}^{(3)}) = K_{ном.нап.ТТ} \cdot \frac{\sqrt{(R_{втор.ТТ} + R_{н.ном.ТТ})^2 + (X_{н.ном.ТТ})^2}}{\sqrt{(R_{втор.ТТ} + R_{н.расч.ТТ}^{(3)})^2 + (X_{н.расч.ТТ}^{(3)})^2}} =$$

$$= 20 \cdot \frac{\sqrt{(0,128 + 0,32)^2 + 0,24^2}}{\sqrt{(0,140 + 0,300)^2 + 0,001^2}} \approx 23,10$$

Нагрузочная способность трансформаторов тока проверяется по выражению (2.4):

$$K_{расч.ТТ}^{(3)} = \frac{I_{экв.с.КЗ.макс}^{(3)}}{I_{перв.ном.ТТ}} = \frac{6928,204}{800} \approx 8,66$$

Дополнительно выполним проверку трансформаторов тока с использованием их вольтамперной характеристики (см. табл. 3.1). Используя упрощенные выражения (2.15) и (2.16) найдем проекции и модуль вектора ЭДС самоиндукции трансформатора тока в режиме холостого хода первичной обмотки:

$$E_{\mu}^{Re} = U_{н.втор.ТТ} = 30 \cdot 1,45 = 43,50$$

$$E_{\mu}^{Im} = -I_{н.втор.ТТ} \cdot R_{втор.ТТ} = -(0,2 \cdot 0,33) \cdot 0,14 = -0,00924$$

$$|\dot{E}_{\mu}| = \sqrt{(E_{\mu}^{Re})^2 + (E_{\mu}^{Im})^2} = \sqrt{(43,50)^2 + (-0,00924)^2} \approx 43,50$$

Таблица 3.1. Паспортные данные и вольтамперная характеристика трансформаторов тока производства Schneider Electric

Modifiche:	CURRENT TRANSFORMERS TYPE	ARJA/N2J	ARJP2/N2J	ARJP1/N1J	ARJP2/N2J	
	ORDER:	A2403	A2403	A2403	A2403	
	sn:	401	402	403	404	
	RATIO	1500 / 5	300 / 5	300 / 5	800 / 5-5	
	CONTINUOUS PRIMARY CURRENT (A)	1800	360	360	960	
	BURDEN (VA) AND ACCURACY CLASS	5 / 5P	5 / 5P	5 / 5P	10 / 5P	5 / 5P
	ACCURACY LIMIT FACTOR	20	20	20	20	20
	STANDARDS	CEI 5706		IEC 60044-1		
	PRIMARY TURNS	1	2	2	1	1
	SECONDARY TURNS	300	120	120	160	160
	SECONDARY RESISTANCE (ohm) AT 75°	0,4	0,18	0,18	0,14	0,24
	SECONDARY LEAKAGE REACTANCE (W)	NEGLIGIBLE				
	CORE	TYPE	RING			
		MATERIAL	Fe-Si ORIENTED ELECTRICAL STEEL			
X		0,15	0,27	0,27	0,2	0,2
Y		48	22	22	30	30
FREQUENCY (c/s)		50				
Edizione: A						
Controllato: V.Ferraro						
Data:02/03/01						
Disegnato: G. Casavecchia						
Data:03/03/01	<p>Il presente disegno è di proprietà intellettuale della SCHNEIDER ELECTRIC S.p.A. Non può essere copiato, riprodotto, mostrato a terzi secondo le vigenti disposizioni di legge.</p>					
Formato UNI A4	Denominazione del disegno:	CURRENT TRANSFORMER TYPE ESTIMATED MAGNETIZATION CURVE OF PROTECTION CORES				
	N°:	DI 100027				

Расчет предельной кратности с использованием вольтамперной характеристики трансформаторов тока марки ARJP2/N2J осуществляется согласно (2.11) при пренебрежении сопротивлением рассеяния вторичной обмотки ($X_{s, втор. TT} = 0$):

$$K_{пред.наст. TT} = \frac{1}{I_{втор. ном. TT}} \cdot \frac{|E_{\mu}|}{\sqrt{(R_{втор. TT} + R_{н. расч. TT})^2 + (X_{н. расч. TT})^2}} =$$

$$= \frac{1}{5} \cdot \frac{43,50}{\sqrt{(0,14 + 0,30)^2 + (0,001)^2}} \approx 19,77$$

Поскольку $K_{расч.ТТ}^{(3)} < K_{пред.назн.ТТ} (Z_{расч.ТТ}^{(3)})$ трансформаторы тока марки ARJP2/N2J производства Schneider Electric удовлетворяют требованиям по нагрузочной способности.

3.2.3. Расчет параметров срабатывания и проверка чувствительности продольной дифференциальной защиты ANSI 87M асинхронного двигателя

Минимальный ток срабатывания чувствительной ступени продольной токовой дифференциальной защиты находим по выражению (2.19):

$$I_{CЗ.min} = k_{от.} \cdot k_{одн.} \cdot \varepsilon \cdot I_{раб.max} = 1,2 \cdot 0,5 \cdot 0,1 \cdot 617,663 = 37,06 \text{ A}$$

где:

$$I_{раб.max} = \frac{S_{ном.}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.} \cdot 0,95} = \frac{6,098}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,95} = 617,663 \text{ A}$$

$$I_{CЗ.min}^* = \frac{I_{CЗ.min}}{I_{ном.}} = \frac{37,06}{536,922} = 0,069 \text{ о.е.}$$

Расчетные условия срабатывания дифференциальной защиты с торможением отвечают режиму внутреннего короткого замыкания вблизи выводов двигателя:

$$I_{дифф.} = k_{одн.} \cdot k_{ан.} (I_{м.КЗ.max}^{(3)} + I_{экв.с.КЗ.max}^{(3)}) = 0,5 \cdot 1,5 \cdot (3489,994 + 6928,204) = 7813,649 \text{ A}$$

$$I_{торм.} = k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot \varepsilon \cdot \frac{|I_{м.КЗ.max}^{(3)} - I_{экв.с.КЗ.max}^{(3)}|}{2} = 0,5 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot \frac{|3489,994 - 6928,204|}{2} = 128,933 \text{ A}$$

Относительные значения дифференциального и тормозного токов защиты:

$$I_{дифф.*} = \frac{I_{дифф.}}{I_{ном.}} = \frac{7813,649}{536,922} = 14,553 \text{ о.е.} \quad I_{торм.*} = \frac{I_{торм.}}{I_{ном.}} = \frac{128,933}{536,922} = 0,240 \text{ о.е.}$$

По выражению (2.26) находим действующее значение периодической составляющей минимального тока двухфазного короткого замыкания двигателя:

$$I_{м.КЗ.min}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{м.КЗ.max}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 3489,994 = 3022,423 \text{ A}$$

Коэффициент чувствительности рассчитывается с использованием выражения (2.25):

$$k_{чувств.} = \frac{I_{м.КЗ.min}^{(2)}}{I_{CЗ.min}} = \frac{3022,423}{37,06} = 81,555$$

Выполним оценку достаточности уровня тормозного сигнала при аварийных режимах работы. Несрабатывание (торможение) дифференциальной защиты асинхронного двигателя соответствует режимам включения (пуска) и внешнего короткого замыкания (см. рис. 3.2):

$$I_{дифф.} = k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot \varepsilon \cdot I_{м.КЗ.max}^{(3)} = 0,5 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 3489,994 = 261,75 \text{ A}$$

$$I_{торм.} = k_{одн.} \cdot k_{ан.} \cdot I_{м.КЗ.max}^{(3)} = 0,5 \cdot 1,5 \cdot 3489,994 = 2617,495 \text{ A}$$

$$I_{дифф.*} = \frac{I_{дифф.}}{I_{ном.}} = \frac{261,75}{536,922} = 0,488 \text{ о.е.} \quad I_{торм.*} = \frac{I_{торм.}}{I_{ном.}} = \frac{2617,495}{536,922} = 4,875 \text{ о.е.}$$

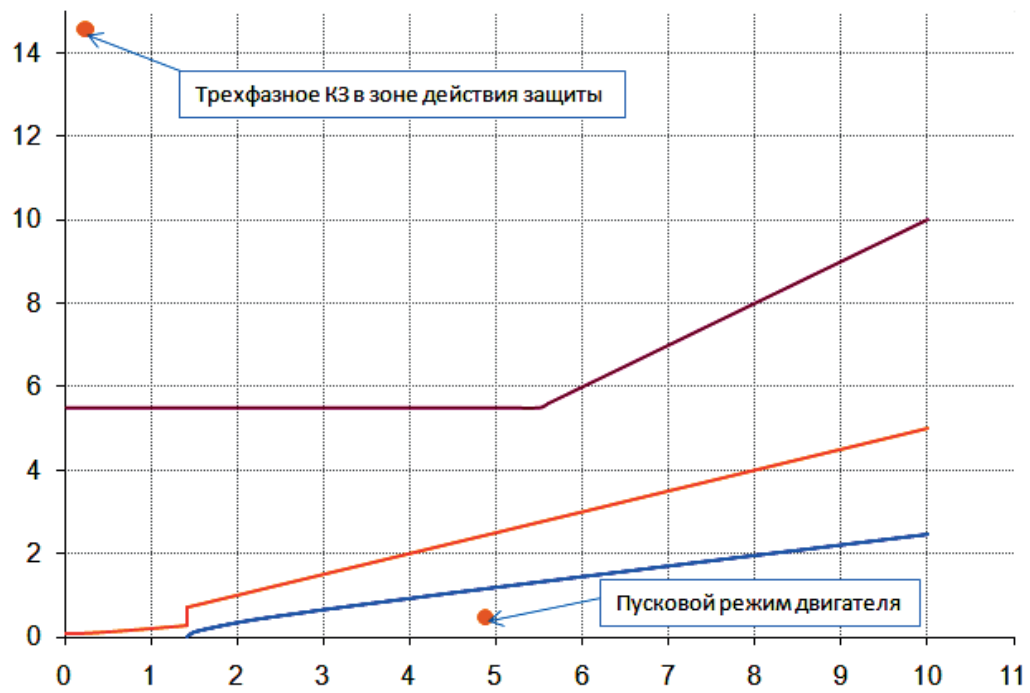


Рис. 3.2. Характеристика срабатывания продольной дифференциальной защиты асинхронного двигателя ANSI 87 М