



Уральский
федеральный
университет

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Уральский
энергетический
институт

В. П. ФЕДОТОВ
С. С. СТАРОСЕЛЬНИКОВ
Л. А. ФЕДотова

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ЗАЩИТ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 110–220 КВ

Учебно-методическое пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

В. П. Федотов
С. С. Старосельников
Л. А. Федотова

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ЗАЩИТ
ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ
НАПРЯЖЕНИЕМ 110–220 кВ**

Учебно-методическое пособие

2-е издание, переработанное и дополненное

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов вуза, обучающихся
по направлению подготовки
13.03.02 — Электроэнергетика
и электротехника

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2018

УДК 621.311:621.316.71(075.8)

ББК 31.27я73+32.965-044я73

Ф34

Первое издание вышло в 2013 году

Рецензенты:

кафедра «Энергетика» Технического университета УГМК (завкафедрой доц., канд. техн. наук С. В. Федорова),;
заместитель генерального директора по инжинирингу в электроэнергетике ООО «Прософт-Системы», доц., канд. техн. наук В. А. Смирнов

В оформлении обложки использована фотография с сайта <https://www.yandex.ru/images/search?p=20&text=силовые трансформаторы на подстанции>

Федотов, В. П.

Ф34 Проектирование микропроцессорных защит элементов электрических сетей напряжением 110–220 кВ : учебно-методическое пособие / В. П. Федотов, С. С. Старосельников, Л. А. Федотова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 268 с.

ISBN 978-5-7996-2263-3

В пособии описываются типы, назначение, устройство и работа микропроцессорных защит следующих элементов электрических сетей напряжением 110–220 кВ: линий электропередач, автотрансформаторов и сборных шин подстанций. Приводится методика расчета параметров дифференциально-фазной высокочастотной защиты ЛЭП, ступенчатых дистанционных защит и токовых направленных защит нулевой последовательности ЛЭП и автотрансформаторов, дифференциальных токовых защит автотрансформаторов и сборных шин, максимальных токовых защит автотрансформаторов. Рассматриваются примеры их расчета для указанных элементов электрических сетей напряжением 110–220 кВ.

Предназначено для студентов вуза и слушателей курсов повышения квалификации.

Библиогр.: 7 назв. Табл. 48. Рис. 37.

УДК 621.311:621.316.71(075.8)

ББК 31.27я73+32.965-044я73

ISBN 978-5-7996-2263-3

© Уральский федеральный университет, 2018

Введение

Устройства релейной защиты являются одним из основных видов противоаварийной автоматики современных электроэнергетических систем (ЭЭС). Они обеспечивают ликвидацию аварийных ситуаций путем быстрого выявления и отключения поврежденных элементов ЭЭС, а также сигнализируют о ненормальных режимах работы различного оборудования.

Создание линий электропередач высокого и сверхвысокого напряжения, электростанций с агрегатами большой мощности, развитие магистральных и распределительных сетей усложняют процесс управления ЭЭС в аварийных режимах, что, в свою очередь, требует постоянного совершенствования устройств релейной защиты на базе новых технических средств.

Современные микропроцессорные устройства объединяют в рамках единого информационного комплекса функции релейной защиты, автоматики, измерения, регулирования и управления электроустановкой. Такие устройства в структуре автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) энергетического объекта являются конечными устройствами сбора и обработки информации, поэтому получили название терминалов.

Проектирование релейной защиты включает выбор устройств защиты и подключение их к измерительным трансформаторам тока и напряжения данного элемента, а также расчет параметров их срабатывания. Выбор устройств релейной защиты про-

изводится на основании правил устройств электроустановок и норм технологического проектирования, а конкретное исполнение и расчет параметров защит выполняются в соответствии с руководящими указаниями по релейной защите и документацией фирм, занимающихся разработкой и изготовлением этих устройств.

В настоящем пособии рассматриваются вопросы проектирования микропроцессорных защит для различных элементов электрических сетей напряжением 110–220 кВ с использованием аппаратуры научно-производственного предприятия (НПП) «ЭКРА» (Россия, г. Чебоксары).

1. Защиты линий электропередачи напряжением 110–220 кВ

1.1. Типы и назначение защит, применяемых на линиях 110–220 кВ

Линии электропередачи, имея большую протяженность, подвержены повреждениям в большей степени, чем другое электротехническое оборудование. Особенно это относится к воздушным линиям, повреждения которых возможны от грозовых ударов, гололеда, сильного ветра, загрязнения изоляторов и т. п.

Указанные выше, а также другие причины повреждений могут вызывать короткие замыкания фаз между собой и на землю. Поэтому для быстрого отключения поврежденных линий они должны быть оборудованы релейной защитой, действующей на отключение.

Согласно «Нормам технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ» [1] на линиях электропередачи напряжением 110–220 кВ с двухсторонним питанием должны устанавливаться две независимые защиты от всех видов повреждений: основная быстродействующая защита с абсолютной селективностью и резервная защита.

В качестве основной защиты линий 110–220 кВ необходимо применять один из следующих вариантов:

- дифференциально-фазную защиту, работающую с использованием высокочастотного канала связи;
- защиту с высокочастотной блокировкой (направленную высокочастотную фильтровую защиту);
- продольную дифференциальную защиту, работающую с использованием цифрового канала связи.

В качестве резервной защиты используется комплект ступенчатых дистанционных и токовых направленных защит нулевой последовательности.

На линиях напряжением 110–220 кВ с односторонним питанием используются ступенчатые защиты, включающие токовую или дистанционную защиту от многофазных коротких замыканий (КЗ) и токовую защиту от КЗ на землю.

1.2. Дифференциально-фазная высокочастотная защита на базе шкафа ШЭ2607 081

1.2.1. Общая характеристика шкафа ШЭ2607 081

Шкаф ШЭ2607 081 содержит полукомплект дифференциально-фазной высокочастотной защиты (ДФЗ) линии и устройство резервирования отказа выключателя (УРОВ).

ДФЗ используется в качестве основной быстродействующей защиты при всех видах КЗ на воздушных линиях (ВЛ) напряжением 110–220 кВ.

УРОВ предназначено для действия на отключение отказавшего резервируемого выключателя без выдержки времени (действие УРОВ «На себя»), а затем с выдержкой времени на отключение выключателей смежных элементов.

Функции релейной части ДФЗ линии и УРОВ реализованы на базе микропроцессорного терминала типа БЭ2704V081.

Программное обеспечение терминала позволяет, кроме всего, измерять и осциллографировать текущие значения электрических параметров ВЛ, определять расстояние до места повреждения, осуществлять непрерывную проверку функционирования и самодиагностику устройства.

В терминале предусмотрена местная сигнализация о действии защит и устройств, выполненная на светодиодных индикаторах.

Основные технические характеристики шкафов серии ШЭ2607:

- номинальный переменный ток ($I_{\text{НОМ}}$) 1 или 5 А;
- номинальное междуфазное напряжение переменного тока ($U_{\text{НОМ}}$) 100 В;
- напряжение оперативного постоянного тока ($U_{\text{ПИТ}}$) 220 или 100 В;
- время действия на отключение ($t_{\text{СЗ}}$) 0,04 с.

1.2.2. Устройство и работа ДФЗ шкафа ШЭ2607 081

Принцип действия и особенности выполнения защиты

Принцип действия ДФЗ основан на сравнении фаз токов по обоим концам защищаемой линии, получаемых от комбинированных фильтров токов $I_1 + kI_2$. Фаза тока передается по защищаемой линии с одного ее конца на другой посредством токов высокой частоты по каналу, в качестве которого используется защищаемая линия.

Защита одного участка линии электропередачи включает два полуконспекта, расположенных по концам защищаемого участка. Каждый из них содержит шкаф с релейной частью защиты и высокочастотное оборудование.

В состав релейной части входят пусковые и измерительные органы, цепи логики, входные и выходные цепи, а также цепи сигнализации.

Все элементы релейной части защиты могут быть разделены на три основных органа:

- пусковые и измерительные органы защиты;
- орган манипуляции (управления) ВЧ-передатчиком;
- орган сравнения фаз токов по концам защищаемой линии.

Пусковые (ПО) и измерительные (ИО) органы при всех видах повреждений осуществляют пуск ВЧ-передатчика и подготовку действия защиты на отключение. Они реагируют:

- на ток обратной последовательности;
- ток нулевой последовательности;
- приращения векторов тока обратной и прямой последовательности;
- разность фазных токов;
- уменьшение сопротивления.

Орган манипуляции (ОМ) ВЧ-передатчиком обеспечивает работу последнего с интервалами, приблизительно равными половине периода промышленной частоты, т. к. передатчик управляется выходным сигналом комбинированного фильтра токов $I_1 + kI_2$. Поэтому передатчик генерирует токи высокой частоты пакетами, длительность которых примерно равна интервалу между ними.

Приемопередатчик ВЧ-защиты выполняет следующие функции:

- передачу и прием высокочастотных сигналов;
- измерение длительности пауз в выходных токах приемника и передатчика при пуске передатчиков с обоих концов линии, причем приемник ВЧ-поста принимает сигналы как передатчика противоположного конца ВЛ, так и своего ВЧ-передатчика;
- периодический контроль исправности канала связи и наличия запаса по затуханию ВЧ-канала.

Предусмотрена возможность действия устройства автоматической проверки ВЧ-канала (АПК) на вывод ДФЗ из работы или на сигнализацию без вывода ДФЗ из работы.

Орган сравнения фаз токов (ОСФ) определяет, где находится повреждение: на защищаемой линии или вне ее. Определение осуществляется по сдвигу ВЧ-пакетов импульсов, посылаемых передатчиками обоих концов линии, т. е. по углу сдвига фаз между векторами токов $I_1 + kI_2$ по концам линии.

При внешних КЗ этот угол имеет значение порядка 180° , вследствие чего действие защиты на отключение блокируется.

При КЗ на защищаемой линии угол сдвига фаз между векторами токов $I_1 + kI_2$ по концам линии равен или близок нулю. При повреждении в защищаемой зоне передатчики работают одновременно, и посылаемые ими пакеты примерно совпадают по фазе, в результате чего образуются паузы в ВЧ-сигнале. При превышении длительности паузы заданной величины, определяемой углом блокировки, происходит действие защиты на отключение выключателя.

В нормальном режиме работы линии электропередачи все ПО и ИО обоих полукомплектов защит, установленных по концам линии, находятся в несработавшем состоянии, т. к. их уставки отстраиваются от нагрузочного режима с учетом допустимых небалансов. Выходные цепи защит находятся в несработавшем состоянии, и ВЧ-передатчики полукомплектов не запущены.

Пусковые и измерительные органы защиты

Программное обеспечение ДФЗ содержит следующие пусковые и измерительные органы:

- ПО, реагирующий на ток обратной последовательности, с выходами $I_{2.БЛ}$ для пуска ВЧ-сигнала и $I_{2.ОТ}$ для пуска на отключение;
- ПО, реагирующий на ток нулевой последовательности $3I_0$, с выходами $3I_{0.БЛ}$ для пуска ВЧ-сигнала и $3I_{0.ОТ}$ для пуска на отключение. Имеется возможность вывода из действия ПО с выходами $3I_{0.БЛ}$ и $3I_{0.ОТ}$ с помощью программной накладки;

- ПО, реагирующий на абсолютные значения приращений векторов токов обратной и прямой последовательностей, с выходами $DI_{1.БЛ}$ и $DI_{2.БЛ}$ для пуска ВЧ-сигнала и $DI_{1.ОТ}$ и $DI_{2.ОТ}$ для пуска на отключение. ПО с выходами $DI_{БЛ}$ и $DI_{ОТ}$ вводятся на тот случай, когда быстроедействие ПО с выходами $I_{2.БЛ}$ и $I_{2.ОТ}$ окажется недостаточным для работы при трехфазных КЗ, начинающихся как несимметричные на протяжении 5–6 мс;
- ПО, реагирующий на значение разности фазных токов (линейного тока), с выходами $I_{Л.БЛ}$ для пуска ВЧ-сигнала и $I_{Л.ОТ}$ для формирования сигнала на отключение. Наличие ПО $I_{Л.БЛ}$ обеспечивает пуск ВЧ-передатчика на обоих концах ВЛ при внешних симметричных повреждениях, сопровождающихся протеканием больших токов. Благодаря этому обеспечивается правильная работа защиты даже в том случае, когда на одном из концов ВЛ под влиянием тока небаланса в симметричном режиме срабатывает ПО $I_{2.ОТ}$;
- ненаправленные ИО сопротивления с выходами $Z_{ОТ}(AB)$, $Z_{ОТ}(BC)$ и $Z_{ОТ}(CA)$ для разрешения работы защиты при трехфазных КЗ;
- устройство блокировки при неисправности цепей напряжения (БНН);
- реагирующие на снижение фазных напряжений ПО минимального напряжения $U_{\min}(A)$, $U_{\min}(B)$, $U_{\min}(C)$.

В табл. 1.1 приведены диапазоны регулирования уставок ИО $Z_{ОТ}$.

Таблица 1.1

Диапазоны регулирования уставок ИО $Z_{ОТ}$

ИО	Диапазон изменения параметров		
	$R_{УСТ}$ (Ом на фазу)	$X_{УСТ}$ (Ом на фазу)	φ
$Z_{ОТ}(AB)$	0,2–50,0 ($I_{НОМ} = 5$ А), 1,0–250,0 ($I_{НОМ} = 1$ А)	0,2–50,0 ($I_{НОМ} = 5$ А), 1,0–250,0 ($I_{НОМ} = 1$ А)	Вычисляется автоматически
$Z_{ОТ}(BC)$			
$Z_{ОТ}(CA)$			

Характеристика срабатывания ИО $Z_{\text{от}}(AB)$, $Z_{\text{от}}(BC)$, $Z_{\text{от}}(CA)$ изображена на рис. 1.1.

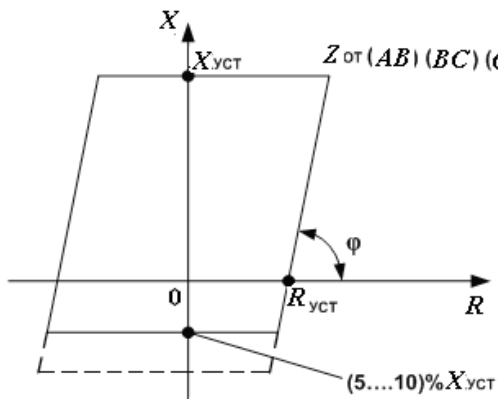


Рис. 1.1. Характеристика срабатывания ИО сопротивления

Диапазоны регулирования уставок ПО защиты показаны в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Диапазоны регулирования уставок пусковых органов защиты

Пусковой орган	Параметр	Диапазон изменения, А
I_2 блокирующий	$I_{2\text{ бл}}$	0,05–0,50 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 1\text{ А}$) 0,25–2,50 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 5\text{ А}$)
I_2 отключающий	$I_{2\text{ от}}$	0,10–1,00 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 1\text{ А}$) 0,50–5,00 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 5\text{ А}$)
$3I_0$ блокирующий	$3I_{0\text{ бл}}$	0,10–1,00 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 1\text{ А}$) 0,50–5,00 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 5\text{ А}$)
$3I_0$ отключающий	$3I_{0\text{ от}}$	0,20–2,00 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 1\text{ А}$) 1,00–10,00 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 5\text{ А}$)
$I_{\text{л}}$ блокирующий	$I_{\text{л бл}}$	0,20–4,00 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 1\text{ А}$) 1,00–20,00 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 5\text{ А}$)
$I_{\text{л}}$ отключающий	$I_{\text{л от}}$	0,40–8,00 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 1\text{ А}$) 2,00–40,00 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 5\text{ А}$)

Окончание табл. 1.2

Пусковой орган	Параметр	Диапазон изменения, А
DI_2 блокирующий	$DI_{2\text{ бл}}$	0,04–1,50 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 1\text{ А}$) 0,20–7,50 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 5\text{ А}$)
DI_2 отключающий	$DI_{2\text{ от}}$	0,06–2,50 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 1\text{ А}$) 0,30–12,50 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 5\text{ А}$)
DI_1 блокирующий	$DI_{1\text{ бл}}$	0,08–3,00 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 1\text{ А}$) 0,40–15,00 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 5\text{ А}$)
DI_1 отключающий	$DI_{1\text{ от}}$	0,12–5,00 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 1\text{ А}$) 0,60–25,00 ($I_{2\text{ ном.тт}} = 5\text{ А}$)

Подключение шкафа ШЭ2607081 к измерительным трансформаторам тока и напряжения защищаемой линии

Схема подключения цепей переменного тока и напряжения шкафа ШЭ2607081 к измерительным трансформаторам тока (ТТ) и трансформаторам напряжения (ТН) защищаемой линии электропередачи приведена на рис. 1.2.

Каждый терминал БЭ2704 имеет 10 аналоговых входов для подключения его к первичным цепям переменного тока и переменного напряжения. Гальваническая развязка внутренних цепей терминала от элементов первичной схемы электрической сети выполнена с помощью промежуточных трансформаторов тока TLA и напряжения TLV .

В схеме терминала при использовании его для выполнения дифференциально-фазной высокочастотной защиты линии электропередачи и УРОВ задействовано 9 аналоговых входов, содержащих четыре промежуточных трансформатора тока $TLA1$ – $TLA4$ и пять промежуточных трансформаторов напряжения $TLV1$ – $TLV5$, которые через испытательные блоки $SG1$ – $SG5$ подключаются к измерительным ТТ и ТН первичной схемы подстанции.

Вторичные обмотки промежуточных трансформаторов тока и промежуточных трансформаторов напряжения связаны

с устройствами защиты, реализующими функции ее пусковых и измерительных органов.

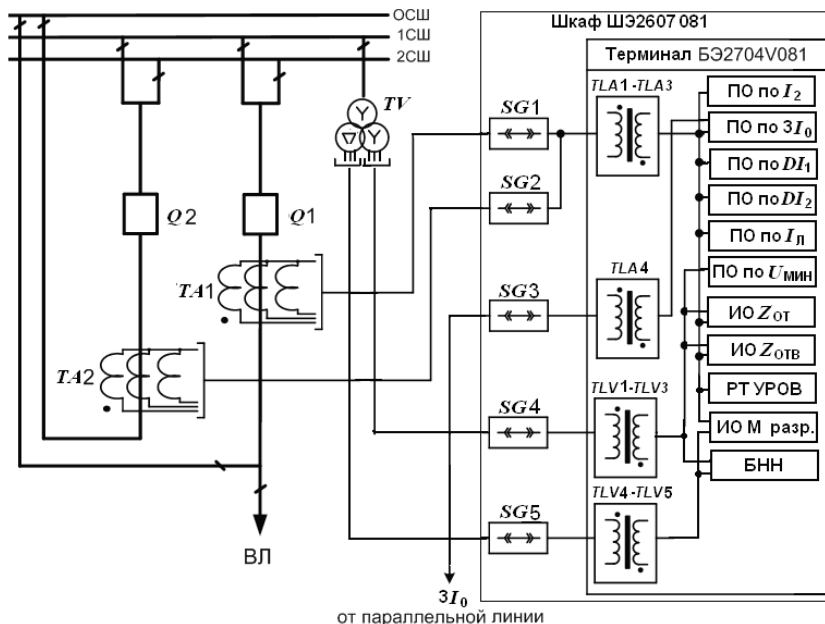
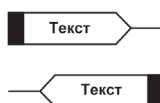


Рис. 1.2. Схема подключения шкафа ШЭ2607 081 к измерительным ТТ и ТН

Функциональная схема логической части ДФЗ шкафа ШЭ2607 081

Условные графические и буквенные обозначения логических элементов и сигналов, используемых в функциональных схемах микропроцессорных защит:



- внешний дискретный входной сигнал (дискретный вход);
- внешний дискретный выходной сигнал (воздействие на выходные реле);



В табл. 1.3 перечислены все программные накладки, используемые в функциональной схеме логической части ДФЗ, и определены их положения.

Таблица 1.3

Назначение программных накладок $XВ$ в схеме ДФЗ

Обозначение	Назначение	Положение	Положение по умолчанию
$XВ1$	Работа на ВЛ с ответвлениями	0 — предусмотрена	Не предусмотрена
		1 — не предусмотрена	
$XВ2$	Работа в сети с тяговой нагрузкой	0 — предусмотрена	Не предусмотрена
		1 — не предусмотрена	
$XВ4$	Трансформатор напряжения	0 — на шинах	На шинах
		1 — на линии	
$XВ7$	Пуск ВЧ-передатчика при выводе защиты	0 — предусмотрена	Не предусмотрена
		1 — не предусмотрена	
$XВ8$	Сигнализация пуска на отключение	0 — предусмотрена	Предусмотрена
		1 — не предусмотрена	
$XВ9$	Блокировка пуска АПК	0 — предусмотрена	Не предусмотрена
		1 — не предусмотрена	
$XВ10$	Пусковой орган I_0	0 — выведен	Выведен
		1 — в работе	

Наименование и назначение элементов задержки, используемых в функциональной схеме логической части ДФЗ, приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Наименование и назначение элементов задержки в схеме ДФЗ

Наименование	Назначение	Уставка t , с
$DT1$	Ввод $Z_{от}$	0,2
$DT2$	Действие блокировки при неисправности цепей напряжения (БНН)	5,0
$DT3$	Задержка сигнала отключения	0,001–0,15
$DT4$	Вывод подхвата от $Z_{от}$	0,2
$DT5$	Задержка запрета пуска ВЧ-передатчика	0,005
$DT6$	Продление запрета пуска ВЧ-передатчика	0,2
$DT7$	Продление запрета АПК	0,6

Окончание табл. 1.4

Наименование	Назначение	Уставка t , с
DT11	Задержка сигнала на выходе ОСФ	0,04
DT12	Продление запрета сигнала отключения	0,05
DT13	Продление сигнала отключения	0,025
DT14	Продление сигнала пуска ВЧ-передатчика	0,6
DT15	Задержка сигнала «Вызов»	5,0
DT19	Задержка сигнализации запрета ВЧ-передатчика	5,0
DT20	Продление сигнала отключения ДФЗ	0,025
DT23	Задержка сигнала отключения для ВЛ без ответвлений	0,01
DT24	Задержка сигнала отключения для ВЛ без ответвлений	0,02

Упрощенная функциональная схема логической части дифференциально-фазной высокочастотной защиты линии показана на рис. 1.3 и 1.4.

Действие защиты при неисправности цепей напряжения

Для исключения ложного срабатывания защиты (рис. 1.3) предусмотрена блокировка при неисправностях цепей напряжения (БНН), действующая с выдержкой времени 5 с на сигнал и на запрет работы защиты от ИО сопротивления $Z_{OT}(AB)$, $Z_{OT}(BC)$, $Z_{OT}(CA)$ (при работе на линии без ответвлений) и ИО сопротивления $Z_{OTB}(AB)$, $Z_{OTB}(BC)$, $Z_{OTB}(CA)$, ИО направления мощности M_0 (при работе на линии с ответвлением) через логический элемент ИЛИ (57) и элемент задержки DT2 «Действие БНН» (58) на логические элементы Запрет (79) и (98).

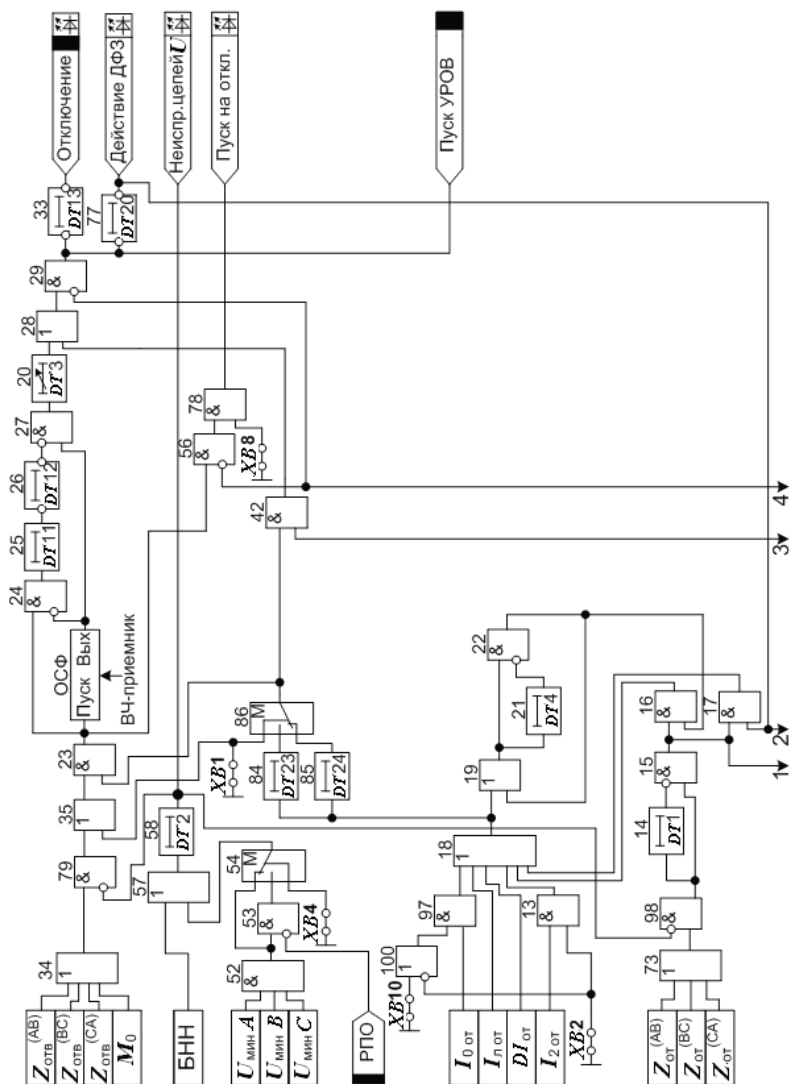


Рис. 1.3. Упрощенная функциональная схема логической части ДФЗ терминала БЭ2704V081

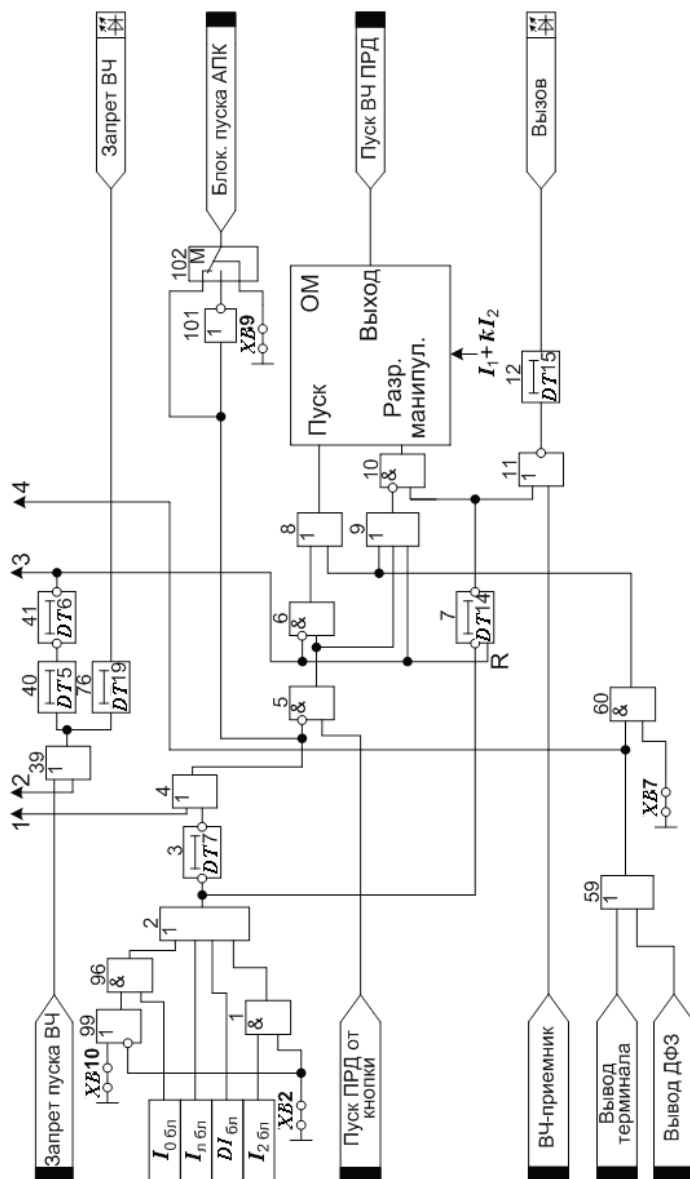


Рис. 1.4. Упрощенная функциональная схема логической части ДФЗ терминала БЭ2704V081

Действия защиты при коротких замыканиях в сети

Несимметричные повреждения вне защищаемой зоны. Пуск каждого из полукомплектов защиты при несимметричном КЗ (см. рис. 1.4) может осуществляться ПО, реагирующими на симметричные составляющие тока обратной и (или) нулевой последовательностей, а также на линейные токи. Сигналы о работе ПО $I_{2\text{ БЛ}}$, $I_{0\text{ БЛ}}$, $DI_{\text{БЛ}}$, $I_{\text{Л БЛ}}$ через логические элементы И (1), И (96) и ИЛИ (2), элемент задержки на возврат $DT14$ «Продление сигнала пуска ВЧ» (7) и элемент Запрет (10) подаются на вход разрешения манипулированного сигнала («Разр. манипул.») органа манипуляции, который действует на пуск ВЧ-передатчика. Сигнал пуска передатчика запоминается элементом времени $DT14$ (7) на время 0,6 с, что необходимо для обеспечения селективности защиты при внешнем симметричном КЗ. При этом блокируются пуск АПК и неманипулированный пуск ВЧ-передатчика от дискретного сигнала «Пуск ПРД от кнопки» через элемент задержки на возврат $DT7$ «Продление запрета АПК» (3), элементы ИЛИ (4) и Запрет (5).

Выходной сигнал ОМ «Выход» управляет пуском ВЧ-передатчика в соответствии с фазой выходного сигнала комбинированного фильтра токов $I_1 + kI_2$. ВЧ-передатчик каждого полукомплекта защиты генерирует в ВЧ-канал высокочастотные пакеты импульсов, длительность которых приблизительно равна половине периода промышленной частоты.

При повреждениях вне защищаемой зоны токи на входах ОМ обоих полукомплектов находятся в противофазе и ВЧ-пакеты от разных передатчиков следуют друг за другом, образуя непрерывный ВЧ-сигнал. На входе каждого из приемников обоих полукомплектов присутствует ВЧ-сигнал, а на выходе каждого из приемников — логический сигнал 0, который подается на разрешающий вход органа сравнения фаз, что препятствует прохождению сигнала в цепь отключения.

Подготовка цепи отключения производится ПО $I_{2\text{от}}$, $I_{0\text{от}}$, $DI_{\text{от}}$, $I_{\text{лот}}$ через логические элементы И (13), И (97) и ИЛИ (18).

Учитывая влияние погрешности трансформаторов тока (ТТ), а также неидентичность настройки ОМ обоих полуккомплектов, при внешних КЗ в сигнале на выходе приемника могут появиться паузы. Для исключения в этом случае излишних срабатываний в ОСФ задается угол блокировки защиты, регулируемый в пределах $\pm(40...65)^\circ$.

Для исключения излишнего срабатывания защиты в первый момент внешнего КЗ предусмотрена нерегулируемая задержка сигнала на элементе $DT23$ (84) в режиме работы ВЛ без ответвлений и на элементе $DT24$ (85) в режиме работы ВЛ с ответвлениями, выходы которых через мультиплексор М (86) и логический элемент И (23) подключены ко входу «Пуск» разрешения работы ОСФ. Кроме того, в канале отключения имеется регулируемая задержка на элементе $DT3$ «Задержка сигнала отключения» (20) с временем срабатывания 0,001–0,15 с.

Симметричные повреждения вне защищаемой зоны. В связи с отсутствием при симметричных КЗ составляющих обратной последовательности пуск ВЧ-передатчика обеспечивается путем фиксации предшествующего несимметричного режима за счет кратковременного срабатывания ПО $I_{2\text{БЛ}}$ или $DI_{\text{БЛ}}$ по схеме И (1) и ИЛИ (2). Сигнал пуска передатчика запоминается с помощью элемента времени $DT14$ (7) с задержкой на возврат на время 0,6 с.

Цепи отключения защиты подготавливаются сигналами (см. рис. 1.3):

- кратковременного срабатывания ПО $DI_{\text{от}}$ через логический элемент ИЛИ (18) или ПО $I_{2\text{от}}$ через логические элементы И (13) и ИЛИ (18);
- срабатывания ИО $Z_{\text{от}}$ через логические элементы ИЛИ (73), Запрет (98), элемент задержки $DT1$ «Ввод $Z_{\text{от}}$ » (14), логические элементы Запрет (15), И (16), ИЛИ (18). При этом на логическом элементе Запрет (98)

блокируется действие защиты на отключение при неисправностях цепей напряжения.

Фиксация кратковременного срабатывания ПО, действующих на отключение, осуществляется цепью обратной связи с выхода элемента Запрет (22) на второй вход элемента ИЛИ (19) на время 0,2 с, определяемое элементом времени $DT4$ «Вывод подхвата от Z_{OT} » (21), и контролируется ИО Z_{OT} через логический элемент И (16).

Вывод канала отключения при трехфазном КЗ через 0,2 с после его возникновения производится на элементе $DT4$ (21) до того, как хотя бы на одном конце останавливается пуск ВЧ-передатчика. Это обеспечивает селективность защиты при внешних симметричных повреждениях и одновременной остановке работы приемопередатчиков после их отключения.

Рассматриваемая схема подготовки канала отключения при трехфазных КЗ построена так, что не происходит его повторного пуска в момент отключения внешнего трехфазного КЗ, когда могут кратковременно появиться составляющие обратной последовательности. Указанное достигается тем, что через время 0,2 с, определяемое элементом времени $DT1$ (14), запрещается прохождение сигнала через элемент Запрет (15) по цепи отключения защиты от любого ИО $Z_{OT}(AB)$, $Z_{OT}(BC)$, $Z_{OT}(CA)$.

При токах, достаточных для действия ПО $I_{Л.БЛ}$ и $I_{Л.ОТ}$, пуск защиты при симметричных внешних КЗ происходит также от этих ПО аналогично внешнему несимметричному КЗ. Наличие ПО $I_{Л.БЛ}$ обеспечивает пуск ВЧ-передатчика на обоих концах ВЛ при внешних симметричных повреждениях, сопровождающихся протеканием больших токов. Благодаря этому обеспечивается правильная работа защиты даже в том случае, когда на одном из концов ВЛ под влиянием тока небаланса в симметричном режиме срабатывает ПО $I_{2\text{ ОТ}}$.

Повреждение на защищаемой линии. Пуск защиты при симметричных и несимметричных КЗ на защищаемой ВЛ происходит так же, как и в рассмотренных выше случаях КЗ вне за-

щищаемой зоны. После отсчета выдержки времени элемента $DT23$ (84) в канале отключения, благодаря наличию пауз в сигнале приема токов ВЧ, срабатывает ОСФ (на выходе появляется логическая 1), и защита через логический элемент Запрет (27), выдержку времени $DT3$ (20), логические элементы ИЛИ (28), Запрет (29) и элемент задержки на возврат $DT13$ «Продление сигнала отключения» (33) действует на отключение выключателя и сигнализацию о срабатывании, а также на пуск УРОВ. Элемент времени $DT13$ (33) обеспечивает наличие непрерывного сигнала в канале отключения на время равное 0,025 с.

При срабатывании защиты на отключение (или при появлении сигнала от внешнего дискретного входа «Запрет пуска ВЧ», например, при работе ДЗШ, резервных защит или УРОВ) производится запрет пуска ВЧ-передатчика по цепи: выход элемента И (29), элемент задержки на возврат $DT20$ «Продление сигнала отключения ДФЗ» (77), элемент ИЛИ (39), элемент задержки на срабатывание $DT5$ «Задержка запрета пуска ВЧ» (40) и элемент задержки на возврат $DT6$ «Продление запрета пуска ВЧ» (41), запрещающий вход элемента Запрет (6) и через элемент ИЛИ (9) на запрещающий вход элемента Запрет (10). Кроме того, при этом производится сброс временной памяти элемента времени $DT14$ (7) (вход R) в канале блокировки, а также при длительном запрете пуска ВЧ через элемент задержки $DT19$ «Сигнализация запрета ВЧ» (76) срабатывает сигнализация «Запрет ВЧ». Все это необходимо сделать к моменту отключения выключателя на ближнем конце ВЛ, если на дальнем конце выключатель более медленный. Кроме того, шунтируется ОСФ на элементе И (42) с выхода элемента времени $DT23$ (84) на вход элемента ИЛИ (28).

При срабатывании защиты предусмотрен подхват ее пуска при симметричном КЗ от ИО $Z_{от}(AB)$, $Z_{от}(BC)$, $Z_{от}(CA)$ на элементе И (17).

1.2.3. Расчет параметров дифференциально-фазной защиты ЛЭП

Методика расчета параметров дифференциально-фазной защиты

Расчет параметров дифференциально-фазной защиты линии включает расчет:

- уставок и определение коэффициента чувствительности токового ПО с пуском от линейного тока I_L ;
- уставок и определение коэффициента чувствительности токового ПО с пуском по току обратной последовательности I_2 ;
- уставок токового ПО с пуском по приращению DI_2 ;
- уставок токового ПО с пуском по приращению DI_1 ;
- уставок органа манипуляции и коэффициента комбинированного фильтра токов;
- уставок органа сравнения фаз;
- уставок ИО сопротивления $Z_{от}$;
- уставок токового органа с пуском по току нулевой последовательности I_0 .

Для расчета уставок используются следующие виды КЗ:

- однофазное КЗ ($K^{(1)}$);
- двухфазное КЗ на землю ($K^{(1,1)}$);
- двухфазное КЗ ($K^{(2)}$);
- трехфазное КЗ ($K^{(3)}$);
- однофазное КЗ ($K^{(1)}$) через сопротивление $R = 15$ Ом.

(Тип защиты (шкаф) — дифференциально-фазная защита (ШЭ2607 081); место КЗ — конец линии.)

Расчет уставок ДФЗ выполняется согласно методическим указаниям по выбору параметров срабатывания дифференциально-фазной и высокочастотной микропроцессорных защит сетей 220 кВ и выше, устройств АПВ сетей 330 кВ и выше производства ООО НПП «ЭКРА» [2].

Расчет уставок токовых органов с пуском от линейного тока $I_{\text{л}}$

Расчет уставки токового органа с пуском от линейного тока $I_{\text{л.БЛ}}$, действующего на блокировку защиты (на пуск ВЧ-передатчика)

Для обеспечения пуска передатчика при внешних симметричных КЗ уставка $I_{\text{л.БЛ.УСТ}}$ выбирается по условию отстройки от максимального рабочего тока $I_{\text{РАБ.МАКС}}$ защищаемой линии.

Если при выборе уставок токовых ПО какого-либо полуккомплекта защиты они не пройдут по чувствительности, то необходимо при выборе уставок всех ПО заменить $I_{\text{РАБ.МАКС}}$ на ток нагрузки нормального режима $I_{\text{НАГР.НОРМ}}$.

$$I_{\text{л.БЛ.УСТ}} = k_{\text{ОТС}} \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\text{РАБ.МАКС}} \text{ (или } I_{\text{НАГР.НОРМ}} \text{)}, \quad (1.1)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{ОТС}} = 1,3$; $I_{\text{РАБ.МАКС}}$ — максимальный рабочий ток, выбирается наибольший из двух концов линии; $I_{\text{НАГР}}$ — ток нагрузки (длительно возможный рабочий ток, при котором не происходит запуск передатчика).

Расчет уставки токового органа с пуском от линейного тока $I_{\text{л.ОТ}}$, действующего на отключение

Уставка $I_{\text{л.ОТ.УСТ}}$ выбирается по отстройке от $I_{\text{л.БЛ.УСТ}}$ с учетом коэффициента согласования и коэффициента ответвления

$$I_{\text{л.ОТ.УСТ}} = k_{\text{С}} k_{\text{ОТВ}} I_{\text{л.БЛ.УСТ}}, \quad (1.2)$$

где $k_{\text{С}}$ — коэффициент согласования, $k_{\text{С}} = 1,3$; $k_{\text{ОТВ}}$ — коэффициент ответвления (при отсутствии ответвления принимается равным 1, при наличии ответвления необходим расчет $k_{\text{ОТВ}}$ в соответствии с рекомендациями [2]); $I_{\text{л.БЛ.УСТ}}$ — уставка блокирующего токового органа с пуском от линейного тока, действующего на пуск ВЧ-передатчика.

Расчет уставок токовых органов с пуском по току обратной последовательности I_2

Расчет уставки токового органа с пуском по току обратной последовательности $I_{2\text{ бл.}}$, действующего на блокировку защиты (на пуск ВЧ-передатчика)

Уставка токового органа с пуском по току обратной последовательности $I_{2\text{ бл. уст}}$ выбирается исходя из отстройки от тока небаланса, определяемого по погрешностям ТТ, частотным небалансам фильтров обратной последовательности и погрешностям их настройки, а также небалансам нагрузочного режима сети.

$$I_{2\text{ бл. уст}} = k_{\text{отс}} I_{2\text{ нб. расч}} / k_{\text{в}}, \quad (1.3)$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, принимается $k_{\text{отс}} = 1,3$; $I_{2\text{ нб. расч}}$ — расчетный ток небаланса обратной последовательности, определяется по выражению

$$I_{2\text{ нб. расч}} = (I_{\text{л. бл. уст}} / \sqrt{3}) \cdot \sqrt{[(\varepsilon_1 / 3)^2 + (k_F \cdot Df)^2 + (D\Phi)^2 (k_{2\text{ несим}})^2]} = (1.4) \\ = (I_{\text{л. бл. уст}} / \sqrt{3}) \cdot 0,024.$$

Здесь $I_{\text{л. бл. уст}}$ — уставка блокирующего токового органа с пуском по $I_{\text{л}}$; ε_1 — полная погрешность ТТ, принимается $\varepsilon_1 = 0,03$ согласно методическим указаниям [2]; k_F — коэффициент частотной зависимости фильтра токов обратной последовательности (ФТОП) по данным разработчика, $k_F = 0,23$ [2]; Df — относительная погрешность отклонения частоты, $Df = 0,04$; $D\Phi$ — относительная погрешность настройки фильтра с учетом погрешности датчиков тока, $D\Phi = 0,005$; $k_{2\text{ несим}}$ — коэффициент несимметрии тока обратной последовательности, принимается $k_{2\text{ несим}} = 0,02$ согласно методическим указаниям [2]; $k_{\text{в}}$ — коэффициент возврата, принимается $k_{\text{в}} = 0,9$.

Для двух полуккомплектов принимается одинаковая уставка.

Расчет уставки токового органа с пуском по току обратной последовательности $I_{2\text{от}}$, действующего на отключение

На линиях с ответвлениями не надо отстраивать $I_{2\text{от.уст}}$ от КЗ за трансформатором ответвления, т. к. в защите есть специальный орган $Z_{\text{отв}}$, отстроенный от КЗ за трансформатором. Характеристика $Z_{\text{отв}}$ в комплексной плоскости сопротивлений проходит через начало координат, поэтому $I_{2\text{от.уст}}$ не надо отстраивать от внешнего КЗ на питающей стороне при одностороннем питании и подпитке от двигателей нагрузки.

Уставка $I_{2\text{от.уст}}$ выбирается исходя из следующих критериев:

- отстройки от $I_{2\text{бл.уст}}$ того конца линии, с которым согласовывается данный комплект, с учетом коэффициента отвлечения

$$I_{2\text{от.уст}} = k_{\text{с}} k_{\text{отв}} I_{2\text{бл.уст}}, \quad (1.5)$$

где $k_{\text{с}}$ — коэффициент согласования, $k_{\text{с}} = 1,5 \dots 2$; $k_{\text{отв}}$ — коэффициент отвлечения (при отсутствии отвлечения принимается равным 1, при наличии отвлечения необходим расчет $k_{\text{отв}}$ в соответствии с методическими указаниями [2]); $I_{2\text{бл.уст}}$ — уставка блокирующего токового органа с пуском по I_2 . При выборе коэффициента согласования $k_{\text{с}} = 2$ автоматически будет отстроен $I_{2\text{от}}$ от тока небаланса обратной последовательности, возникающего в режиме внешнего трехфазного КЗ при токе, обеспечивающем срабатывание $I_{\text{л.бл}}$ с обоих концов линии;

- отстройки от составляющей обратной последовательности емкостного тока линии, обусловленной кратковременной несимметрией при включении линии под напряжение

$$I_{2\text{от.емк.уст}} = k_{\text{отс}} k_{\text{отв}} I_{2\text{емк.уд}} L, \quad (1.6)$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{отс}} = 2,0$; $k_{\text{отв}}$ — коэффициент отвлечения (при отсутствии отвлечения принимается равным 1, при наличии отвлечения необходим расчет $k_{\text{отв}}$ в со-

ответствии с методическими указаниями [2]); $I_{2\text{ емк.уд}}$ — емкостный ток обратной последовательности на 1 км линии (определяется по табл. 1.5); L — длина линии, км.

Таблица 1.5

Емкостный ток $I_{2\text{ емк.уд}}$ при включении линии 220–330 кВ под напряжение

Число фаз, включаемых под напряжение	Удельные емкостные токи, А/км	
	для линий 220 кВ	для линий 330 кВ
Одна	0,10	0,22
Две	0,13	0,26

Окончательная уставка $I_{2\text{ от. уст}}$ выбирается наибольшей из выражений (1.5) и (1.6).

Определение коэффициента чувствительности токового отключающего органа $I_{2\text{ от}}$

Рассчитывается коэффициент чувствительности для каждого полуккомплекта защиты.

Для двухконцевых линий и линии с ответвлениями без источника питания

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2\text{ КЗ. мин}}}{I_{2\text{ от. уст}}}, \quad (1.7)$$

где $I_{2\text{ КЗ. мин}}$ — минимальный ток КЗ обратной последовательности; $I_{2\text{ от. уст}}$ — уставка отключающего токового органа с учетом по I_2 .

Если $k_{\text{ч}} > 2$, то необходимо увеличить уставку до $k_{\text{ч}} = 2$ для полуккомплекта с наименьшим коэффициентом чувствительности. В результате этого получается новая уставка $I_{2\text{ от. уст}}$, одинаковая для двух концов линии. По ней необходимо уточнить $I_{2\text{ бл. уст}} = 0,5 I_{2\text{ от. уст}}$.

Для многоконцевых линий можно не увеличивать уставку $I_{2\text{ от. уст}}$.

Для определения коэффициента чувствительности используются виды КЗ, указанные в табл. 1.5. Коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}$ определяется при минимальном режиме системы с того конца линии, где установлена защита, и при максимальных режимах на остальных концах.

Расчет уставок токовых органов с пуском по приращению DI_2

Расчет уставки токового органа с пуском по приращению $DI_{2\text{ бл.}}$, действующего на блокировку (на пуск ВЧ-передатчика)

Пусковые органы DI_2 реагируют на приращение вектора тока обратной последовательности. Эти пусковые органы позволяют быстрее пускать ВЧ-передатчик при трехфазных КЗ. Алгоритм этих органов обеспечивает отстройку от тока небаланса обратной последовательности при максимальном токе качаний, от изменения тока при тяговой нагрузке и всех небалансов максимального рабочего режима, связанных с погрешностями ТТ и фильтров обратной последовательности.

Согласно методическим указаниям [2] расчет $DI_{2\text{ бл. уст}}$ следует производить по выражению

$$DI_{2\text{ бл. уст}} = k_{\text{отс}} I_{2\text{ бл. уст}}, \quad (1.8)$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, принимается равным 0,7; $I_{2\text{ бл. уст}}$ — уставка блокирующего токового органа с пуском по I_2 .

Расчет уставки токового органа с пуском по приращению $DI_{2\text{ от.}}$, действующего на отключение

Уставка $DI_{2\text{ от. уст}}$ выбирается исходя из отстройки от уставки блокирующего токового органа с пуском по приращению $DI_{2\text{ бл.}}$.

$$DI_{2\text{ от. уст}} = k_{\text{с}} DI_{2\text{ бл. уст}}, \quad (1.9)$$

где k_C — коэффициент согласования, принимается равным 2; $DI_{2 \text{ бл. уст}}$ — уставка блокирующего токового органа с пуском по DI_2 .

Коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}$ согласно [2] не проверяется.

Расчет уставок токовых органов с пуском по приращению DI_1

Расчет уставки токового органа с пуском по приращению $DI_{1 \text{ бл}}$, действующего на блокировку (на пуск ВЧ-передатчика)

Пусковые органы DI_1 реагируют на приращение вектора тока прямой последовательности. Эти пусковые органы позволяют быстрее пускать ВЧ-передатчик при трехфазных КЗ. Их алгоритм обеспечивает отстройку от тока небаланса прямой последовательности при максимальном токе качаний, от изменения тока при тяговой нагрузке и всех небалансов максимального рабочего режима, связанных с погрешностями ТТ и фильтра.

По данным разработчика необходимо выбирать уставки DI_1 в 4 раза больше, чем DI_2 .

Согласно методическим указаниям [2] расчет $DI_{1 \text{ бл. уст}}$ следует производить по выражению

$$DI_{1 \text{ бл. уст}} = k_{\text{отс}} DI_{2 \text{ бл. уст}}, \quad (1.10)$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, принимается равным 4; $DI_{2 \text{ бл. уст}}$ — уставка блокирующего токового органа с пуском по DI_2 .

Расчет уставки токового органа с пуском по приращению $DI_{1 \text{ от}}$, действующего на отключение

Согласно методическим указаниям [2] расчет $DI_{1 \text{ от. уст}}$ следует производить по выражению

$$DI_{1\text{ ОТ.УСТ}} = k_C DI_{1\text{ БЛ.УСТ}}, \quad (1.11)$$

где k_C — коэффициент согласования, принимается равным 2; $DI_{1\text{ БЛ.УСТ}}$ — уставка блокирующего токового органа с пуском по DI_1 .

Определение коэффициента комбинированного фильтра токов k и коэффициентов чувствительности органа манипуляции

Определение коэффициента комбинированного фильтра токов k

Коэффициент комбинированного фильтра токов k определяется исходя из необходимой чувствительности при несимметричных КЗ в минимальном (для токов КЗ), режиме работы линии с обеспечением предпочтительного сравнения векторов токов kI_2 с учетом тока нагрузки. Чем больше k , тем меньше влияние токов нагрузки в режиме, предшествующем КЗ. Однако следует учитывать, что при больших значениях этого коэффициента возрастает влияние тока небаланса ТТ при внешних симметричных КЗ на правильность измерения фазы первичного тока.

При расчете токов КЗ без учета тока нагрузки коэффициент k определяется по выражению

$$k \geq \max \left[\left(1,5 \frac{I_1^{(1,1)} + I_{\text{НАГР}}}{I_2^{(1,1)}} \right) \text{ или } \left(1,5 \frac{I_{\text{НАГР}}}{I_2^{(1)}} \right) \right], \quad (1.12)$$

где $I_1^{(1,1)}$ — ток прямой последовательности двухфазного КЗ на землю; $I_{\text{НАГР}}$ — ток нагрузки; $I_2^{(1,1)}$ — ток обратной последовательности двухфазного КЗ на землю; $I_2^{(1)}$ — ток обратной последовательности однофазного КЗ.

Если коэффициент k получился больше 10, нужно произвести расчет токов КЗ с учетом токов нагрузки, как указано ниже.

При расчете токов КЗ с учетом тока нагрузки, коэффициент k определяется по выражению

$$k \geq \max \left[\left(1, 5 \frac{I_1^{(1,1)}}{I_2^{(1,1)}} \right) \text{ или } \left(1, 5 \frac{I_1^{(1)}}{I_2^{(1)}} \right) \right],$$

где $I_1^{(1,1)}$ — ток прямой последовательности при двухфазном КЗ на землю; $I_2^{(1,1)}$ — ток обратной последовательности при двухфазном КЗ на землю; $I_1^{(1)}$ — ток прямой последовательности при однофазном КЗ; $I_2^{(1)}$ — ток обратной последовательности при однофазном КЗ.

Если k получается меньше или равным 6, то k приравнивают к 6. Если k получается больше 6, но меньше или равным 8, то k приравнивают к 8. Если k получается больше 8, но меньше или равным 10, то k приравнивают к 10.

Окончательно коэффициент комбинированного фильтра токов k выбирается наибольшим из рассчитанных для двух или более комплектов и обязательно одинаковым для всех концов ВЛ.

Определение коэффициента чувствительности органа манипуляции при несимметричных КЗ

Поскольку пуск органа манипуляции происходит при токе равном $I_{2 \text{ БЛ. УСТ}}$, то коэффициент чувствительности манипуляции при несимметричных КЗ необходимо рассчитывать по выражению

$$k_{\text{Ч.МАН.НЕСИМ}} = \frac{\left[\min \left(\left(I_2^{(1,1)} - \left(\frac{I_1^{(1,1)}}{k} \right) \right) \text{ или } \left(I_2^{(1)} - \frac{I_{\text{РАБ.МАКС}}}{k} \right) \right) \right]}{I_{2 \text{ БЛ. УСТ}}}, \quad (1.13)$$

где $I_2^{(1,1)}$ — ток обратной последовательности при двухфазном КЗ на землю; $I_1^{(1,1)}$ — ток прямой последовательности при двухфазном КЗ на землю; k — коэффициент комбинированного фильтра токов, равный 6; $I_2^{(1)}$ — ток обратной последовательности при однофазном КЗ; $I_{\text{РАБ. МАКС}}$ — максимальный рабочий ток; $I_{2 \text{ БЛ. УСТ}}$ — уставка блокирующего токового органа с пуском

по I_2 . Знак минуса означает, что соответствующие векторы находятся в противофазе.

Коэффициент чувствительности манипуляции при несимметричных КЗ $k_{\text{ч.МАН.НЕСИМ}}$ должен быть больше 1,3.

Расчет необходимо производить для обоих полукomплектов защиты.

Определение коэффициента чувствительности манипуляции при симметричных КЗ

По данным разработчика, разрешение на манипуляцию происходит при токе равном $I_{2\text{ БЛ.УСТ}}$, поэтому коэффициент чувствительности необходимо определять по выражению

$$k_{\text{ч.МАН.СИМ}} = \frac{\min(I_1^{(3)})}{kI_{2\text{ БЛ.УСТ}}}, \quad (1.14)$$

где $I_1^{(3)}$ — ток прямой последовательности трехфазного КЗ; k — коэффициент комбинированного фильтра токов; $I_{2\text{ БЛ.УСТ}}$ — уставка блокирующего токового органа с пуском по I_2 .

Коэффициент чувствительности манипуляции при симметричных КЗ $k_{\text{ч.МАН.СИМ}}$ должен быть больше 1,3.

Расчет необходимо производить для обоих полукomплектов защиты.

Расчет уставок органа сравнения фаз φ

Уставка угла блокировки защиты $\varphi_{\text{БЛ}}$ определяется исходя из условия селективной работы при внешнем КЗ с максимальным углом между векторами напряжений на выходе органов манипуляции по концам линии. Этот угол в основном зависит от погрешностей ТТ (в особенности, если они по концам линии разнотипные), от длины линии, а также разнотипности защит,

устанавливаемых по концам линии, (например, микропроцессорная и электромеханическая).

Зависимость угла блокировки от длины линии приведена ниже.

Длина линии, км	Угол блокировки защиты $\varphi_{\text{БЛ}}$, °
Больше или равна 150	65
От 60–150	60
Меньше 60	50

Если устанавливаются разнотипные защиты по концам линии, то угол блокировки защиты принимается $\varphi_{\text{БЛ}} = 65^\circ$.

Расчет уставок измерительного органа сопротивления $Z_{\text{от}}$

Уставка по реактивной составляющей ИО сопротивления $X_{\text{от.уст}}$ определяется исходя из надежного охвата зоной действия ИО всей длины защищаемой линии.

Если длина линии $L \geq 150$ км, то

$$X_{\text{от.уст}} = 1,5X_{\text{луд}}L,$$

где $X_{\text{луд}}$ — реактивное удельное сопротивление ВЛ прямой последовательности; L — длина ВЛ.

Если длина линии $L < 150$ км, то

$$X_{\text{от.уст}} = 2X_{\text{луд}}L. \quad (1.15)$$

Уставка по активной составляющей ИО сопротивления $R_{\text{откл.уст}}$ определяется в соответствии с величиной расчетного активного сопротивления в месте повреждения при междуфазных КЗ. При выбранной величине $R_{\text{откл.уст}}$ необходимо произвести проверку отстройки ее от максимального нагрузочно-го режима по формулам:

$$Z_{\text{НАГР}} = \frac{U_{\text{МИН}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{НАГР.МАКС}}}, \quad (1.16)$$

$$R_{\text{УСТ}} \leq k_{\text{ОТС}} (Z_{\text{НАГР}} \cos \varphi_{\text{НАГР}}), \quad (1.17)$$

где $U_{\text{МИН}}$ — минимальное значение напряжения в нагрузочном режиме, равное $(0,8 \dots 0,9)U_{\text{НОМ}}$; $I_{\text{НАГР.МАКС}}$ — максимальное значение тока нагрузки; $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, принимаемый равным 0,9; $\varphi_{\text{НАГР}}$ — максимальное значение угла нагрузки.

Угол наклона характеристики ИО сопротивления $Z_{\text{ОТ}}$ к оси R

$$\varphi_R = \arctg \left(\frac{X_{1\text{УД}}}{R_{1\text{УД}}} \right), \quad (1.18)$$

где $X_{1\text{УД}}$ ($R_{1\text{УД}}$) — удельное реактивное (активное) сопротивление линии прямой последовательности.

Угол наклона характеристики ИО сопротивления $Z_{\text{ОТ}}$ к оси X $\varphi_X = 90^\circ - \varphi_R$.

Расчет уставок токовых органов с пуском по току нулевой последовательности I_0 , действующих на блокировку и отключение

Орган манипуляции ВЧ-передатчиком управляется сигналом с выхода комбинированного фильтра токов $I_1 + kI_2$, обеспечивая тем самым в защите преимущественное сравнение фаз токов обратной последовательности. Нулевая последовательность из сигнала манипуляции исключена. В связи с этим по рекомендациям завода-изготовителя пусковые органы, реагирующие на ток нулевой последовательности $3I_0$, желательно не использовать. В этом случае устанавливается режим «ДФЗ/Логика работы/ПО I_0 /Выведен».

При использовании ПО с пуском по $3I_0$ уставка порога срабатывания для $3I_{0\text{БД}}$ должна быть отстроена от токов небалан-

са нормального режима с коэффициентом отстройки аналогично выражению (1.3).

Уставки срабатывания всех ПО и ИО ДФЗ, используемые для настройки терминала защиты на расчетные параметры срабатывания, задаются их вторичными значениями, которые определяются:

- для ПО тока по выражению

$$I_{\text{уст.вт}} = \frac{I_{\text{уст}}}{K_{\text{тТ}}}; \quad (1.19)$$

- для ИО сопротивления по выражению

$$R_{\text{уст.вт}}(X_{\text{уст.вт}}) = \frac{R_{\text{уст}}(X_{\text{уст}})K_{\text{тТ}}}{K_{\text{тН}}}, \quad (1.20)$$

где $K_{\text{тТ}}$ и $K_{\text{тН}}$ — коэффициенты трансформации измерительных ТТ и ТН.

Пример расчета параметров дифференциально-фазной высокочастотной защиты ВЛ

Схема электрической сети напряжением 110 и 220 кВ, для элементов которой в данном учебном пособии производится расчет микропроцессорных защит, показана на рис. 1.5.

Параметры элементов схемы приведены в табл. 1.6—1.8.

Таблица 1.6

Параметры электрических систем

Номер системы, класс напряжения, кВ	Сопротивление системы $X_{\text{с}}$, Ом			
	Прямая последовательность		Нулевая последовательность	
	Максимальный режим	Минимальный режим	Максимальный режим	Минимальный режим
С1—220	8,2	10,6	5,6	8,4
С2—220	10,2	15,3	14,8	22,2
С3—110	7,4	11,0	10,6	15,9

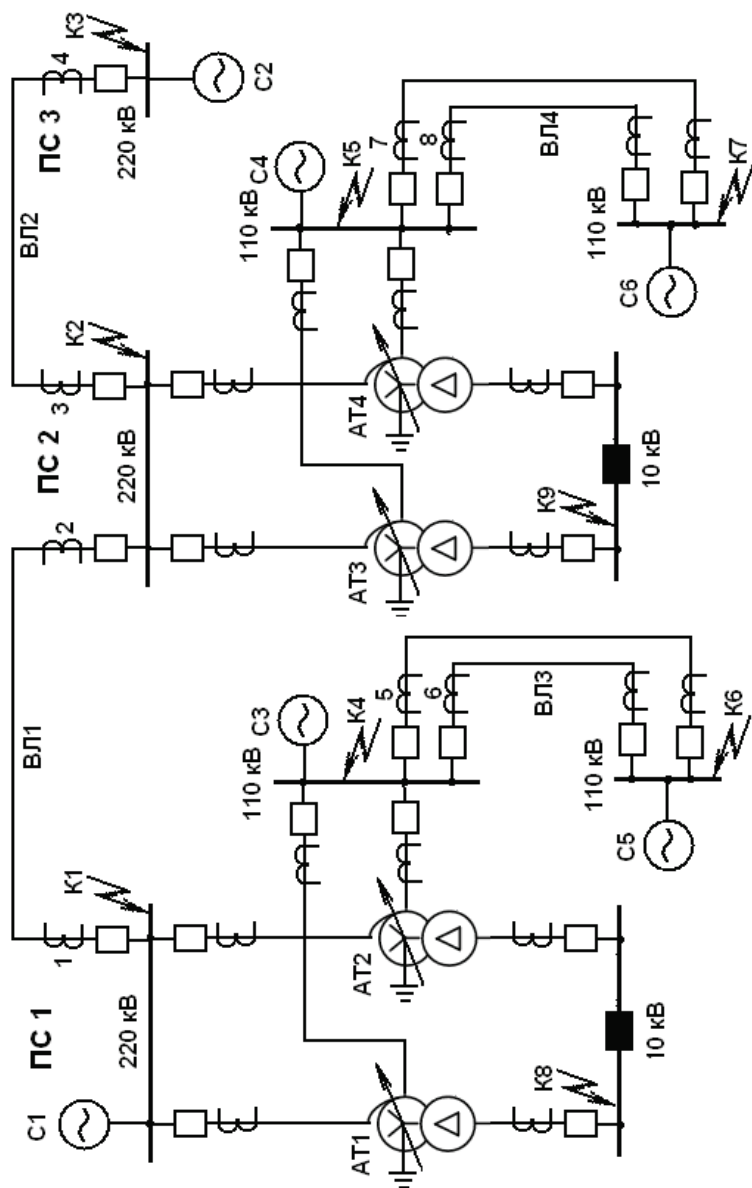


Рис. 1.5. Схема электрической сети напряжением 110 и 220 кВ

Окончание табл. 1.6

Номер системы, класс напряжения, кВ	Сопротивление системы X_C , Ом			
	Прямая последовательность		Нулевая последовательность	
	Максимальный режим	Минимальный режим	Максимальный режим	Минимальный режим
C4—110	6,1	9,1	9,5	14,2
C5—110	19,0	28,5	41,6	41,3
C6—110	20,0	30,0	32,6	48,9

Таблица 1.7

Параметры линий электропередачи

Номер линии, класс напряжения, кВ	Длина L , км	Марка провода	Сопротивления линий, Ом	
			Прямая последовательность $Z_1 = R_1 + jX_1$	Нулевая последовательность $Z_0 = R_0 + jX_0$
ВЛ1—220	102	АС-300	$10,0 + j43,8 = 44,9 \angle 77,1^\circ$	$24,9 + j109,25$
ВЛ2—220	84	АС-300	$8,2 + j36,0 = 36,9 \angle 77,1^\circ$	$20,6 + j90,34$
2 ВЛ3—110	50	АС-240	$6,0 + j20,25 = 21,1 \angle 73,7^\circ$	$15,0 + j50,6$
2 ВЛ4—110	40	АС-240	$4,8 + j16,2 = 16,9 \angle 73,7^\circ$	$12,0 + j40,5$

Таблица 1.8

Параметры автотрансформаторов АТ1—АТ4

Характеристики обмотки	ВН	СН	НН
$U_{\text{НОМ}}$, кВ	230	121	11
Сопротивления, Ом: R_T X_T	0,55 59,2	0,48 —12,69	3,2 131,2

Примечания: 1. Тип — АТДЦТН 125000/220. 2. $S_{\text{НОМ}}$, МВ·А, — 125. 3. Пределы регулирования напряжения — $(\pm 6) \cdot 2\%$.

Все параметры элементов электрической сети напряжением 220 кВ приведены к базисному напряжению 230 кВ, параметры элементов электрической сети напряжением 110 кВ приведены к базисному напряжению 115 кВ.

В примере произведен расчет дифференциально-фазной высокочастотной защиты линии ВЛ1 напряжением 220 кВ между ПС 1 и ПС 2.

В расчете будем использовать следующие исходные данные:

- ВЛ1–220 ПС 1–ПС 2 транзитная, одноцепная, без отпаек;
- $I_{\text{РАБ. МАКС}} = 600 \text{ А}$;
- коэффициенты трансформации ТТ на обоих концах линии электропередачи $K_{\text{ТТ}} = 600/5$.

Значения токов КЗ в линии ВЛ1, необходимые для расчета параметров дифференциально-фазной высокочастотной защиты, приведены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Значения токов КЗ для расчета параметров ДФЗ

Точка КЗ	Режим системы	Вид повреждения						
		$K^{(1)}$		$K^{(1)}$ $R_{\text{пер}} = 15 \text{ Ом}$	$K^{(1,1)}$		$K^{(2)}$	$K^{(3)}$
		$I_{1 \text{ КЗ, мин.}}$ А	$I_{2 \text{ КЗ, мин.}}$ А	$I_{2 \text{ КЗ, мин.}}$ А	$I_{1 \text{ КЗ, мин.}}$ А	$I_{2 \text{ КЗ, мин.}}$ А	$I_{2 \text{ КЗ, мин.}}$ А	$I_{1 \text{ КЗ, мин.}}$ А
К1	С2-мин	676	676	464	1233	639	931	1932
К2	С1-мин	957	957	663	1724	762	1243	2485

В целях упрощения расчетов токов КЗ и уставок защит не учитывались изменения сопротивлений автотрансформаторов при регулировании напряжения под нагрузкой.

Расчет уставок токового органа с пуском от линейного тока $I_{\text{Л.БЛ}}$, действующего на блокировку (на пуск ВЧ-передатчика)

Уставки токового органа с пуском от линейного тока $I_{\text{Л.БЛ. УСТ}}$ определяются по выражениям (1.1) и (1.19).

Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,3$, $I_{\text{РАБ. МАКС}} = 600 \text{ А}$ и $K_{\text{ТТ}} = 600/5$, получим:

- первичное значение уставки

$$I_{\text{Л.БЛ.УСТ}} = k_{\text{ОТС}} \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\text{РАБ.МАКС}} = 1,3 \cdot \sqrt{3} \cdot 600 = 1351 \text{ А};$$

- вторичное значение уставки $I_{\text{Л.БЛ. УСТ.ВТ}} = 11,26 \text{ А}$.

Расчет уставок токового органа с пуском от линейного тока $I_{\text{Л.ОТ}}$, действующего на отключение

Уставки токового органа с пуском от линейного тока $I_{\text{Л.ОТ. УСТ}}$ определяются по выражениям (1.2) и (1.19).

Принимая значения $k_{\text{С}} = 1,3$, $k_{\text{ОТВ}} = 1$, $I_{\text{Л.БЛ. УСТ}} = 1351 \text{ А}$ и $K_{\text{ТТ}} = 600/5$, получим:

- первичное значение уставки

$$I_{\text{Л.ОТ.УСТ}} = k_{\text{С}} k_{\text{ОТВ}} I_{\text{Л.БЛ.УСТ}} = 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1351 = 1756,3 \text{ А};$$

- вторичное значение уставки $I_{\text{Л.ОТ. УСТ.ВТ}} = 14,64 \text{ А}$.

Для двух полуккомплектов защиты, установленных на противоположных концах воздушной линии электропередачи ВЛ1, принимаются одинаковые значения уставок для токовых органов, действующих на блокировку (на пуск ВЧ -передатчика), и для токовых органов, действующих на отключение.

Расчет уставок токового органа с пуском по току обратной последовательности $I_{2\text{ БЛ}}$, действующего на блокировку защиты (на пуск ВЧ-передатчика)

Для расчета уставки ПО тока $I_{2\text{ БЛ}}$, действующего на блокировку, необходимо рассчитать ток небаланса, определяемый по погрешностям ТТ, частотным небалансам фильтров обратной последовательности и погрешностям их настройки, а также небалансам нагрузочного режима сети.

Расчет $I_{2\text{ НБ. РАСЧ}}$ производится по выражению (1.4).

Принимая значение $I_{\text{Л.БЛ. УСТ}} = 1351 \text{ А}$, получим

$$I_{2\text{НБ.РАСЧ}} = (I_{\text{Л.БЛ.УСТ}} / \sqrt{3}) \cdot 0,024 = (1351 / \sqrt{3}) \cdot 0,024 = 18,72 \text{ А.}$$

Уставки токового органа с пуском по току $I_{2\text{БЛ.УСТ}}$ определяются по выражениям (1.3) и (1.19). Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,3$, $k_{\text{В}} = 0,9$, $I_{2\text{НБ.РАСЧ}} = 18,72 \text{ А}$ и $K_{\text{ТТ}} = 600/5$, получим:

- первичное значение уставки

$$I_{2\text{БЛ.УСТ}} = k_{\text{ОТС}} I_{2\text{НБ.РАСЧ}} / k_{\text{В}} = 1,3 \cdot 18,72 / 0,9 = 27,04 \text{ А;}$$

- вторичное значение уставки $I_{2\text{БЛ.УСТ.ВТ}} = 0,225 \text{ А.}$

Однако такое значение уставки нельзя выставить на термине БЭ2704V081. Поэтому принимаем наименьшую возможную величину уставки по току обратной последовательности, равную 0,25 А.

Для определения первичного значения уставки необходимо вторичное значение умножить на коэффициент трансформации ТТ. Получаем $I_{2\text{БЛ.УСТ.ВТ}} = 0,25 \text{ А}$ и $I_{2\text{БЛ.УСТ}} = 30,00 \text{ А.}$

Для двух полукомплектов принимается одинаковая уставка.

Расчет уставок токового органа с пуском по току обратной последовательности $I_{2\text{ОТ}}$, действующего на отключение

Первичное значение уставки $I_{2\text{ОТ.УСТ}}$ выбирается наибольшим:

- исходя из отстройки от $I_{2\text{БЛ.УСТ}}$ того конца линии, с которым согласовывается данный комплект по выражению (1.5).

Принимая значения $k_{\text{С}} = 2$, $k_{\text{ОТВ}} = 1$ и $I_{2\text{БЛ.УСТ}} = 30,0 \text{ А}$, получим

$$I_{2\text{ОТ.УСТ}} = k_{\text{С}} k_{\text{ОТВ}} I_{2\text{БЛ.УСТ}} = 1,0 \cdot 2,0 \cdot 30,0 = 60,0 \text{ А;}$$

- отстройки от $I_{2\text{ЕМК.УД}}$, обусловленной кратковременной несимметрией при включении линии под напряжение, по выражению (1.6).

Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 2$, $k_{\text{ОТВ}} = 1$, $I_{2\text{ЕМК.УД}} = 0,13$ и $L = 102,8$, получим

$$I_{2\text{ ОТ.ЕМК.УСТ}} = k_{\text{ОТС}} k_{\text{ОТВ}} I_{2\text{ ЕМК.УД}} L = 2 \cdot 1 \cdot 0,13 \cdot 102 = 26,52 \text{ А.}$$

Принимаем наибольшее значение $I_{2\text{ ОТ.УСТ}} = 60,00 \text{ А.}$

Вторичное значение уставки, определенное по выражению (1.19) при $K_{\text{ТТ}} = 600/5$, будет $I_{2\text{ ОТ.УСТ.ВТ}} = 0,50 \text{ А.}$

Определение коэффициента чувствительности токового отключающего органа $I_{2\text{ ОТ}}$

Коэффициент чувствительности для каждого полукompлекта рассчитывается по выражению (1.7).

В табл. 1.10 представлены значения $I_{2\text{ КЗ}}$, протекающих в линии ВЛ1, в минимальном режиме работы системы и рассчитанных коэффициентов чувствительности для полукompлектов защиты, установленных на ПС 1 и ПС 2.

Таблица 1.10

Расчетные значения $k_{\text{ч}}$ для полукompлектов защиты

Полу- комплект защиты	Вид повреждения							
	$K^{(1)}$		$K^{(2)}$		$K^{(1)}$ $R_{\text{ПЕР}} = 15 \text{ Ом}$		$K^{(1,1)}$	
	$I_{2\text{ КЗ. мин,}} \text{ А}$	$k_{\text{ч}}$	$I_{2\text{ КЗ. мин,}} \text{ А}$	$k_{\text{ч}}$	$I_{2\text{ КЗ. мин,}} \text{ А}$	$k_{\text{ч}}$	$I_{2\text{ КЗ. мин,}} \text{ А}$	$k_{\text{ч}}$
ПС А	957	15,9	1243	20,7	663	11,1	762	12,7
ПС Б	676	11,2	931	15,5	464	7,7	639	10,6

Из результатов расчетов видно, что для полукompлекта, установленного на ПС А, минимальный ток обратной последовательности в защите протекает при однофазном повреждении через $R_{\text{ПЕР}} = 15 \text{ Ом}$ $I_{2\text{ КЗ. мин}} = 663 \text{ А}$, а $k_{\text{ч}} = 11,1$. Для полукompлекта, установленного на ПС Б, минимальный ток обратной последовательности в защите протекает также при однофазном повреждении через $R_{\text{ПЕР}} = 15 \text{ Ом}$ $I_{2\text{ КЗ. мин}} = 464 \text{ А}$, а $k_{\text{ч}} = 7,7$.

Если значение $k_{\text{ч}} > 2$, то необходимо увеличить уставку для полуккомплекта с наименьшим коэффициентом чувствительности до значения равного 2.

Таким образом, получается новая уставка $I_{2\text{от.уст}}$, которая принимается одинаковой для обоих концов линии. По ней необходимо уточнить $I_{2\text{бл.уст}}$ следующим образом:

$$I_{2\text{от.уст}} = \frac{I_{2\text{кз.мин}}}{2} = \frac{464}{2} = 232 \text{ А};$$

$$I_{2\text{бл.уст}} = 0,5 I_{2\text{от.уст}} = 0,5 \cdot 232 = 116 \text{ А}.$$

Вторичные значения уставок, определенные по выражению (1.19) при $K_{\text{ТТ}} = 600/5$, будут: $I_{2\text{от.уст.вт}} = 1,93 \text{ А}$, $I_{2\text{бл.уст.вт}} = 0,97 \text{ А}$.

Принимаем:

$$I_{2\text{от.уст}} = 232 \text{ А и } I_{2\text{от.уст.вт}} = 1,93 \text{ А};$$

$$I_{2\text{бл.уст}} = 116 \text{ А и } I_{2\text{бл.уст.вт}} = 0,97 \text{ А}.$$

Принятые уставки $I_{2\text{от.уст}}$ для обоих полуккомплектов удовлетворяют требованиям чувствительности.

Расчет уставок токового органа с пуском по приращению $DI_{2\text{бл}}$, действующего на блокировку (на пуск ВЧ-передатчика)

Расчеты уставок токового органа с пуском по $DI_{2\text{бл}}$ производятся по выражениям (1.8) и (1.19).

Принимая значения $k_{\text{отс}} = 0,7$, $I_{2\text{бл.уст}} = 117 \text{ А}$ и $K_{\text{ТТ}} = 600/5$, получим:

- первичное значение уставки

$$DI_{2\text{бл.уст}} = k_{\text{отс}} I_{2\text{бл.уст}} = 0,7 \cdot 116 = 81,2 \text{ А};$$

- вторичное значение уставки $DI_{2\text{бл.уст.вт}} = 0,68 \text{ А}$.

Расчет уставок токового органа с пуском по приращению $DI_{2\text{ OT}}$, действующего на отключение

Расчеты уставок токового органа с пуском по $DI_{2\text{ OT}}$ производятся по выражениям (1.9) и (1.19).

Принимая значения $k_C = 2$, $DI_{2\text{ БЛ.УСТ}} = 81,2\text{ А}$ и $K_{\text{ТТ}} = 600/5$, получим:

- первичное значение уставки

$$DI_{2\text{ OT.УСТ}} = k_C DI_{2\text{ БЛ.УСТ}} = 2 \cdot 81,2 = 162,4\text{ А};$$

- вторичное значение уставки $DI_{2\text{ OT.УСТ.ВТ}} = 1,36\text{ А}$.

Расчеты уставок токового органа с пуском по приращению $DI_{1\text{ БЛ}}$, действующего на блокировку (на пуск ВЧ-передатчика)

Расчеты уставок токового органа с пуском по $DI_{1\text{ БЛ}}$ производятся по выражениям (1.10) и (1.19).

Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 4$, $DI_{2\text{ БЛ.УСТ}} = 81,2\text{ А}$ и $K_{\text{ТТ}} = 600/5$, получим:

- первичное значение уставки

$$DI_{1\text{ БЛ.УСТ}} = k_{\text{ОТС}} DI_{2\text{ БЛ.УСТ}} = 4 \cdot 81,2 = 324,8\text{ А};$$

- вторичное значение уставки $DI_{1\text{ БЛ.УСТ.ВТ}} = 2,71\text{ А}$.

Расчеты уставок токового органа с пуском по приращению $DI_{1\text{ OT}}$, действующего на отключение

Расчеты уставок токового органа с пуском по $DI_{1\text{ OT}}$ производятся по выражениям (1.11) и (1.19).

Принимая значения $k_C = 4$, $DI_{2\text{ OT.УСТ}} = 162,4\text{ А}$ и $K_{\text{ТТ}} = 600/5$, получим:

- первичное значение уставки

$$DI_{1\text{ ОТ.УСТ}} = k_C DI_{2\text{ ОТ.УСТ}} = 4 \cdot 162,4 = 649,6 \text{ А};$$

- вторичное значение уставки $DI_{1\text{ ОТ.УСТ.ВТ}} = 5,42 \text{ А}$.

Коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}$ не проверяется.

Расчет коэффициента комбинированного фильтра токов

Расчет токов КЗ производился без учета токов нагрузки, поэтому расчет коэффициента комбинированного фильтра токов k производится по выражению (1.12). Результаты расчета сведены в табл. 1.11.

Таблица 1.11

Расчет коэффициента k

Полу- комплект защиты	К ⁽¹⁾			К ^(1,1)		
	$I_{\text{РАБ. МАКС}}, \text{ А}$	$I_{2\text{ КЗ}}, \text{ А}$	k	$I_{1\text{ КЗ}}, \text{ А}$	$I_{2\text{ КЗ}}, \text{ А}$	k
ПС А	600	957	0,94	1724	762	3,05
ПС Б	600	676	1,33	1233	639	2,87

Из результатов расчетов видно, что максимальный из определенных коэффициентов $k = 3,05$ получается для полукompлекта защиты на ПС А в режиме двухфазного замыкания на землю. Поскольку коэффициент k получился меньше 6, принимаем для обоих полукompлектов защиты $k = 6$.

Расчет коэффициента чувствительности органа манипуляции при несимметричных КЗ

Коэффициент чувствительности органа манипуляции при несимметричных КЗ рассчитывается по выражению (1.13).

Результаты расчета приведены в табл. 1.12.

Таблица 1.12

**Расчет коэффициента чувствительности манипуляции
при несимметричных КЗ**

Полу- ком- плект защи- ты	$K^{(1)}$			$K^{(1,1)}$		
	$I_{РАБ. МАКС}, А$	$I_{2 КЗ}, А$	$k_{Ч. МАН.НЕСИМ}$	$I_{1 КЗ}, А$	$I_{2 КЗ}, А$	$k_{Ч. МАН.НЕСИМ}$
ПС А	600	957	7,2	1724	762	4,1
ПС Б	600	676	4,8	1233	639	3,73

Из результатов расчетов видно, что минимальный из определенных коэффициентов чувствительности органа манипуляции при несимметричных КЗ получается для полукомплекта защиты на ПС 2 в режиме замыкания на землю двух фаз $k_{Ч. МАН.НЕСИМ} = 3,73 > 1,3$. Следовательно, условие обеспечения необходимой чувствительности выполняется.

**Расчет коэффициента чувствительности органа манипуляции
при симметричных КЗ**

Коэффициент чувствительности органа манипуляции при симметричных КЗ рассчитывается по выражению (1.14).

Результаты расчета приведены в табл. 1.13.

Таблица 1.13

**Расчет коэффициента чувствительности манипуляции
при симметричных КЗ**

Полу- комплект защиты	$K^{(3)}$			
	$I_{2 БЛ. УСТ}$	$I_1^{(3)}$	k	$k_{Ч. МАН.СИМ}$
ПС А	116,0	2485	6	3,5
ПС Б	116,0	1932	6	2,7

Из результатов расчетов видно, что минимальный из полученных коэффициентов чувствительности органа манипуляции

при симметричных КЗ получается для полуконспекта защиты на ПС $2 k_{\text{ч. МАН.СИМ}} = 2,7 > 1,3$. Следовательно, условие обеспечения необходимой чувствительности выполняется.

Расчеты уставок измерительного органа сопротивления $Z_{\text{от}}$

Первичное значение уставки по реактивной составляющей ИО сопротивления $X_{\text{от.УСТ}}$ определяется исходя из надежного охвата всей длины защищаемой линии по выражению (1.15).

Принимая длину линии $L = 102$ км, получим

$$X_{\text{от.УСТ}} = 2 X_{\text{ИУД}} L = 2 \cdot 0,429 \cdot 102 = 87,52 \text{ Ом.}$$

Первичное значение уставки по активной составляющей ИО сопротивления $R_{\text{от}}$ определяется по величине расчетного активного сопротивления в месте повреждения при междуфазных КЗ. При выбранной величине $R_{\text{от.УСТ}}$ производится проверка отстройки от максимального нагрузочного режима по выражениям (1.16) и (1.17).

Принимая $R_{\text{от.УСТ}} = 45$ Ом, $k_{\text{отс}} = 0,9$ и $\varphi_{\text{НАГР}} = 23^\circ$, получим

$$Z_{\text{НАГР}} = \frac{U_{\text{МИН}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{НАГР.МАКС}}} = \frac{0,9 \cdot 220 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 420} = 272,2 \text{ Ом,}$$

$$R_{\text{УСТ}} \leq k_{\text{отс}} Z_{\text{НАГР}} \cos \varphi_{\text{НАГР}} = 0,9 \cdot 272,2 \cdot \cos 23^\circ = 229,41 \text{ Ом.}$$

Угол наклона характеристики ИО сопротивления $Z_{\text{от}}$ к оси R , определяемый по выражению (1.18),

$$\varphi_1 = \arctg \left(\frac{X_{\text{ИУД}}}{R_{\text{ИУД}}} \right) = \arctg \left(\frac{0,429}{0,098} \right) = 77,14^\circ.$$

Вторичные значения уставок по активной и реактивной составляющим ИО сопротивления определяются в соответствии с выражением (1.20).

Принимая $R_{\text{от. уст}} = 45 \text{ Ом}$ и $X_{\text{от. уст}} = 90 \text{ Ом}$ при значениях $K_{\text{ТТ}} = 600/5$ и $K_{\text{ТН}} = 220000/100$, получим $R_{\text{от. уст. вт}} = 2,45 \text{ Ом}$ и $X_{\text{от. уст. вт}} = 4,9 \text{ Ом}$.

Определение угла блокировки ДФЗ

В связи с тем, что на ПС 1 и ПС 2 устанавливаются одностипные ТТ и комплекты защит, а длина линии равна 102 км, принимаем угол блокировки равным 60° .

Рассчитанные значения уставок ПО, ИО, ОМ, ОСФ, элемента времени ДФЗ ВЛ1 ПС 1–ПС 2 приведены ниже, логика работы — в табл. 1.14.

Наименование величин	Значения
<i>Уставки ПО тока ДФЗ</i>	
Ток срабатывания ПО по $3I_0$, блокирующий (0,10–1,00) $I_{2\text{ ном. ТТ}}$, А	—
Ток срабатывания ПО по $3I_0$, отключающий (0,20–2,00) $I_{2\text{ ном. ТТ}}$, А	—
Ток срабатывания ПО по I_2 , блокирующий (0,05–0,50) $I_{2\text{ ном. ТТ}}$, А	0,97
Ток срабатывания ПО по I_2 , отключающий (0,10–1,00) $I_{2\text{ ном. ТТ}}$, А	1,93
Ток срабатывания ПО по $I_{\text{л}}$ (АВ), блокирующий (0,20–4,00) $I_{2\text{ ном. ТТ}}$, А	11,77
Ток срабатывания ПО по $I_{\text{л}}$ (АВ), отключающий (0,40–8,00) $I_{2\text{ ном. ТТ}}$, А	15,30
Ток срабатывания ПО по приращению I_2 , блокирующий (0,04–1,50) $I_{2\text{ ном. ТТ}}$, А	0,68
Ток срабатывания ПО по приращению I_2 , отключающий (0,06–2,50) $I_{2\text{ ном. ТТ}}$, А	1,36
Ток срабатывания ПО по приращению I_1 , блокирующий (0,08–3,00) $I_{2\text{ ном. ТТ}}$, А	2,71
Ток срабатывания ПО по приращению I_1 , отключающий (0,12–5,00) $I_{2\text{ ном. ТТ}}$, А	5,42

Наименование величин	Значения
<i>Уставки ОМ и ОСФ</i>	
Уставка ОМ по коэффициенту k комбинированного фильтра токов, (4–10)	6
Уставка ОСФ по углу блокировки действия защиты на отключение, $\pm(40...65)^\circ$	60
<i>Уставки ИО Z_{OT} ДФЗ</i>	
Уставка по оси X характеристики $Z_{OT}(1,000–250,000)/$, Ом	4,91
Уставка по оси R характеристики $Z_{OT}(1,000–250,000)/$, Ом	2,45
Угол наклона характеристики $\varphi_1(45,00–89,00),^\circ$	77,14
<i>Уставки времени ДФЗ</i>	
ДТЗ Задержка сигнала отключения (0,001–0,15), с	0,01

Таблица 1.14

Логика работы ДФЗ

Наименование	Требования к логике действия	Параметр
XB1	Работа на ВЛ с ответвлениями (предусмотрена/не предусмотрена)	Не предусмотрена
XB2	Работа в сети с тяговой нагрузкой (предусмотрена/непредусмотрена)	Не предусмотрена
XB3	Работа с ОАПВ (предусмотрена/не предусмотрена)	Не предусмотрена
XB7	Пуск ВЧ передатчика при выводе ДФЗ (не предусмотрен/предусмотрен)	Не предусмотрен
XB8	Сигнализация пуска на отключение (не предусмотрена/предусмотрена)	Предусмотрена
XB10	ПО I_0 (выведен/в работе)	Выведен
XB12	Обмен ВЧ-сигналами (неманипулированный/манипулированный)	Манипулированный

1.3. Резервные защиты ЛЭП на базе шкафа ШЭ2607 016

1.3.1. Общая характеристика шкафа ШЭ2607 016

Состав и назначение устройств защиты шкафа ШЭ2607 016

Шкаф резервных защит линии и автоматики управления выключателем типа ШЭ2607 016 предназначен для защиты линий напряжением 110–220 кВ и управления выключателем как с трехфазным, так и с пофазным приводом. Он содержит:

- трехступенчатую дистанционную защиту (ДЗ);
- четырехступенчатую токовую направленную защиту нулевой последовательности (ТНЗНП);
- токовую отсечку (ТО);
- автоматику разгрузки при перегрузке по току (АРПТ), а также автоматику управления выключателем (АУВ) и устройство резервирования отказа выключателя.

Устройство АРПТ предназначено для выдачи сигналов во внешние цепи при перегрузке АТ по току с учетом направления мощности прямой последовательности.

Устройство АУВ формирует сигналы на включение и отключение выключателя по командам, приходящим от защит, устройств телемеханики и ключа дистанционного управления.

Устройство резервирования отказа выключателя предназначено для отделения отказавшего выключателя от сети путем отключения выключателей смежных элементов. Выполнение его аналогично УРОВ шкафа ШЭ2607 081.

Указанные выше функции реализованы аппаратно на базе микропроцессорного терминала БЭ2704V016. В состав терминала входят измерительные органы, логическая часть, входные и выходные цепи, а также устройства сигнализации.

Кроме функций защиты, автоматики и сигнализации, программное обеспечение терминала реализует ряд дополнительных функций, характерных для всех терминалов серии БЭ2704.

В терминале предусмотрена местная сигнализация о действии защит и устройств, выполненная на светодиодных индикаторах.

Подключение шкафа ШЭ2607 016 к измерительным ТТ и ТН защищаемой линии

Схема подключения шкафа ШЭ2607 016 к измерительным трансформаторам защищаемой линии электропередачи приведена на рис. 1.6.

Терминал БЭ2704 имеет 10 аналоговых входов для подключения его к первичным цепям переменного тока и переменного напряжения. Гальваническая развязка внутренних цепей терминала от элементов первичной схемы электрической сети выполнена с помощью промежуточных трансформаторов тока *TLA* и напряжения *TLV*.

При использовании терминала, для выполнения резервных защит ЛЭП, устройств АРПТ, АУВ и УРОВ, в его схеме задействовано 5 аналоговых входов тока и 5 аналоговых входов напряжения, содержащих 5 промежуточных трансформаторов тока *TLA1*–*TLA5* и 5 промежуточных трансформаторов напряжения *TLV1*–*TLV5*, которые через испытательные блоки *SG1*–*SG6* подключаются к измерительным ТТ и ТН и шкафу отбора напряжения (ШОН) ВЛ.

К вторичным обмоткам промежуточных трансформаторов подключаются измерительные реле сопротивления (РС) дистанционной защиты, реле тока (РТ) токовых защит, блокировки при качаниях (БК), АРПТ, АУВ и УРОВ, разрешающее (РНМНП_р) и блокирующее (РНМНП_б) реле направления мощности нулевой последовательности, реле напряжения (РН) устройства блокировки при неисправностях в цепях переменного напряжения (БНН).

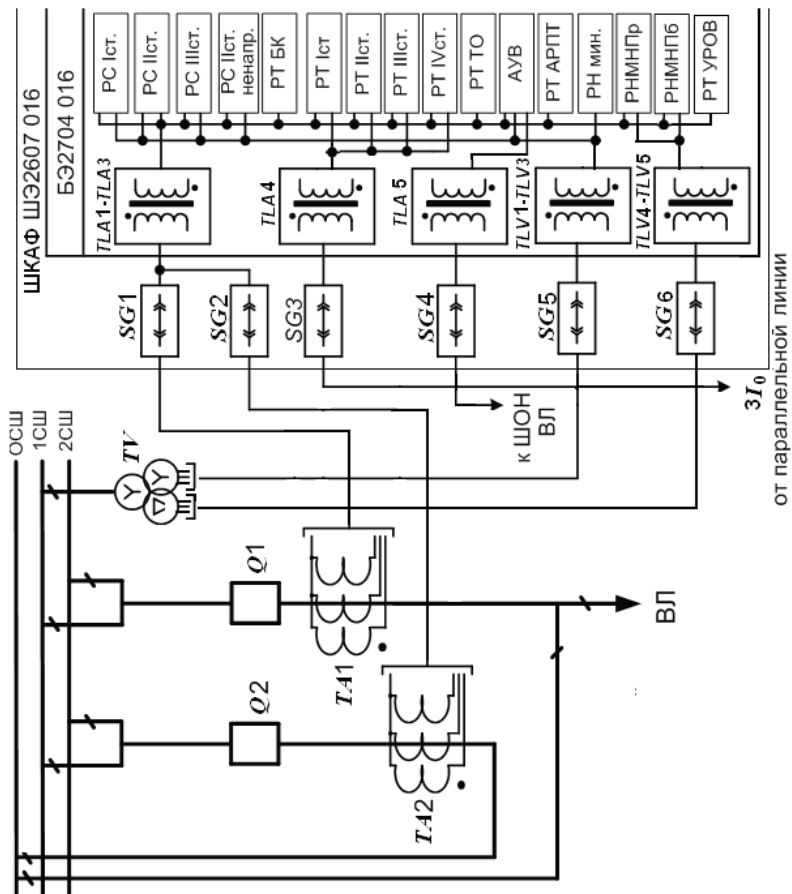


Рис. 1.6. Схема подключения шкафа ШЭ2607 016 к измерительным ТТ и ТН

1.3.2. Устройство и работа дистанционной защиты шкафа ШЗ2607 016

Дистанционная защита предназначена для действия при междуфазных КЗ.

Схема дистанционной защиты включает в себя:

- три основных направленных и одну дополнительную ненаправленную ступени;
- устройство блокировки при качаниях;
- устройство блокировки при неисправностях в цепях переменного напряжения;
- логическую часть.

Измерительные и пусковые органы дистанционной защиты

Измерительные реле сопротивления

Каждая из ступеней ДЗ содержит по три реле сопротивления (РС), включенные на разности фазных токов ($I_A - I_B$, $I_B - I_C$, $I_C - I_A$) и соответствующие междуфазные напряжения (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}).

Характеристики срабатывания реле сопротивлений всех ступеней защиты приведены на рис. 1.7.

Характеристика срабатывания каждого реле представляет собой параллелограмм, верхняя сторона которого параллельна оси R и пересекает ось X в точке с координатой $X_{уст}$, а правая сторона имеет угол наклона φ_1 относительно оси R и пересекает ее в точке с координатой $R_{уст}$ ($R_{уст}$ и $X_{уст}$ — уставки соответствующей ступени по активному и реактивному сопротивлению: $R_{I\text{уст}}$, $R_{II\text{уст}}$, $R_{III\text{уст}}$ и $X_{I\text{уст}}$, $X_{II\text{уст}}$, $X_{III\text{уст}}$).

Диапазон изменения параметров, определяющих форму характеристик реле сопротивления направленных ступеней ДЗ, указан в табл. 1.15.

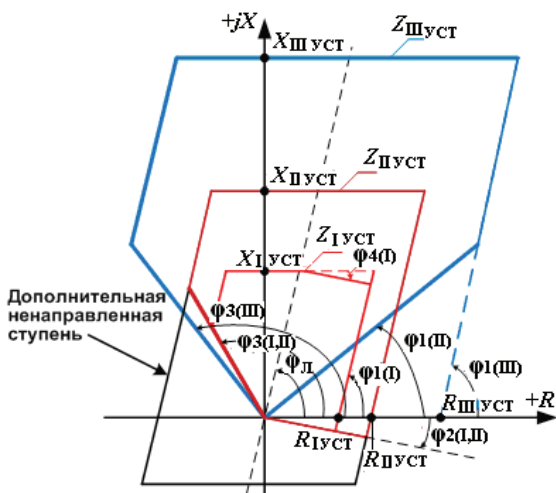


Рис. 1.7. Характеристики срабатывания реле сопротивлений

Таблица 1.15

Диапазон изменения параметров РС ДЗ

Ступени	Диапазон изменения параметров						
	$R_{уст}$, Ом на фазу	$X_{уст}$, Ом на фазу	$\varphi_1, ^\circ$	$\varphi_2, ^\circ$	$\varphi_3, ^\circ$	$\varphi_4, ^\circ$	
I	0,2–100	0,2–100	45–89	–89–0	91–179	–45–0	
II	($I_{2\text{ ном.тт}} = 5\text{ A}$) 1,0–500	($I_{2\text{ ном.тт}} = 5\text{ A}$) 1,0–500		–89–89		–	
III	($I_{2\text{ ном.тт}} = 1\text{ A}$)	($I_{2\text{ ном.тт}} = 1\text{ A}$)					

Характеристика РС дополнительной ненаправленной ступени имеет форму параллелограмма, смещенного в третий квадрант на величину не более $0,1X_{уст}$, а значения ее уставок по R , X и φ_1 совпадают с аналогичными величинами для РС направленной II ступени.

Ток точной работы $I_{тр}$ для всех РС при работе на угле линии электропередачи не превышает $0,1I_{ном}$ во всем диапазоне уставок.

Устройство блокировки при качаниях

Блокировка при качаниях (БК) предназначена для исключения срабатывания дистанционной защиты при возникновении качаний. В измерительной части БК имеется два пусковых органа:

- основной, реагирующий на приращение тока обратной последовательности $\Delta I_2/\Delta t$, рассчитанный на действие при всех видах КЗ, сопровождающихся появлением тока I_2 ;
- дополнительный, реагирующий на приращение тока прямой последовательности $\Delta I_1/\Delta t$. Дополнительный орган предназначен для обеспечения надежного действия БК при трехфазных КЗ, когда из-за отсутствия или малого значения I_2 основной пусковой орган может не подействовать.

По степени чувствительности к режиму несимметрии токов БК имеет два пусковых органа: чувствительный и грубый. При качаниях и в режиме нагрузки чувствительный орган БК запрещает действие I и II ступеней, а грубый орган используется в качестве дополнительного пускового органа для медленно действующих II и III ступеней.

При КЗ, вследствие внезапного появления и резкого увеличения ΔI_2 и ΔI_1 , БК срабатывает и вводит заблокированные ступени в действие на время, необходимое для их срабатывания. По истечении этого времени БК вновь выводит их из работы (до следующего КЗ или появления несимметричного режима).

Устройство блокировки при неисправностях цепей напряжения

В ДЗ предусмотрено блокирование действия всех ступеней при повреждениях в цепях ТН с помощью устройства БНН, которое реагирует на нарушение баланса фазных напряжений

вторичных обмоток ТН, соединенных в звезду, и обмоток, соединенных в разомкнутый треугольник. Время срабатывания устройства блокировки при неисправностях в цепях напряжения (при обрыве любой из фаз или нулевого провода звезды) не превышает 0,025 с.

Функциональная схема логической части дистанционной защиты

В табл. 1.16 перечислены программные накладки с указанием их положения, а в табл. 1.17 приведены наименования и назначения элементов задержки в функциональной схеме логической части ДЗ.

Таблица 1.16

Наименование и назначение программных накладок

Наименование	Назначение	Положение	Значение по умолчанию
XB20	Запрет АПВ от III ступени ДЗ	0 — не предусмотрен	Не предусмотрен
		1 — предусмотрен	
XB21	Подхват срабатывания РС I ступени от ненаправленного РС II ступени	0 — не предусмотрен	Предусмотрен
		1 — предусмотрен	
XB22	Контроль действия I ступени (или II ступени с меньшей выдержкой времени) от БК	0 — от БКб	От БКб
		1 — от БКм	
XB24	Действие II ступени с меньшей выдержкой времени	0 — не предусмотрен	Предусмотрен
		1 — предусмотрен	
XB25	Контроль действия III ступени от блокировок	0 — от БНН и БК	От БНН и БК
XB26	Контроль действия ступеней от БНН	0 — не предусмотрен	Предусмотрен
		1 — предусмотрен	

Окончание табл. 1.16

Наименование	Назначение	Положение	Значение по умолчанию
XB27	Ускоренный возврат БК при отключении выключателя	0 — не предусмотрен	Предусмотрен
		1 — предусмотрен	
XB28	Ускорение действия II или III ступени ДЗ при включении выключателя	0 — не предусмотрен	Предусмотрен
		1 — предусмотрен	
XB29	Ускоряемая ступень при включении выключателя	0 — II ступень	II ступень
		1 — III ступень	
XB30	Оперативно ускоряемая ступень ДЗ	0 — II ступень	II ступень
		1 — III ступень	
XB37	Место установки ТН	0 — на шинах	На шинах
		1 — на линии	
XB39	Контроль ускорения при включении выключателя от напряжения на линии	1 — не предусмотрен	Предусмотрен
		0 — предусмотрен	

Таблица 1.17

Наименование и назначение элементов задержки

Наименование	Назначение	Диапазон, с
DT1	Задержка на срабатывание II ступени с меньшей выдержкой времени ДЗ	0,05–15,00
DT2	Задержка на срабатывание II ступени ДЗ	0,05–15,00
DT3	Задержка на срабатывание III ступени ДЗ	0,05–15,00
DT4	Задержка на срабатывание при ОУ	0,05–5,00
DT6	Время ввода ускорения II или III ступени ДЗ при включении выключателя	0,7–2,0
DT7	Время ввода быстродействующих ступеней ДЗ от чувствительного реле БК	0,2–1,0
DT8	Время ввода быстродействующих ступеней ДЗ от грубого реле БК	0,2–1,0

Окончание табл. 1.17

Наименование	Назначение	Диапазон, с
DT9	Время ввода медленнодействующих ступеней от БК	3–16
DT21	Время ввода ускорения с ТН на линии при включении выключателя	1,0
DT22	Время ввода ускорения с ТН на линии при междофазных КЗ	0,1
DT23	Задержка сигнализации на срабатывание БНН	5
DT29	Задержка на срабатывание ускорения II или III ступени ДЗ при включении	0,0–1,0
DT30	Задержка на срабатывание I ступени ДЗ	0,0–15,0

Упрощенная функциональная схема логической части дистанционной защиты показана на рис. 1.8 и 1.9.

Работа логической части дистанционной защиты

Логическая схема ДЗ принимает сигналы от направленных РС I, II и III ступеней, РС ненаправленной ступени, чувствительного и грубого реле тока (РТ) БК, БНН, трех дополнительных реле минимального напряжения (РН), подключенных к ТН на линии, и сигнал контроля цепи включения от реле положения выключателя «Отключено» *KQT*.

С помощью логических элементов ИЛИ (1), (2), (3) для каждой направленной ступени ДЗ (рис. 1.12 на с. 86) осуществляется объединение сигналов срабатывания отдельных РС, включенных на разности фазных токов и соответствующие междофазные напряжения.

Действие направленных ступеней ДЗ осуществляется следующим образом:

- по цепи I ступени через логические элементы ИЛИ (1), И (22) и элемент задержки *DT30* (36);

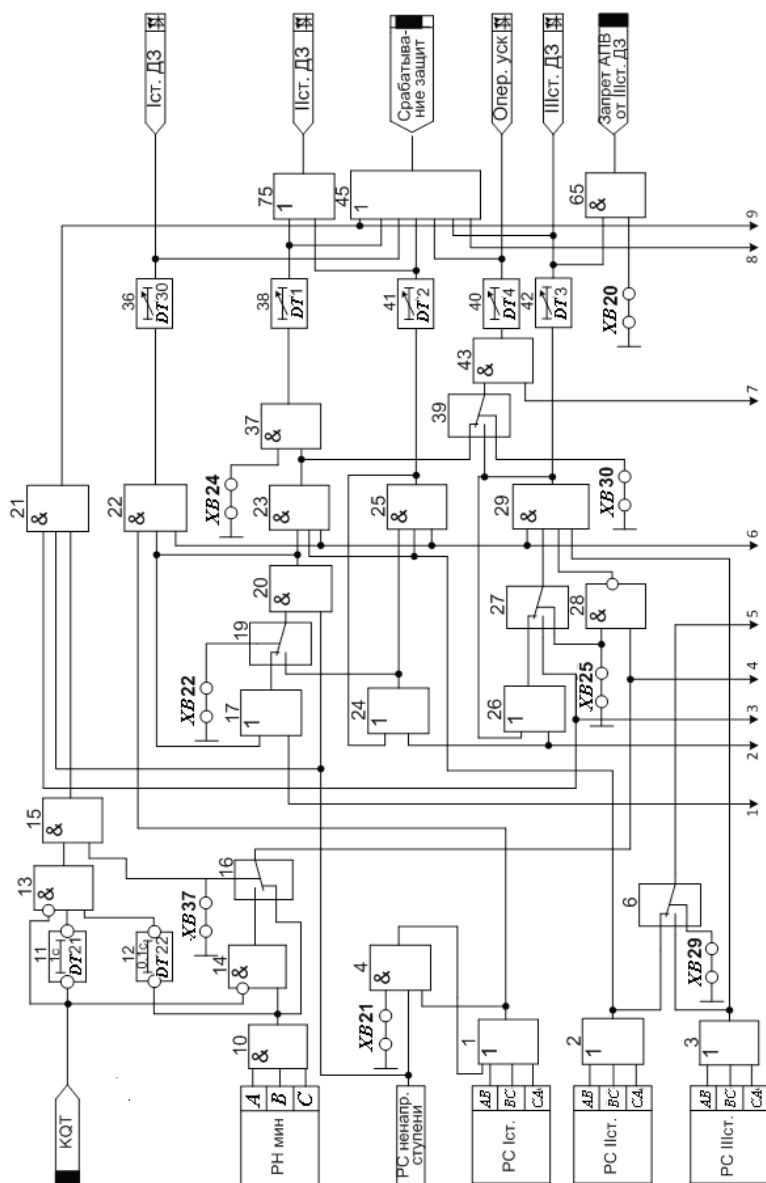


Рис. 1.8. Упрощенная функциональная схема логической части ДЗ ЛЭП терминала БЭ2704V016

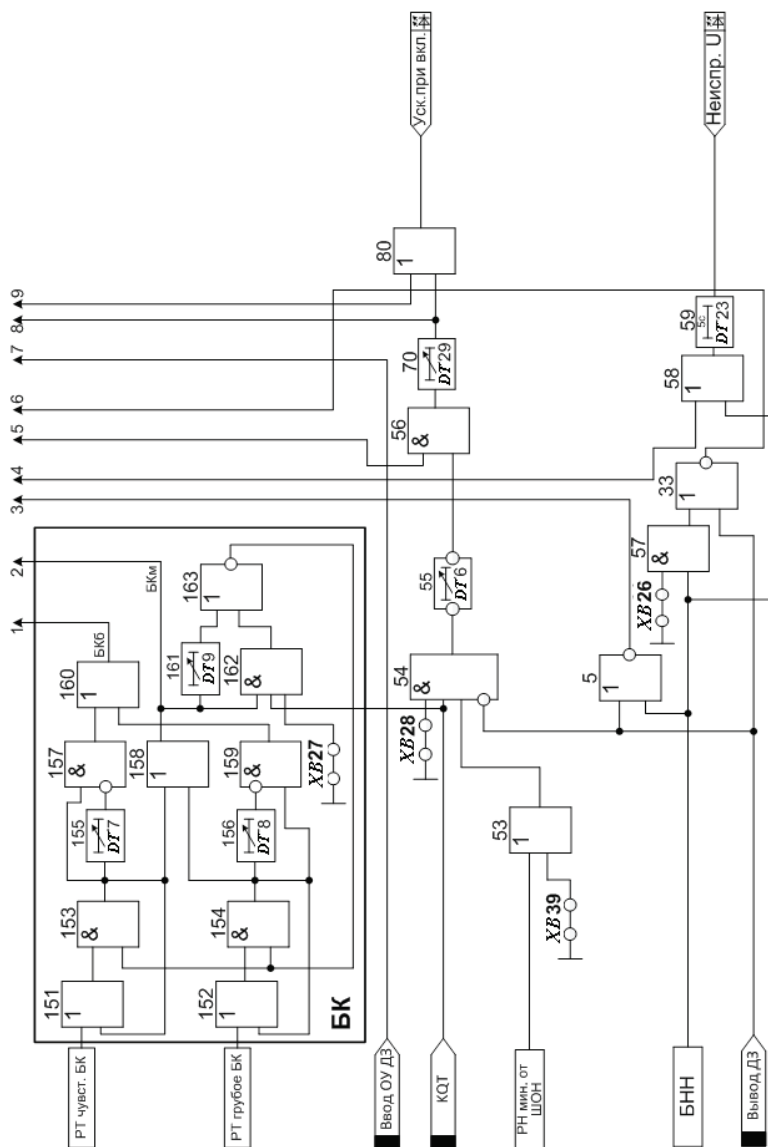


Рис. 1.9. Упрощенная функциональная схема логической части ДЗ ЛЭП терминала БЭ2704V016

- по цепи II ступени через логический элемент ИЛИ (2) и далее с меньшей выдержкой времени через логические элементы И (23), И (37) и элемент задержки *DT1* (38); с большей выдержкой времени через логический элемент И (25) и элемент задержки *DT2* (41);
- по цепи III ступени через логические элементы ИЛИ (3), И (29) и элемент задержки *DT3* (42).

Возможно ускорение действия II или III ступеней ДЗ через логический элемент И (43) и элемент задержки *DT4* (40) следующим образом:

- оперативно, подачей единичного сигнала со входа «Ввод ОУ ДЗ» на вход элемента И (43). Выбор ускоряемой ступени в этом случае осуществляется программной накладкой *XB30*;
- в режиме опробования линии с контролем сигналов от реле *KQT* и отсутствия напряжения на линии с использованием реле минимального напряжения, подключенного к шинке отбора напряжения (ШОН) или к ТН.

С помощью программной накладки *XB28* вводится режим ускорения, *XB29* выбирается ускоряемая ступень, а *XB39* задается необходимость контроля напряжения на линии. Время, в течение которого разрешается ускорение срабатывания выбранной ступени, определяется по выдержке времени элемента *DT6* (55), отсчитываемой от момента включения выключателя. Время срабатывания II или III ступеней ДЗ, при ускорении их в режиме опробования линии (включения выключателя), задается выдержкой времени элемента *DT27* (70).

Действие ненаправленной ступени ДЗ происходит через элемент И (21).

Сигнализация о срабатывании каждой ступени ДЗ осуществляется соответствующим светодиодным индикатором, а действие всех ступеней защиты на отключение производится через логический элемент ИЛИ (45).

Вывод защиты из работы производится путем подачи единичного сигнала со входа «Вывод ДЗ» на входы логических элементов ЗАПРЕТ (54), ИЛИ-НЕ (5) и ИЛИ-НЕ (33). При этом на один из входов элементов И (21), И (22), И (23), И (25), И (29) и И (56) поступают сигналы нулевого уровня, запрещая прохождение через них сигналов от измерительных РС.

Аналогично описанному производится блокирование действия ДЗ при возникновении неисправностей в цепях переменного напряжения. В результате срабатывания устройства БНН сигнал единичного уровня со входа «БНН» через логический элемент И (57) поступает на первый вход элемента ИЛИ-НЕ (33). С выхода последнего сигнал нулевого уровня подается на один из входов элементов И (22), И (23), И (25) и И (29), блокируя действие направленных ступеней защиты. Программной накладкой *XB26* данную блокировку защиты можно снять.

Блокирование ненаправленной ступени ДЗ производится через логический элемент ИЛИ-НЕ (5) на входе элемента И (22). Одновременно через логический элемент ИЛИ (58) и элемент задержки *DT23* (57) осуществляется сигнализация о неисправностях в цепях переменного напряжения.

Устройство БК является дополнительным пусковым органом. Срабатывая при коротких замыканиях, оно выдает два сигнала:

- сигнал БКб, разрешающий ввод в работу быстродействующих ступеней ДЗ (I и II с меньшей выдержкой времени), поступает с выхода логического элемента ИЛИ (160) через элемент ИЛИ (17), программный переключатель 19 и элемент И (20) на входы логических элементов И (22) и И (23);
- сигнал БКм, разрешающий ввод в работу медленнодействующих ступеней ДЗ (II с большей выдержкой времени и III), поступает с выхода логического элемента ИЛИ (158) через элемент ИЛИ (24) на вход логического элемента И (25), а через элемент ИЛИ (26) и программный переключатель 27 на вход логического элемента И (29).

Сигнал о срабатывании чувствительного органа БК «РТ чувст. БК» через логические элементы ИЛИ (151), И (153) и ЗАПРЕТ (157) подается на первый вход элемента ИЛИ (160), а сигнал о срабатывании грубого органа БК «РТ грубое БК» через логические элементы ИЛИ (152), И (154) и ЗАПРЕТ (159) подается на второй вход элемента ИЛИ (160), вызывая появление сигнала БКб на его выходе. Продолжительность существования этого сигнала, достаточная для работы быстродействующих ступеней ДЗ, определяется по выдержкам времени, установленными на элементах задержки *DT7* (155) и *DT8* (156). После срабатывания элементов задержки *DT7* (155) и *DT8* (156) сигналы с их выходов поступают на инверсные входы элементов ЗАПРЕТ (157) и ЗАПРЕТ (159), в результате чего сигнал БКб исчезает и быстродействующие ступени ДЗ выводятся из работы.

Сигнал БКм появляется на выходе логического элемента ИЛИ (158) также в результате срабатывания чувствительного или грубого органов БК, а продолжительность его существования, достаточная для работы медленнодействующих ступеней ДЗ, определяется по выдержке времени, установленной на элементе задержки *DT9* (161). Это время, кроме того, определяет возврат устройства БК в исходное состояние и готовность его к новому действию.

Имеется возможность разрешить работу быстродействующих ступеней ДЗ в течение времени ввода медленнодействующих ступеней от сигнала БКм путем установки программной накладки *XB22*.

При близких трехфазных КЗ, когда все междуфазные напряжения на входе РС близки к нулю, для определения направленности в течение времени не менее 0,06 с используются напряжения предаварийного режима (работа защиты «по памяти»). С помощью программной накладки *XB21* предусмотрена возможность подачи отключающего импульса РС I ступени от РС ненаправленной ступени через логический элемент И (4) на вход элемента ИЛИ (1). Возврат схемы подхвата в ис-

ходное состояние происходит только после возврата РС ненаправленной ступени.

В нормальном режиме работы с возникновением режима качаний РС могут сработать. При этом реле тока БК, отстроены от режима качаний путем выбора уставок по изменению токов обратной и прямой последовательностей, не срабатывают и блокируют прохождение сигналов срабатывания от РС.

В случае возникновения КЗ вместе с РС срабатывают и реле БК, которые разрешают прохождение сигналов срабатывания защиты:

- от РС быстродействующих ступеней на время, определяемое выдержкой времени элемента $DT7$ (155) при срабатывании чувствительного реле тока БК или элемента $DT8$ (156) при срабатывании грубого БК;
- от РС медленнодействующих ступеней на время, определяемое выдержкой времени элемента $DT9$ (161) при срабатывании любого токового реле БК.

Если КЗ происходит в зоне действия I и II ступеней и РС II ступени срабатывают в течение времени ввода их в работу от БК, то для быстродействующих ступеней разрешающий сигнал от БК удерживается даже по истечении времени ввода за счет наличия обратной связи с выхода элемента И (20) на вход элемента ИЛИ (17). Возврат схемы в исходное состояние происходит только после возврата РС ненаправленной ступени, которые имеют такие же уставки, как и РС II ступени.

Если РС II ступени не срабатывают в течение времени ввода, то повторный ввод быстродействующих ступеней возможен только после отсчета выдержки времени элемента $DT9$ (161). Если после отсчета выдержки времени элемента $DT7$ (155), после первого запуска БК от чувствительного реле, срабатывает грубое реле (например, при повторных КЗ, КЗ в цикле качаний и т. п.), то разрешается повторный ввод быстродействующих ступеней на время действия элемента $DT8$ (156). Но в случае, если первый запуск БК был одновременно от чувствительно-

го и грубого реле и по истечении выдержки времени элемента *DT7* (155) происходит срабатывание грубого реле (например, при близких повторных КЗ на линии), то разрешается повторный ввод быстродействующих ступеней на время действия элемента *DT8* (156).

При необходимости (например, малые расчетные токи КЗ) программной накладкой *XB25* можно выбрать режим работы III ступени ДЗ без контроля от устройства БК.

Для обеспечения возможности действия на отключение быстродействующих ступеней ДЗ после включения на КЗ в режиме автоматического повторного включения (АПВ) программной накладкой *XB27* можно разрешить ускоренный возврат схемы БК при отключении выключателя (с контролем сигнала от реле положения «Отключено» *KQT*).

Если ТН установлены на линии, то, при включении ее в режиме опробования на близкое КЗ, работа защиты «По памяти» невозможна. Поэтому после включения выключателя в течение времени 1 с, установленного на элементе *DT21* (11), разрешается действие ДЗ на отключение от ненаправленной ступени через логический элемент И (21) с контролем отсутствия напряжения на линии от реле минимального напряжения $R_{H_{\min}}$ и исправности цепей переменного напряжения от БНН. При включении линии на КЗ, когда появляется напряжение хотя бы на одной фазе ТН, вводится ускорение действия защиты в течение времени 0,1 с, установленного на элементе задержки *DT22* (12). Работа логической схемы ДЗ, учитывающая особенности установки ТН на линии, вводится программной накладкой *XB37*.

При возникновении междуфазных КЗ действует блокировка при качаниях и вводит в работу те ступени ДЗ, для РС которых входные сопротивления будут находиться в пределах области их срабатывания. При отсутствии неисправностей в цепях переменного напряжения и отсчета выдержки времени самой быстродействующей для места возникновения КЗ ступени, сигнал срабатывания через выходной блок защит поступает в узел

отключения схемы АУВ, в результате чего происходит отключение выключателя поврежденной линии.

1.3.3. Расчет параметров дистанционной защиты ЛЭП

Методика расчета параметров дистанционной защиты

Расчет уставок дистанционной защиты в принципе не отличается от традиционной методики, которая приведена в действующих «Руководящих указаниях по релейной защите» [3], и в общем случае сводится к определению:

- сопротивлений срабатывания, характеристик срабатывания цифровых дистанционных органов, выдержек времени и чувствительности отдельных ступеней защиты;
- параметров срабатывания и чувствительности устройства блокировки при качаниях;
- вариантов логики работы защиты путем выбора положения соответствующих программных накладок (ХВ).

Расчет сопротивлений срабатывания измерительных органов дистанционной защиты

Первая и вторая ступени ДЗ

Ниже даны основные рекомендации к расчету первичных сопротивлений срабатывания различных ступеней ДЗ применительно к одиночным (рис. 1.10) и параллельным (рис. 1.11) линиям напряжением 110–220 кВ с одно- и двухсторонним питанием.

Под I ступенью подразумевается ступень без выдержки времени, а под II — ступень с выдержкой времени, равной сумме времени действия устройства резервирования при отказе выключателей и ступени селективности, т. е. $(t_{\text{УРОВ}} + \Delta t)$.

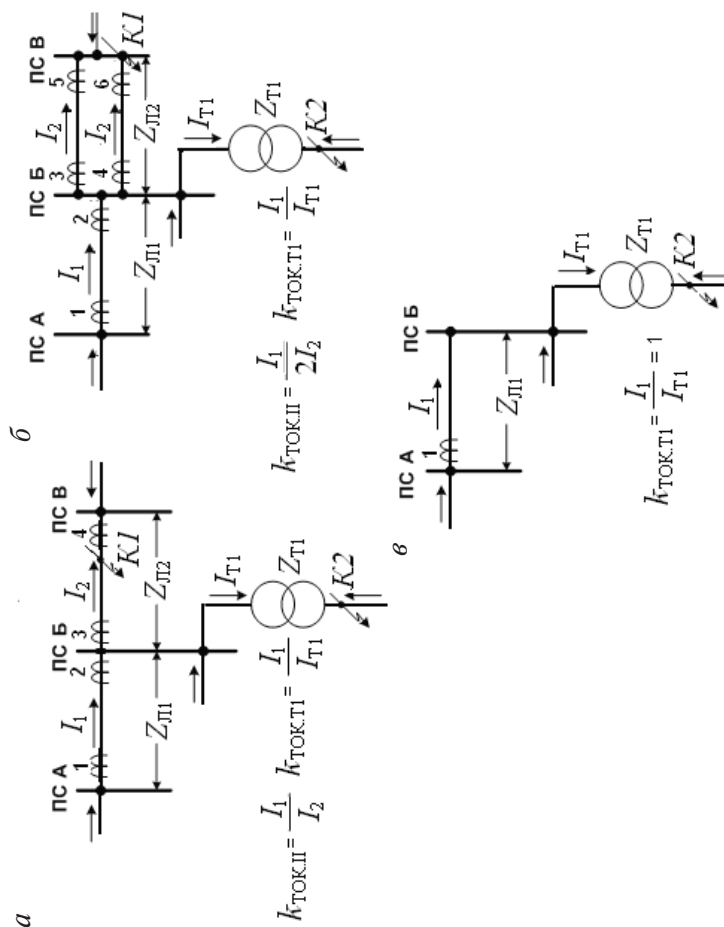


Рис. 1.10. Примеры схем участков электрической сети напряжением 110–220 кВ с одиночными линиями:
 а — одиночные линии с двухсторонним питанием; б — одиночная и две параллельные линии с двухсторонним питанием; в — одиночная тупиковая линия

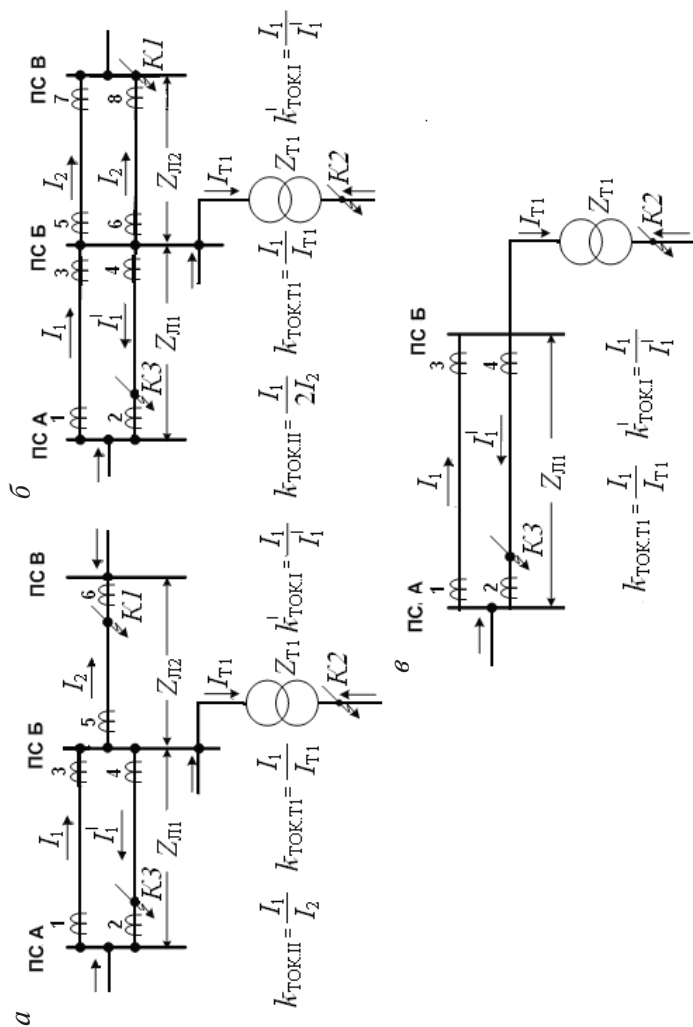


Рис. 1.11. Примеры схем участков электрической сети напряжением 110–220 кВ с параллельными линиями:
а — две параллельные и одиночная линии с двухсторонним питанием; **б** — две параллельные линии с двухсторонним питанием; **а** — две параллельные тупиковые линии

Под параллельными линиями подразумеваются линии, работающие параллельно на обеих примыкающих к ним подстанциях.

Первичное сопротивление срабатывания I ($Z_{сз}^I$) и II ($Z_{сз}^{II}$) ступеней ДЗ выбираются в зависимости от конфигурации защищаемой сети исходя из расчетных условий табл. 1.17 и 1.18 для случаев металлических коротких замыканий. Эти уставки действительны как при использовании защиты в качестве основной, так и в качестве резервной.

За сопротивление срабатывания принимается сопротивление, удовлетворяющее всем расчетным для рассматриваемого случая условиям, т. е. наименьшее из сопротивлений, полученных по соответствующим выражениям табл. 1.17 и 1.18.

В расчетных выражениях табл. 1.17 и 1.18 коэффициент отстройки $k_{отс}$ учитывает погрешность АЦП, трансформаторов напряжения в сторону увеличения защищаемой зоны, неточность расчета электрических величин и необходимый запас. На основании специально проведенных расчетов значение коэффициента отстройки дистанционных органов $k_{отс}$ рекомендуется принять равным 1,15.

Коэффициент α учитывает погрешность трансформаторов тока, напряжения в сторону уменьшения защищаемой зоны и принимается $\alpha = 0,1$.

Коэффициенты токораспределения $k_{ток.I}$, $k_{ток.II}$, $k_{ток.III}$, $k_{ток.IV}$, $k'_{ток.I}$, $k'_{ток.II}$, $k_{ток.T1}$, $k_{ток.T2}$, $k_{ток.T3}$ в расчетных выражениях табл. 1.17 и 1.18 равны отношению первичного тока, протекающего в месте установки защиты, к току в рассматриваемом участке. Они должны выбираться в таком реально возможном режиме работы, которому соответствует наименьшее значение сопротивления в месте установки рассматриваемой защиты. Токи короткого замыкания для определения расчетного $k_{ток}$ могут вычисляться для $t = 0$.

Сопротивления трансформаторов $Z_{Т1}$, входящие в выражения (1.22) табл. 1.18 и (1.24) табл. 1.19, представляют собой ми-

нимально возможные эквивалентные сопротивления, которые могут иметь трансформаторы (автотрансформаторы) при регулировании напряжения изменением их коэффициента трансформации.

Таблица 1.18

Расчетные условия и выражения для определения сопротивлений срабатывания I ступени дистанционной защиты линий 110–220 кВ

Расчетные условия	Рассматриваемая схема	Расчетные выражения
Отстройка от КЗ на шинах подстанции, примыкающей к противоположному концу линии	1.10, а, б 1.11, а, б, в	$Z_{сз.1}^I \leq \frac{Z_{Л1}}{k_{отс}} \quad (1.21)$
Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения тупиковой подстанции, примыкающей к противоположному (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) концу линии	1.10, в	$Z_{сз.1}^I \leq \frac{Z_{Л1} + Z_{Т1}}{k_{отс}} \quad (1.22)$

Сопротивление срабатывания I ступени ДЗ одиночных тупиковых линий в целях повышения чувствительности выбирается из условия отстройки от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения питаемой подстанции — выражение (1.21).

Согласование II ступени ДЗ с I ступенью защиты предыдущей одиночной линии производится по выражению (1.23) табл. 1.19, поскольку сопротивление срабатывания I ступени предыдущей линии, выбранное по выражению (1.21), зависит не только от сопротивления защищаемой линии.

Отстройка сопротивления срабатывания II ступени ДЗ от КЗ на шинах ПС, примыкающей к предыдущему участку, который состоит из двух параллельных линий (см. рис. 1.10, б и 1.11, б), необходима ввиду того, что следует считаться с возможностью вывода из действия или отказа специально предусматриваемой защиты шин.

Таблица 1.19

**Расчетные условия и выражения для определения сопротивлений
срабатывания II ступени дистанционной защиты линий 110–220 кВ**

Расчетные условия	Рассматриваемая схема	Расчетные выражения
Согласование с I ступенью защиты предыдущей линии	1.10, а 1.11, а	$Z_{сз.1}^{II} \leq \frac{1}{k_{отс}} \left(Z_{л1} + \frac{1-\alpha}{k_{ток.II}} Z_{сз.3(5)}^I \right) \quad (1.23)$
Отстройка от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения подстанции, примыкающей к противоположному (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) концу линии	1.10, а, б 1.11, а, б, в	$Z_{сз.1}^{II} \leq \frac{1}{k_{отс}} \left(Z_{л1} + \frac{Z_{Т1}}{k_{ток.Т1}} \right) \quad (1.24)$
Отстройка от КЗ на шинах подстанции, примыкающей к дальнему (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) концу предыдущей линии	1.10, б 1.11, б	$Z_{сз.1}^{II} \leq \frac{1}{k_{отс}} \left(Z_{л1} + \frac{0,5Z_{л2}}{k_{ток.II}} \right)$
Согласование с I ступенью защиты, установленной на противоположном (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) конце параллельной линии, при каскадном отключении повреждения на ней	1.11, а, б	$Z_{сз.1}^{II} \leq \frac{1}{k_{отс}} \left(Z_{л1} + \frac{1-\alpha}{k_{ток.I}^I} Z_{сз.4}^I \right).$

Третья ступень ДЗ

Выбор сопротивления срабатывания III ступени ДЗ аналогичен вышеперечисленным условиям для II ступеней с той лишь разницей, что условия согласования выполняются со II ступенями предыдущих или параллельных линий либо производится отстройка сопротивления срабатывания от минимального значения сопротивления нагрузки в месте установки защиты в послеаварийном максимальном нагрузочном режиме с учетом самозапуска двигателей $Z_{\text{НАГР. РАСЧ}}$. Модуль этого сопротивления определяется по выражению

$$Z_{\text{НАГР. РАСЧ}} = \frac{U_{\text{МИН}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{РАБ. МАКС}}}, \quad (1.25)$$

где $U_{\text{МИН}}$ — минимальное значение первичного напряжения в месте установки защиты в условиях самозапуска двигателей, должно определяться путем расчета (ориентировочно может быть принято $0,8-0,9U_{\text{РАБ. НОРМ}}$); $I_{\text{РАБ. МАКС}}$ — максимальное значение первичного рабочего тока в защищаемой линии в условиях самозапуска электродвигателей потребителей.

Фаза вектора $Z_{\text{НАГР. РАСЧ}}$ определяется фазой тока, протекающего по линии электропередачи. Она зависит от соотношения величин реактивной и активной мощностей, передаваемых по ЛЭП, и определяется следующим образом:

$$\varphi_{\text{НАГР}} = \arctg \frac{Q_{\text{НАГР}}}{P_{\text{НАГР}}}. \quad (1.26)$$

Значения величин реактивной (в числителе) и активной (в знаменателе) мощностей выдаются службой режимов (либо выдаются модуль и фаза тока нагрузки).

Сопротивление срабатывания III ступени ДЗ в этом случае будет

$$Z_{\text{сз}}^{\text{III}} \leq \frac{U_{\text{МИН}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{РАБ. МАКС}} k_{\text{отс}} k_{\text{В}} \cos(\varphi_{\text{Л}} - \varphi_{\text{НАГР}})}, \quad (1.27)$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{отс}} = 1,15 \dots 1,2$; $k_{\text{в}}$ — коэффициент возврата реле сопротивления, $k_{\text{в}} = 1,05$; $\varphi_{\text{л}}$ — угол линии; $\varphi_{\text{нагр}}$ — фаза вектора нагрузки.

В данном случае фаза вектора $Z_{\text{сз}}$ будет соответствовать фазе $Z_{\text{л}}$.

Коэффициент отстройки учитывает погрешности АЦП микропроцессора, измерительных трансформаторов, параметров нагрузочного режима, принятого в качестве расчетного, и необходимый запас.

Задание уставок реле сопротивления

Уставки реле сопротивления каждой из ступеней защиты задаются в соответствии со вторичными значениями сопротивлений срабатывания $R_{\text{уст}}$ и $X_{\text{уст}}$, а также с углами φ_1 – φ_4 их характеристик.

Вторичные значения сопротивлений срабатывания определяются по выражению (1.20) со с. 35. Диапазон изменения параметров, определяющих значения сопротивлений срабатывания и форму характеристик реле сопротивления направленных ступеней ДЗ шкафа ШЭ2607016, указан в табл. 1.14 (с. 48).

Рекомендуемые значения углов φ_1 – φ_4 реле сопротивления: $\varphi_1 = \varphi_{\text{м.ч}}$ (для I ступени $\varphi_{\text{лин}}$); $\varphi_2 = -(10 \dots 15)^\circ$; $\varphi_3 = 130 \dots 135^\circ$; $\varphi_4 = -(5 \dots 10)^\circ$ (только для I ступени ДЗ).

Проверка чувствительности различных ступеней ДЗ

Определяющим условием выбора сопротивления срабатывания II и III ступеней ДЗ является обеспечение ими нормируемой чувствительности в установленной зоне. Коэффициенты чувствительности указанных ступеней защиты определяются по следующим выражениям:

- для II ступени

$$k_{\text{ч}} = \frac{Z_{\text{СЗ}}^{\text{II}}}{Z_{\text{ВЛ}}}, \quad (1.28)$$

- для III ступени

$$k_{\text{ч}} = \frac{Z_{\text{СЗ}}^{\text{III}}}{Z_{\text{ЗАМ}}}, \quad (1.29)$$

где $Z_{\text{СЗ}}$ — модуль сопротивления защищаемой ВЛ; $Z_{\text{ЗАМ}}$ — модуль сопротивления, замеряемый защитой при КЗ в конце предыдущей ВЛ.

Согласно «Правилам устройств электроустановок» (ПУЭ) [4] чувствительность II ступени ДЗ к металлическим междуфазным КЗ в конце линии и на шинах ответвительных питательных сетей (ПС) должна быть не ниже 1,25, а для III ступени ДЗ — не ниже 1,5 при КЗ на своей линии и не ниже 1,2 при КЗ в зоне ее резервирования.

Для правильной работы защиты (обеспечения селективности и чувствительности) необходимо выполнить проверку чувствительности каждой ступени ДЗ по току точной работы при КЗ между тремя фазами в расчетной точке

$$k_{\text{ч.ТР}} = \frac{I_{\text{ЗАЩ.МИН}}}{I_{\text{ТР}} K_{\text{ТТ}}}, \quad (1.30)$$

где $I_{\text{ЗАЩ.МИН}}$ — первичный ток в месте установки защиты при КЗ между тремя фазами в расчетной точке при расчетном минимальном режиме; $I_{\text{ТР}}$ — минимальный ток точной работы устройства на микропроцессорной элементной базе (задается равным $0,1I_{\text{НОМ}}$); $K_{\text{ТТ}}$ — коэффициент трансформации ТТ.

Для II ступени проверка выполняется при КЗ в конце защищаемой линии или на наиболее удаленной отпайке, для III ступени — в конце зоны резервирования в минимальном режиме работы ПС при максимальной подпитке ответвительных ПС (при их наличии).

В соответствии с ПУЭ минимальное значение коэффициента чувствительности $k_{\text{ч.ТР}} = 1,3$ при КЗ в основной зоне срабатывания, $k_{\text{ч}} = 1,2$ при КЗ в зоне резервирования.

Выбор параметров срабатывания устройства блокировки при качаниях

По степени чувствительности к режиму несимметрии токов БК имеет два пусковых органа (реле тока): чувствительный и грубый.

Согласно данным разработчика защиты, диапазоны уставок этих органов БК равны:

- для чувствительного ПО по приращению тока I_2 $(0,04...1,5)I_{\text{НОМ}}$ с шагом 0,01 А, по приращению тока I_1 $(0,08...3)I_{\text{НОМ}}$ с шагом 0,01 А;
- для грубого ПО по приращению тока I_2 $(0,06...2,5)I_{\text{НОМ}}$ с шагом 0,01 А, по приращению тока I_1 $(0,12...5)I_{\text{НОМ}}$ с шагом 0,01 А.

Учитывая высокую чувствительность пусковых органов БК в режимах КЗ, не рекомендуется принимать минимальные значения уставок.

Расчет параметров БК сводится к проверке чувствительности пусковых органов для принятых значений уставок по выражению

$$k_{\text{ч.}I_2}(k_{\text{ч.}I_1}) = \frac{I_{2\text{ защ. мин}}(I_{1\text{ защ. мин}})}{I_{2\text{ уст}}(I_{1\text{ уст}})K_{\text{ТТ}}}, \quad (1.31)$$

где $I_{2\text{ защ. мин}}(I_{1\text{ защ. мин}})$ — минимальные токи обратной (прямой) последовательности в месте установки защиты при КЗ в расчетной точке (конец ВЛ, зона резервирования); $I_{2\text{ уст}}(I_{1\text{ уст}})$ — принятые уставки пусковых органов БК; $K_{\text{ТТ}}$ — коэффициент трансформации ТТ.

Коэффициент чувствительности пусковых органов БК при КЗ в основной зоне должен быть не менее 1,5, в зоне резервирования — не менее 1,2.

Определение времени срабатывания различных ступеней ДЗ

Первая ступень защиты

На линиях сети 110–220 кВ, в которых возможны качания, I ступень ДЗ должна работать через блокировку.

На линиях, не имеющих ответвительных ПС, рекомендовано собственное время срабатывания ступени 0,04 с. На линиях, питающих ответвительные ПС, необходимо вводить небольшое замедление (чтобы дать сработать быстродействующим защита трансформаторов при КЗ в них), прибавляя 0,05 с дополнительно к собственному времени.

Вторая ступень защиты

На линиях сети 110–220 кВ, в которых возможны качания, II ступень ДЗ должна работать:

- через блокировку с меньшей выдержкой времени, если $t_{CЗ} \leq (1 \dots 1,5)$ с, согласованной с выдержками времени блокируемых защит предыдущих линий;
- с большей выдержкой времени, согласованной с выдержками времени неблокируемых защит предыдущих линий.

Степень селективности Δt принимается равной:

- 0,25–0,3 с, если согласуются микропроцессорные защиты;
- 0,4–0,5 с, если согласование выполняется с электромеханическими или статическими (микроэлектронными) защитами.

Третья ступень защиты

Поскольку III ступень выполняет функции дальнего резервирования:

- если III ступень работает при КЗ за трансформаторами ответвительных ПС, то она согласуется по времени с МТЗ на стороне ВН трансформаторов;

- если III степень отстроена от КЗ за трансформаторами ответвительных ПС или на линии нет ответвительных ПС, она должна быть согласована по времени с уставками защит предыдущих или параллельных линий.

Основные требования к логической части ДЗ

При работе дистанционной защиты шкафа ШЭ2607016 необходимо предусмотреть:

- подхват срабатывания I степени ДЗ от ненаправленной II степени (контур «памяти» при близких междуфазных КЗ) установкой накладки *XB21*;
- контроль действия ступеней защиты от БК (установкой накладки *XB22*) и БНН (установкой накладки *XB26*);
- ускоренный возврат БК при отключении выключателей при устойчивом КЗ на предыдущей линии установкой накладки *XB27*;
- ускорение действия II (или III) степени ДЗ при включении выключателя в режиме АПВ или при ручном опробовании линии установкой накладки *XB28*.

Пример расчета параметров дистанционной защиты ВЛ-220 кВ

В примере рассмотрен расчет параметров дистанционной защиты ДЗ1, установленной на линии ВЛ1–220 кВ со стороны ПС 1 (см. рис. 1.5 на с. 36). В расчете используются исходные данные из табл. 1.6–1.8.

Значения токов КЗ и коэффициентов токораспределения, необходимые для расчета параметров дистанционной защиты ВЛ1, приведены в табл. 1.20.

Максимальная мощность нагрузки $S_{\text{нагр}}$, передаваемая по ВЛ-220 ПС 1–ПС 2, $(143,8 + j69,7)$ МВ·А.

Таблица 1.20

**Значения токов КЗ и коэффициентов токораспределения
для расчета ДЗ ВЛ1**

Точка КЗ	Режим работы	Токи в элементах, А			Коэффициенты токораспределения
		ВЛ1	ВЛ2	АТЗ	
КЗ	С4-мин, откл. АТ4	1176	1953	777	$k_{\text{ТОК.1}} = \frac{I_{\text{КЗ.ВЛ1}}}{I_{\text{КЗ.ВЛ2}}} = \frac{1176}{1953} = 0,6$
	Все включено	1009	2199	595	$k_{\text{ТОК.2}} = \frac{I_{\text{КЗ.ВЛ1}}}{I_{\text{КЗ.ВЛ2}}} = \frac{1009}{2199} = 0,46$
К5	С2-мин	1357	1351	1354	$k_{\text{ТОК.АТ}} = \frac{I_{\text{КЗ.ВЛ1}}}{I_{\text{КЗ.АТ}}} = \frac{1357}{1351} = 1,004$

**Расчет сопротивлений срабатывания измерительных органов
дистанционной защиты**

Первая ступень ДЗ

Сопротивление срабатывания I ступени дистанционной защиты определяется по выражению (1.21) из табл. 1.18. Принимая значения коэффициента $k_{\text{ОТС}} = 1,15$ и $Z_{\text{ВЛ1}} = 10 + j43,8 \text{ Ом}$, получим

$$Z_{\text{СЗ.1}}^I \leq \frac{1}{k_{\text{ОТС}}} Z_{\text{ВЛ1}} = \frac{1}{1,15} \cdot (10 + j43,8) = 8,69 + j38,08 = 39,05 \angle 77,15^\circ \text{ Ом.}$$

Принимаем $Z_{\text{СЗ.1}}^I = 8,69 + j38,08 \text{ Ом}$.

Вторая ступень ДЗ

Сопротивление срабатывания II ступени дистанционной защиты определяется исходя из двух условий:

- по согласованию с I ступенью дистанционной защиты предыдущей линии ВЛ2 по выражению (1.23) из табл. 1.19.

Принимая значения коэффициентов $k_{\text{ОТС}} = 1,15$, $\alpha = 0,1$, $k_{\text{ТОК.1}} = 0,6$ и сопротивление срабатывания II ступени ДЗ

$$Z_{\text{СЗ.3}}^{\text{I}} \leq \frac{1}{k_{\text{ОТС}}} Z_{\text{ВЛ2}} = \frac{1}{1,15} \cdot (8,2 + j36) = 7,13 + j31,3 \text{ Ом},$$

получим

$$\begin{aligned} Z_{\text{СЗ.1}}^{\text{II}} &\leq \frac{1}{k_{\text{ОТС}}} |Z_{\text{ВЛ1}} + \frac{1-\alpha}{k_{\text{ТОК.1}}} Z_{\text{СЗ.3}}^{\text{I}}| = \\ &= \frac{1}{1,15} \cdot |10 + j43,8 + \frac{0,9}{0,6} \cdot (7,13 + j31,3)| = \\ &= 20,69 + j90,75 = 93,08 \angle 77,15^\circ \text{ Ом}; \end{aligned}$$

- по отстройке от КЗ в точке К5 на шинах среднего напряжения автотрансформаторов ПС Б по выражению (1.24) из табл. 1.19.

Принимая значения коэффициентов $k_{\text{ОТС}} = 1,15$, $k_{\text{ТОК.АТ}} = 1,17$ и сопротивление обмоток высшего и среднего напряжений автотрансформатора

$$\begin{aligned} Z_{\text{АТ}} &= Z_{\text{В.АТ}} + Z_{\text{С.АТ}} = \\ &= (0,55 + j59,2) + (0,48 - j12,69) = 1,03 + j46,51 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

получим

$$\begin{aligned} Z_{\text{СЗ.1}}^{\text{II}} &\leq \frac{1}{k_{\text{ОТС}}} |Z_{\text{ВЛ1}} + \frac{Z_{\text{АТ}}}{k_{\text{ТОК.АТ}}}| = \frac{1}{1,15} \cdot |10 + j43,8 + \frac{1,03 + j46,51}{1,004}| = \\ &= 9,58 + j80,96 = 81,5 \angle 83,3^\circ \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Принимаем $Z_{\text{СЗ1}}^{\text{II}} = 9,58 + j80,96 \text{ Ом}$.

Коэффициент чувствительности II ступени ДЗ1 определяется по выражению (1.28)

$$k_{\text{ч}} = \frac{Z_{\text{СЗ.1}}^{\text{II}}}{Z_{\text{ВЛ.1}}} = \frac{81,5}{44,9} = 1,82 > 1,25,$$

где $Z_{\text{ВЛ.1}}$ — модуль сопротивления ВЛ1, $Z_{\text{ВЛ.1}} = 44,9 \text{ Ом}$.

Третья ступень ДЗ

Для расчета сопротивления срабатывания III ступени защиты используем условие отстройки от минимально возможного значения сопротивления нагрузки в месте установки защиты. Модуль этого сопротивления определяется по выражению (1.25)

$$Z_{\text{НАГР.ПАСЧ}} = \frac{U_{\text{МИН}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{РАБ.МАКС}}} = \frac{0,9 \cdot 220 \, 000}{\sqrt{3} \cdot 420} = 272,5 \, \text{Ом.}$$

Фаза вектора $Z_{\text{НАГР. ПАСЧ}}$ определяется по выражению (1.28)

$$\varphi_{\text{НАГР}} = \arctg \frac{Q_{\text{НАГР}}}{P_{\text{НАГР}}} = \arctg \frac{69,7}{143,8} = 25,8^\circ.$$

Сопротивление срабатывания III ступени ДЗ1 определяется по выражению (1.27). Принимая значения $I_{\text{РАБ. МАКС}} = 420 \, \text{А}$, $k_{\text{ОТС}} = 1,2$, $k_{\text{В}} = 1,05$, $\varphi_{\text{Л}} = 77,1^\circ$ и $\varphi_{\text{НАГР}} = 25,8^\circ$, получим

$$\begin{aligned} Z_{\text{сз.АТ}}^{\text{IV}} &\leq \frac{U_{\text{МИН}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{РАБ.МАКС}} k_{\text{отс}} k_{\text{В}} \cos(\varphi_{\text{Л}} - \varphi_{\text{НАГР}})} = \\ &= \frac{0,9 \cdot 220 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 420 \cdot 1,2 \cdot 1,05 \cdot 0,625} = 346 \, \text{Ом.} \end{aligned}$$

Модулю этого сопротивления соответствует угол $\varphi_{\text{Л}} = 77,1^\circ$. Поэтому комплексное значение $Z_{\text{сз1}}^{\text{II}} = 77,24 + j337,27 \, \text{Ом}$.

Принимаем $Z_{\text{сз1}}^{\text{II}} = 77,24 + j337,27 \, \text{Ом}$.

Коэффициент чувствительности III ступени ДЗ1 определяется по выражению (1.29)

$$k_{\text{ч}} = \frac{Z_{\text{сз.1}}^{\text{III}}}{Z_{\text{ЗАМ}}} = \frac{346}{125,1} = 2,7 > 1,2,$$

где $Z_{\text{ЗАМ}}$ — модуль сопротивления, замеряемый защитой при КЗ в конце ВЛ2, $Z_{\text{ЗАМ}} = Z_{\text{ВЛ1}} + Z_{\text{ВЛ2}}/K_{\text{ТОК.2}} = 44,9 + 36,9/0,46 = 125,1 \, \text{Ом}$.

Чувствительность реле сопротивления III ступени ДЗ по току точной работы и чувствительность пусковых органов БК про-

веряем при КЗ в конце ВЛЗ (точка КЗ) в минимальном режиме работы систем С1 и С3.

Примем уставки пусковых органов БК по току срабатывания:

- для чувствительного ПО $I_{2\text{УСТ}} = 0,1I_{\text{НОМ}} = 0,1 \cdot 5 = 0,5 \text{ А}$;

$$I_{1\text{УСТ}} = 0,1I_{\text{НОМ}} = 0,1 \cdot 5 = 0,5 \text{ А};$$

- для грубого ПО $I_{2\text{УСТ}} = 0,15I_{\text{НОМ}} = 0,15 \cdot 5 = 0,75 \text{ А}$;

$$I_{1\text{УСТ}} = 0,15I_{\text{НОМ}} = 0,15 \cdot 5 = 0,75 \text{ А}.$$

Ток точной работы реле сопротивления III ступени дистанционной защиты $I_{\text{ТР}} = 0,1I_{\text{НОМ}} = 0,5 \text{ А}$.

Значения токов КЗ и результаты расчета $k_{\text{ч.ТР}}$ для III ступени ДЗ и $k_{\text{ч}}$ для чувствительного и грубого пусковых органов БК по выражениям (1.30) и (1.31) при коротких замыканиях в точке КЗ приведены в табл. 1.21.

Таблица 1.21

**Токи КЗ и коэффициенты чувствительности $k_{\text{ч.ТР}}$ и $k_{\text{ч}}$
для ПО блокировки при качаниях ДЗ**

Вид КЗ	Токи КЗ, А			Коэффициент чувствительности				
	$I_{\text{КЗ. мин}}$	$I_{2\text{КЗ. мин}}$	$I_{1\text{КЗ. мин}}$	$k_{\text{ч.ТР}}$	$k_{\text{чД}}$		$k_{\text{чЛ}}$	
					чувств.	грубо- го	чувств.	гру- бого
$K^{(3)}$	726	—	—	12,1	—	—	—	—
$K^{(1)}$	—	117	117	—	1,95	1,3	1,95	1,21

Коэффициенты чувствительности ПО блокировки при качаниях превышают минимально допустимое значение, равное 1,2.

Приведение первичных параметров срабатывания реле сопротивления дистанционных защит ко вторичным цепям ТТ и ТН

Вторичные параметры срабатывания реле сопротивления (уставки по сопротивлению срабатывания) различных ступеней ДЗ определяются по выражению (1.20) со с. 35.

При заданных значениях $K_{\text{ТТ}} = 600/5$ и $K_{\text{ТН}} = 220000/100$ имеем:

- для I ступени $R_{\text{УСТ}} = 0,47 \text{ Ом}$, $X_{\text{УСТ}} = 2,07 \text{ Ом}$;
- для II ступени $R_{\text{УСТ}} = 0,54 \text{ Ом}$, $X_{\text{УСТ}} = 4,01 \text{ Ом}$;
- для III ступени $R_{\text{УСТ}} = 4,2 \text{ Ом}$, $X_{\text{УСТ}} = 18,38 \text{ Ом}$.

Принятые значения уставок дистанционной защиты ВЛ1-220 ПС 1–ПС 2 шкафа ШЭ2607 016 по сопротивлению срабатывания приведены ниже.

Наименование уставки	Значение
Уставка по оси X характеристики РС I ступени, Ом (0,2–100, шаг 0,01)	2,07
Уставка по оси R характеристики РС I ступени, Ом (0,2–100, шаг 0,01)	0,47
Угол наклона φ_1 характеристики РС I ступени, ° (45–89, шаг 1,0)	77,1
Угол наклона φ_4 верхней части характеристики РС I ступени, ° (–45...0, шаг 1)	–5
Уставка по оси X характеристики РС II ступени, Ом (0,2–100, шаг 0,01)	4,01
Уставка по оси R характеристики РС II ступени, Ом (0,2–100, шаг 0,01)	0,54
Угол наклона φ_1 характеристики РС II ступени, ° (45–89, шаг 1,0)	77,1
Угол наклона φ_3 нижней левой части характеристик РС I и II ступени, ° (91–179, шаг 1)	105
Угол наклона φ_2 нижней правой части характеристик РС I и II ступени, ° (–89...0, шаг 1)	–10
Уставка по оси X характеристики РС III ступени, Ом (0,2–100, шаг 0,01)	18,38
Уставка по оси R характеристики РС III ступени, Ом (0,2–100, шаг 0,01)	4,2
Угол наклона φ_1 характеристики РС III ступени (45–89, шаг 1)	77,1
Угол наклона φ_3 нижней левой части характеристики РС III ступени, ° (91–179, шаг 1)	105
Угол наклона φ_2 нижней правой части характеристики РС III ступени, ° (–89...+89, шаг 1)	20

Уставки по времени срабатывания различных ступеней ДЗ

Время действия I ступени принимаем равным 0,05 с.

Время действия II ступени с меньшей выдержкой времени согласуется с выдержками времени блокируемых защит предыдущих линий

$$t_{C3,1}^{II} = t_{C3,3}^I + t_{УРОВ} + \Delta t = 0,05 + 0,25 + 0,3 = 0,6 \text{ с.}$$

Время действия II ступени с большей выдержкой времени согласуется с выдержками времени неблокируемых защит предыдущих линий

$$t_{C3,1}^{II} = t_{C3,3}^{II} + \Delta t = 1,1 + 0,3 = 1,4 \text{ с.}$$

Время действия III ступени должно быть согласовано с уставками МТЗ на стороне ВН автотрансформаторов ПС 2 и временем действия III ступени ДЗ ВЛ2. Принимаем уставку по времени для III ступени ДЗ ВЛ1 равной 4 с.

Принятые значения уставок дистанционной защиты ВЛ1–220 ПС 1 — ПС 2 шкафа ШЭ2607 016 по времени срабатывания приведены в табл. 1.22.

Таблица 1.22

Уставки по времени срабатывания защиты

Номер элемента задержки	Назначение уставки	Значение t_{C3} , с
DT30	Уставка на срабатывание I ступени ДЗ (0,000–15,000, шаг 0,001)	0,05
DT1	Уставка на срабатывание II ступени ДЗ с меньшей выдержкой времени (0,05–15,00, шаг 0,01)	0,6
DT2	Уставка на срабатывание II ступени ДЗ с большей выдержкой времени (0,05–15,00, шаг 0,01)	1,4
DT3	Уставка на срабатывание III ступени ДЗ (0,05–15,00, шаг 0,01)	4,00
DT4	Уставка на срабатывание II (III) ступени ДЗ при оперативном ускорении (0,05–5,00, шаг 0,01)	0,1

1.3.4. Устройство и работа токовых защит шкафа ШЭ2607 016

Токовые защиты шкафа ШЭ2607 016 включают четырехступенчатую токовую направленную защиту нулевой последовательности и токовую отсечку.

Токовая направленная защита нулевой последовательности

Токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП) предназначена для действий при КЗ на землю. Схема ТНЗНП содержит:

- четыре направленных токовых ступени;
- два реле направления мощности нулевой последовательности (РНМНП);
- логическую часть.

Измерительные и пусковые органы ТНЗНП

Каждая из ступеней ТНЗНП содержит реле тока, реагирующее на ток нулевой последовательности. Диапазон регулирования уставок по току срабатывания реле тока всех ступеней ТНЗНП 0,05—30 $I_{ном}$. Средняя основная погрешность по току срабатывания реле тока ТНЗНП составляет не более 5 % от уставки.

Для обеспечения направленности ТНЗНП используются два РНМНП:

- разрешающее, которое срабатывает при направлении мощности нулевой последовательности от линии к шинам, т. е. при КЗ на защищаемой ВЛ;
- блокирующее, которое срабатывает при обратном направлении мощности нулевой последовательности, т. е. при КЗ на смежных элементах.

Порог срабатывания разрешающего и блокирующего реле по току $3I_0$ (I_{CP}) регулируется в пределах $0,04–0,50 I_{НОМ}$, а по напряжению $3U_0$ (U_{CP}) – $0,5–5$ В.

Уставки РНМНП по углу максимальной чувствительности при утроенных по отношению к порогам срабатывания значениях тока и напряжения: у разрешающего реле 250° , у блокирующего — 70° . При этом обеспечивается минимальная угловая ширина зон срабатывания разрешающего и блокирующего РНМНП не менее 160° .

Функциональная схема логической части ТНЗНП и ТО

Упрощенная функциональная схема логической части ТНЗНП и ТО показана на рис. 1.12 и 1.13.

В табл. 1.23 перечислены программные накладки с указанием их положения, а в табл. 1.24 приведены наименования и назначения элементов задержки в функциональной схеме логической части ТНЗНП и ТО.

Таблица 1.23

Наименование и назначение программных накладок ТНЗНП и ТО

Наименование	Назначение	Положение	Значение по умолчанию
XB41	Автоматический вывод направленности при срабатывании ТНЗНП	0 — не предусмотрен	Не предусмотрен
		1 — предусмотрен	
XB42	Автоматический вывод направленности при включении выключателя	0 — не предусмотрен	Не предусмотрен
		1 — предусмотрен	
XB44	Контроль направленности I ступени ТНЗНП	1 — не предусмотрен	Не предусмотрен
		0 — предусмотрен	
XB45	Контроль направленности II ступени ТНЗНП	1 — не предусмотрен	Не предусмотрен
		0 — предусмотрен	
XB46	Контроль направленности III ступени ТНЗНП	1 — не предусмотрен	Предусмотрен
		0 — предусмотрен	
XB47	Контроль направленности IV ступени ТНЗНП	1 — не предусмотрен	Не предусмотрен
		0 — предусмотрен	

Окончание табл. 1.23

Наименование	Назначение	Положение	Значение по умолчанию
XB48	Направленность III ступени ТНЗНП	1 — от РНМр и РНМб	От РНМр
		0 — от РНМр	
XB49	Направленность IV ступени ТНЗНП	1 — от РНМр и РНМб	От РНМр
		0 — от РНМр	
XB50	Ускорение действия II или III ступени ТНЗНП при включении выключателя	0 — не предусмотрен	Предусмотрен
		1 — предусмотрен	
XB51	Ускоряемая ступень при включении выключателя	0 — III ступень	III ступень
		1 — II ступень	
XB53	Действие токовой отсечки	0 — при включении выключателя	Постоянно
		1 — постоянно	
XB54	Оперативно ускоряемая ступень ТНЗНП	0 — III ступень	III ступень
		1 — IV ступень	

Таблица 1.24

Наименование и назначение элементов задержки ТНЗНП и ТО

Наименование	Назначение	Диапазон, с
DT10	Время ввода ускорения II или III ступени ТНЗНП при включении выключателя	0,7–2,0
DT11	Задержка на срабатывание I ступени ТНЗНП	0,01–15
DT12	Задержка на срабатывание II ступени ТНЗНП	0,05–15
DT13	Задержка на срабатывание III ступени ТНЗНП	0,05–15
DT14	Задержка на срабатывание IV ступени ТНЗНП	0,05–15
DT15	Задержка на срабатывание ускорения II или III ступени ТНЗНП при включении выключателя	0,05–5
DT16	Задержка на срабатывание ТНЗНП при ОУ	0,05–5
DT18	Задержка на срабатывание ускорения ТНЗНП от защиты параллельной линии	0,05–5
DT20	Задержка на подхват ТНЗНП при срабатывании защит	0,005
DT27	Задержка на срабатывание токовой отсечки	0,0–1,0

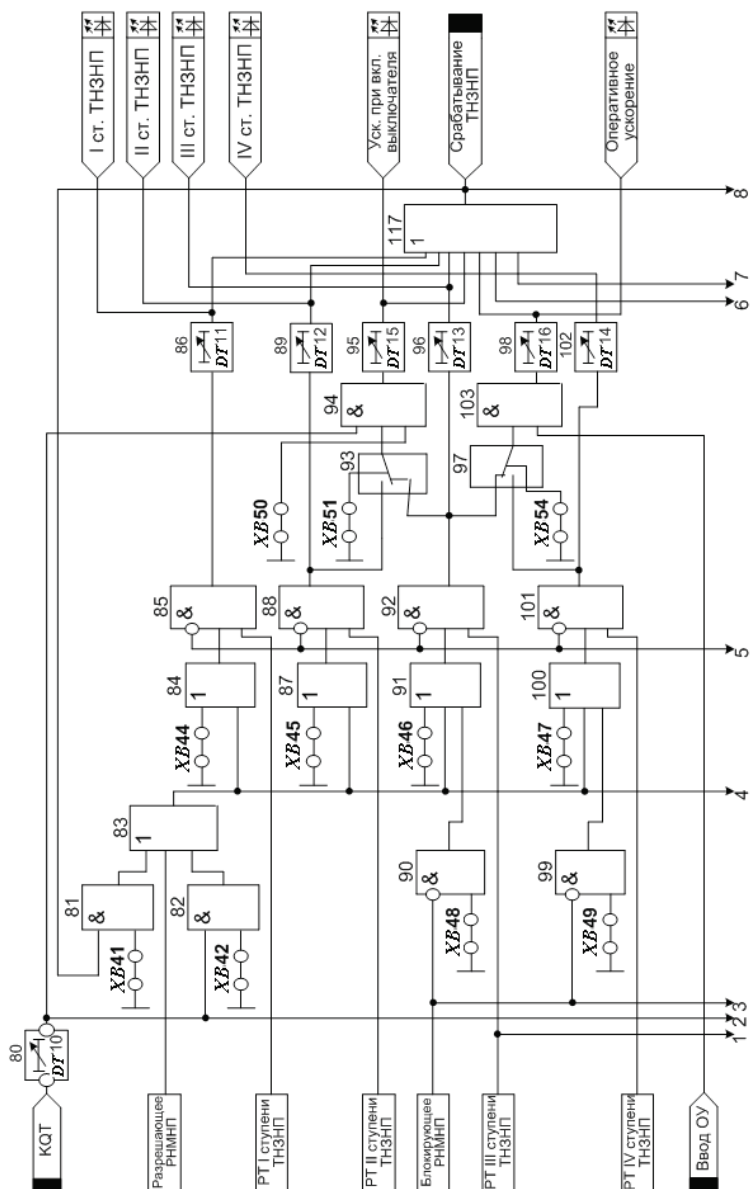


Рис. 1.12. Упрощенная функциональная схема логической части ТНЗНП и ТО ЛЭП терминала БЭ2704У016

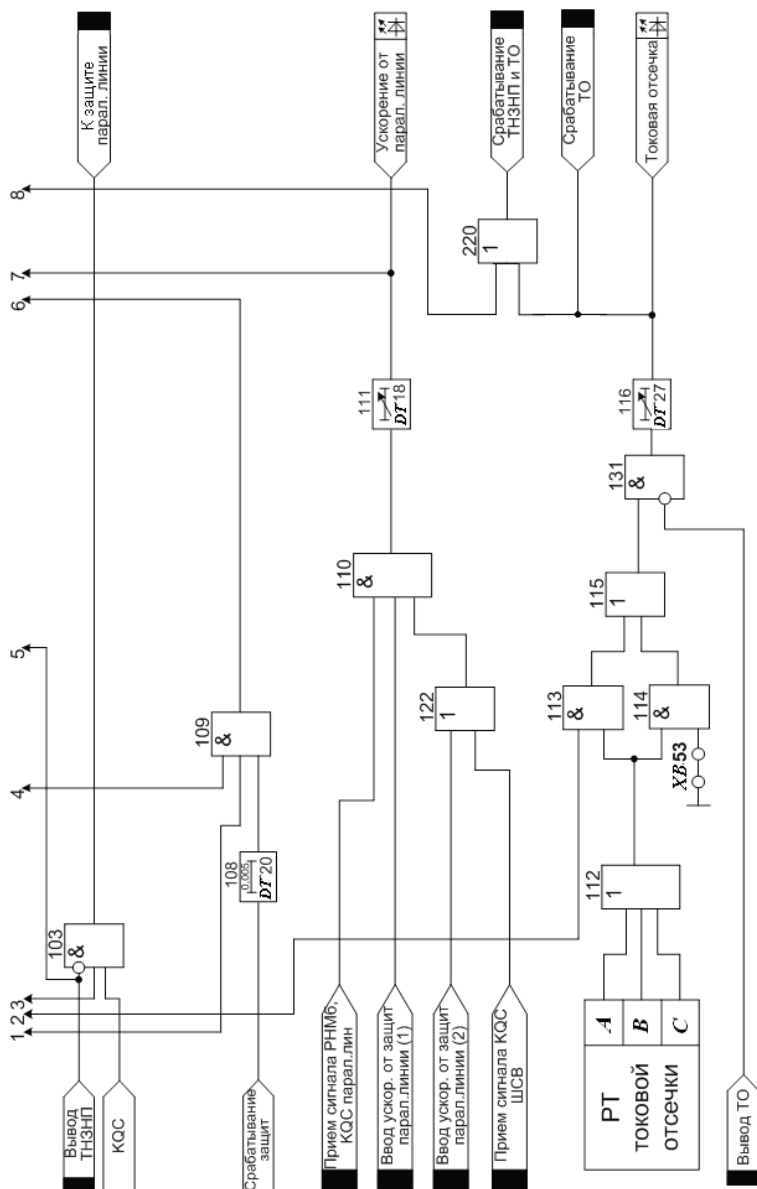


Рис. 1.13. Упрощенная функциональная схема логической части ТНЗНП и ТО ЛЭП терминала БЭ2704V016

Логическая схема ТНЗНП принимает сигналы от реле тока I, II, III и IV ступеней, двух реле направления мощности (разрешающего и блокирующего) и сигналы контроля цепи включения от реле положения выключателя «Отключено» *KQT* и контроля цепи отключения от реле положения выключателя «Включено» *KQC*.

Реле тока ТНЗНП реагируют на ток нулевой последовательности, который рассчитывается по фазным токам. Реле направления мощности реагирует на изменение величин векторов тока и напряжения нулевой последовательности, а также на угол сдвига между ними.

Действие различных ступеней ТНЗНП осуществляется следующим образом:

- по цепи I ступени через логический элемент ЗАПРЕТ (85) и элемент задержки *DT11* (86);
- по цепи II ступени через логический элемент ЗАПРЕТ (88) и элемент задержки *DT12* (89);
- по цепи III ступени через логический элемент ЗАПРЕТ (92) и элемент задержки *DT13* (96);
- по цепи IV ступени через логический элемент ЗАПРЕТ (101) и элемент задержки *DT14* (102).

Возможно ускорение действия II или III ступени ТНЗНП при включении выключателя с помощью программной накладки *XB50* через логический элемент И (94) и элемент задержки *DT15* (95). Время действия ступени при ускорении определяется выдержкой времени *DT15* (95), время ввода ускорения — выдержкой времени *DT10* (80), а ускоряемая ступень выбирается программной накладкой *XB51* с помощью программного переключателя (93).

Возможно оперативное ускорение действия III или IV ступени ТНЗНП через программный переключатель 97, логический элемент И (103) и элемент задержки *DT16* (98) при установленной программной накладке *XB54* и подаче сигнала со входа «Ввод ОУ» на логический элемент И (103).

Сигнализация о срабатывании каждой ступени ТНЗНП осуществляется соответствующим светодиодным индикатором, а действие всех ступеней защиты на отключение производится через логический элемент ИЛИ (117).

Вывод защиты из работы производится подачей единичного сигнала с входа «Вывод ТНЗНП» на инверсные входы логических элементов ЗАПРЕТ (85), (88), (92) и (101). На входы этих же элементов поступают сигналы от реле тока I, II, III и IV ступеней соответственно и сигналы с выходов логических элементов ИЛИ (84), (87), (91) и (100) о работе разрешающего и блокирующего реле направления мощности.

Направленность действия I и II ступеней ТНЗНП обеспечивается разрешающим РНМНП, а III и IV ступеней — как разрешающим, так и блокирующим РНМНП (при срабатывании разрешающего или несрабатывании блокирующего реле), которые действуют через логические элементы ИЛИ (91) и ИЛИ (100). Способ контроля направленности III и IV ступеней определяется программными накладками *XB48*, *XB49*.

Каждая из ступеней ТНЗНП может работать как направленная, так и ненаправленная, что определяется положением программных накладок *XB44*, *XB45*, *XB46* и *XB47* соответственно для I, II, III, IV ступеней.

Предусмотрена возможность автоматического вывода на направленности всех ступеней ТНЗНП:

- при появлении сигнала срабатывания защиты на выходе элемента ИЛИ (117), объединяющего сигналы срабатывания всех ступеней ТНЗНП, через логические элементы И (81) и ИЛИ (83) при установленной накладке *XB41*;
- в режиме ускорения при включении выключателя от реле положения выключателя «Отключено» *KQT* при установленной накладке *XB42*.

В первом случае обеспечивается устойчивое состояние срабатывания ТНЗНП при неполнофазном отключении выключателя, что необходимо для действия УРОВ, а во втором — сраба-

тывание ТНЗНП при неполнофазном включении выключателя. Вывод направленности при включении выключателя производится на время, задаваемое выдержкой времени $DT10$ (80).

Для обеспечения быстрого отключения выключателя при переходе междуфазного КЗ, вызвавшего срабатывание ДЗ в КЗ на землю, предусмотрена возможность ускорения III ступени ТНЗНП при появлении сигнала о срабатывании защит. Данное ускорение осуществляется с выдержкой времени, установленной на элементе задержки $DT20$ (108), и с контролем направленности от разрешающего РНМНП через логический элемент И (109) при срабатывании реле тока III ступени.

Ступени ТНЗНП действуют с выдержками времени $DT11$ (86), $DT12$ (89), $DT13$ (96), $DT14$ (102) для I, II, III, IV ступеней соответственно.

При КЗ на землю работают реле тока соответствующих ступеней ТНЗНП и, если обеспечиваются условия направленности, ступень с меньшей выдержкой времени подействует в те же цепи, что и дистанционная защита терминала.

Токовая отсечка

Токовая отсечка предназначена для действия при близких КЗ. Схема токовой отсечки содержит:

- три фазных реле максимального тока;
- логическую часть.

Реле максимального тока ТО реагируют на фазные токи.

Предусмотрен диапазон уставок по току срабатывания реле максимального тока $ТО\ 0,35–30I_{ном}$.

Средняя основная погрешность по току срабатывания реле максимального тока ТО не превышает $(\pm 5)\%$ от уставки.

Логическая схема ТО (см. рис. 1.13) принимает сигналы от трех фазных реле тока и сигнал контроля цепи включения от реле положения выключателя «Отключено» KQT .

При срабатывании любого реле тока ТО действует на светодиодную сигнализацию и на выходной блок защит через логические элементы ИЛИ (112), И (113) или И (114), ИЛИ (115), элемент ЗАПРЕТ (131), элемент задержки *DT27* (116) и логические элементы ИЛИ (220) и (117). С помощью программной накладки *XB53* токовая отсечка может быть задействована постоянно или только при включении выключателя. В последнем случае ТО вводится в работу после включения выключателя только на время, установленное на элементе задержки *DT10* (80).

1.3.5. Расчет параметров токовой направленной защиты нулевой последовательности и трехфазной токовой отсечки

Методика расчета параметров ТНЗНП линий 110–220 кВ с двусторонним питанием без ответвлений

Расчеты значений тока и времени срабатывания, проверка чувствительности отдельных ступеней микропроцессорной ТНЗНП от замыканий на землю аналогичны расчетам указанных параметров соответствующей защиты, выполненной на электромеханических или статических реле. При выполнении расчетов необходимо пользоваться действующими «Руководящими указаниями по релейной защите» [5].

Расчет параметров ступенчатой ТНЗНП в общем случае сводится к определению:

- тока срабатывания и времени срабатывания отдельных ступеней защиты;
- необходимости использования в защите реле направленной мощности;
- коэффициентов чувствительности отдельных ступеней защиты.

Первая ступень ТНЗНП

Ток срабатывания первой ступени защиты при выполнении ее без выдержки времени определяется из условий отстройки его от утроенного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты:

- при замыкании на землю на шинах противоположной подстанции

$$I_{0\text{ с.з}}^I \geq k_{\text{отс}} \cdot 3I_{0\text{ макс}}, \quad (1.32)$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчета, влияние апериодической составляющей и необходимый запас, $k_{\text{отс}} = 1,3$; $3I_{0\text{ макс}}$ — максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты при замыкании на землю на шинах противоположной подстанции;

- при кратковременных неполнофазных режимах, возникающих при одновременном включении одной или двух фаз выключателя или в цикле ОАПВ на защищаемой линии или смежной линии

$$I_{0\text{ с.з}}^I \geq k_{\text{отс}} \cdot 3I_{0\text{ неп}}, \quad (1.33)$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{отс}} = 1,3$; $3I_{0\text{ неп}}$ — максимальное значение утроенного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты в неполнофазном режиме.

Последнее условие не рассматривается, если первая ступень защиты отстроена по времени от неполнофазного режима (время срабатывания I ступени защиты больше времени включения выключателя) или при наличии однофазного АПВ (ОАПВ) I ступень защиты блокируется в цикле ОАПВ.

При использовании выключателей с трехфазным приводом защита практически отстроена от рассматриваемого неполно-

фазного режима собственным временем срабатывания без дополнительного замедления.

Проверка чувствительности I ступени производится по выражению

$$k_{\text{ч}} = 3I_{0 \text{ РАСЧ}} / I_{0 \text{ С.З.}}^{\text{I}}, \quad (1.34)$$

где $3I_{0 \text{ РАСЧ}}$ — ток, проходящий через защиту при замыкании на землю в начале ВЛ в минимальном режиме работы системы. Значение коэффициента чувствительности должно быть не менее 1,2 согласно ПУЭ [4].

Для ВЛ без ОАПВ, если выбранная уставка по току удовлетворяет условию отстройки от кратковременного неполнофазного режима, возникающего при одновременном включении одной или двух фаз выключателя, то защиту следует выполнять без выдержки времени.

Вторая ступень ТНЗНП

Ток срабатывания II ступени защиты определяется из следующих условий:

- отстройки от утроенного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты при замыканиях на землю за предыдущим автотрансформатором на стороне его смежного напряжения, которая примыкает к сети с глухозаземленной нейтралью,

$$I_{0 \text{ СЗ}}^{\text{II}} \geq k_{\text{ОТС}} \cdot 3I_{0 \text{ ЗАМ}}, \quad (1.35)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, принимаемый 1,3 для линий 330–500 кВ и 1,2 для всех остальных случаев; $3I_{0 \text{ ЗАМ}}$ — максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты при замыкании на землю за автотрансформатором противоположной подстанции на стороне его, которая примыкает к сети с глухозаземленной нейтралью;

- согласование с I степенью защиты предыдущей линии или защиты от замыканий на землю предыдущего автотрансформатора, установленной на стороне смежного напряжения, (последнее производится вместо первого условия, если это необходимо для повышения чувствительности защиты)

$$I_{0\text{ СЗ}}^{\text{II}} \geq k_{\text{ОТС}} k_{\text{ТОК}} 3I_{0\text{ СЗ ПР}}^{\text{I}}, \quad (1.36)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас, принимается равным 1,1; $k_{\text{ТОК}}$ — максимальный коэффициент токораспределения, равный отношению токов в месте установки защиты и защиты, с которой производится согласование, при замыкании на землю в конце предыдущего элемента; $3I_{0\text{ СЗ ПР}}^{\text{I}}$ — ток срабатывания ступени защиты предыдущего элемента, с которой производится согласование.

В целях повышения чувствительности может оказаться целесообразным согласовать II ступень не с I, а со II степенью защиты предыдущей линии.

Выдержка времени II ступени защиты должна быть согласована с выдержками времени тех ступеней защит предыдущих элементов, с которыми производится согласование по току с учетом выдержки времени устройства резервирования при отказе выключателей. Выдержка времени II ступени выбирается с учетом времени действия защит и УРОВ элементов, с которыми производится согласование,

$$t_{\text{СЗ}}^{\text{II}} = t_{\text{СЗ.ПР}} + t_{\text{УРОВ}} + t_{\text{ОВ}} + \Delta t, \quad (1.37)$$

где $t_{\text{СЗ.ПР}}$ — максимальное значение из времен срабатывания защит, с которыми необходимо производить согласование; $t_{\text{УРОВ}}$ — время действия УРОВ смежных присоединений; $t_{\text{ОВ}}$ — собственное время отключения выключателей; Δt — степень селективности, которую рекомендуется принимать:

- 0,25—0,3 с, если согласуются микропроцессорные защиты;
- 0,4—0,5 с, если согласование выполняется с электромеханическими или статическими (микроэлектронными) защитами.

Допускается не учитывать $t_{\text{УРОВ}}$, если действие УРОВ смежного присоединения приводит к отключению защищаемой линии.

Определение коэффициента чувствительности II степени производится по выражению

$$k_{\text{Ч}} = 3I_{0\text{ мин}} / I_{0\text{ с.з.}}^{\text{II}}, \quad (1.38)$$

где $3I_{0\text{ мин}}$ — минимальный ток, проходящий через защиту при замыкании на землю в конце защищаемой ВЛ.

В соответствии с требованиями ПУЭ для токовых реле ступенчатой ТНЗНП должны обеспечиваться следующие минимальные коэффициенты чувствительности:

- при замыкании на землю в конце защищаемой линии без учета резервного действия — около 1,5, а при наличии надежно действующей резервной ступени — около 1,3;
- при наличии на противоположной подстанции защиты шин допускается иметь коэффициент чувствительности в режиме каскадного отключения 1,5;
- при замыкании на землю в конце зоны резервирования в режиме каскадного отключения повреждения для последней ступени защиты — не менее 1,2.

Если выбранная уставка не обеспечивает требования чувствительности, эта функция возлагается на III степень ТНЗНП.

Третья степень ТНЗНП

Ток срабатывания II степени защиты при выполнении ее направленной, а также ускоряемой в режиме сравнения направлений, при АПВ и ручном включении определяется из следующих условий:

- согласование со II или III степенями ТНЗНП предыдущих линий (последнее в случае, если при согласовании со II степенью ТНЗНП не обеспечивается требование чувствительности) по выражению

$$I_{0\text{СЗ}}^{\text{III}} \geq k_{\text{ОТС}} k_{\text{ТОК}} \cdot 3I_{0\text{СЗ ПР}}^{\text{II(III)}}, \quad (1.39)$$

где коэффициенты $k_{\text{ОТС}}$ и $k_{\text{ТОК}}$ соответствуют приведенным в выражении (1.36); $3I_{0\text{СЗ ПР}}^{\text{II(III)}}$ — ток срабатывания II (III) ступени защиты предыдущей линии;

- согласование с III степенью защиты от КЗ на землю предыдущего автотрансформатора, установленной на стороне смежного напряжения, которая примыкает к сети с глухозаземленной нейтралью, по выражению

$$I_{0\text{СЗ}}^{\text{III}} \geq k_{\text{ОТС}} k_{\text{ТОК}} \cdot 3I_{0\text{СЗ АТ}}^{\text{III}}, \quad (1.40)$$

где коэффициенты $k_{\text{ОТС}}$ и $k_{\text{ТОК}}$ соответствуют приведенным в выражении (1.36); $3I_{0\text{СЗ АТ}}^{\text{III}}$ — ток срабатывания III ступени защиты от КЗ на землю предыдущего автотрансформатора;

- обеспечение чувствительности при КЗ на землю в конце защищаемой линии через переходное сопротивление

$$I_{0\text{СЗ}}^{\text{III}} \leq 3I_{0\text{МИН}} / k_{\text{Ч}},$$

где $3I_{0\text{МИН}}$ — минимальный ток, проходящий через защиту при однофазном и двухфазном КЗ на землю в конце защищаемой линии через переходное сопротивление $R_{\text{ПЕР}} = R_{\text{ПЕР. РАСЧ}}$ в минимальном режиме; $k_{\text{Ч}}$ — коэффициент чувствительности, равный 1,5.

Для линий напряжением 110–220 кВ с заземлением грозозащитного троса на каждой опоре, а также при однофазных КЗ на шинах ПС (в зоне контура заземления ПС) $R_{\text{ПЕР. РАСЧ}}$ принимается равным 5 Ом.

Выдержка времени III ступени защиты должна быть согласована с выдержками времени II ступеней защит предыдущих

элементов согласно выражению (1.38). При этом выдержка времени УРОВ учитывается, если степень защиты, предыдущая по отношению к той, с которой производится согласование, охватывает защищаемый участок с коэффициентом чувствительности менее 1,3. Допускается не учитывать выдержку времени УРОВ при наличии на предыдущем участке основной быстродействующей защиты (например, высокочастотной). При этом время действия III степени защиты будет

$$t_{\text{СЗ}}^{\text{III}} = t_{\text{СЗ.ПРЕД}} + t_{\text{ОВ}} + \Delta t, \quad (1.41)$$

где $t_{\text{СЗ.ПРЕД}}$, $t_{\text{ОВ}}$ и Δt имеют те же значения, что и в выражении (1.37).

Коэффициент чувствительности III степени ТНЗНП определяется по выражению (1.38) при замыкании на землю на шинах противоположной подстанции. Значение коэффициента чувствительности должно быть около 1,5.

Четвертая степень ТНЗНП

Ток срабатывания IV степени защиты определяется по условию отстройки от тока небаланса в нулевом проводе ТТ при внешних КЗ между тремя фазами за трансформаторами (автотрансформаторами) подстанций данного или противоположного концов линии по выражению

$$I_{0\text{СЗ}}^{\text{III}} \geq k_{\text{ОТС}} k_{\text{ПЕР}} I_{0\text{НБ.У}}, \quad (1.42)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчета и необходимый запас, принимается равным 1,25; $k_{\text{ПЕР}}$ — коэффициент, учитывающий увеличение тока небаланса в переходном режиме, принимается равным 2 при выдержке времени рассматриваемой степени до 0,1 с; 1,5 при выдержке времени до 0,3 с; 1,0 при выдержке времени выше 0,5–0,6 с; $I_{0\text{НБ.У}}$ — ток небаланса в нулевом проводе трансформатора тока в установившемся режиме при рассматриваемых внешних КЗ между тремя фазами.

$$I_{0\text{ нб.у}} = k_{\text{нб}} I_{\text{расч}}. \quad (1.43)$$

Здесь $k_{\text{нб}}$ — коэффициент небаланса; $I_{\text{расч}}$ — максимальное значение фазного тока, проходящего в месте установки рассматриваемой защиты при внешнем КЗ между тремя фазами.

Коэффициент небаланса принимается в зависимости от кратности $I_{\text{расч}}$ к номинальному току ТТ:

- при кратностях до $(2...3)I_{\text{ном}} k_{\text{нб}} = 0,05$;
- при больших кратностях, но не превосходящих $(0,7...0,8) \times \times I_{\text{к10}}$, $k_{\text{нб}} = 0,05...0,1$ ($I_{\text{к10}}$ — предельная кратность первичного тока ТТ при 10 % погрешности).

Выбранный по рассмотренным выше условиям ток срабатывания IV ступени защиты проверяется по условию отстройки от суммарного тока небаланса в нулевом проводе ТТ, протекающего в максимальном нагрузочном режиме, по выражению

$$I_{0\text{ сз}}^{\text{IV}} \geq k_{\text{отс}} / k_{\text{в}} (3I_{0\text{ нб}} + 3I_{0\text{ нр}}), \quad (1.44)$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{отс}} = 1,25$; $k_{\text{в}}$ — коэффициент возврата, $k_{\text{в}} = 0,95$; $3I_{0\text{ нб}}$ — первичный ток небаланса в нулевом проводе ТТ в рассматриваемом режиме, определяется по выражению

$$3I_{0\text{ нб}} = k_{\text{нб}} I_{\text{расч}}. \quad (1.45)$$

Здесь $3I_{0\text{ нр}}$ — утроенный ток нулевой последовательности, обусловленный несимметрией в системе, возникающий, например, при работе смежной линии с односторонним питанием в неполнофазном и неполнореакторном режиме; $k_{\text{нб}}$ — коэффициент небаланса, определяемый из условий, аналогичных выражению (1.43); $I_{\text{расч}}$ — расчетный ток нагрузочного режима.

Коэффициент чувствительности IV ступени ТНЗНП определяется по выражению (1.38) при замыкании на землю в конце зоны резервирования. Значение коэффициента чувствительности должно быть не менее 1,2.

Выдержка времени IV ступени защиты должна быть согласована с выдержками времени соответствующих ступеней защит предыдущих элементов согласно выражению (1.41).

Методика расчета параметров токовой отсечки

Ток срабатывания токовой отсечки определяется по следующим условиям:

- отстройка от максимального тока внешнего КЗ по выражению

$$I_{C3} \geq k_{\text{ОТС}} I_{\text{КЗ.МАКС}}, \quad (1.46)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{ОТС}} = 1,2$; $I_{\text{КЗ.МАКС}}$ — максимальное значение периодической составляющей тока в месте установки защиты при внешнем трехфазном КЗ (на шинах ПС, связываемых защищаемой линией или за наиболее мощным трансформатором ответвительной ПС);

- отстройка от максимального значения уравнительного тока при качаниях в системе по выражению

$$I_{C3} \geq k_{\text{ОТС}} I_{\text{УР.КАЧ.МАКС}}, \quad (1.47)$$

$k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{ОТС}} = 1,2$; $I_{\text{УР.КАЧ.МАКС}}$ — максимальный уравнительный ток по линии при качаниях в системе в полнофазном режиме;

- отстройка от броска тока намагничивания трансформаторов по выражению

$$I_{C3} \geq k_{\text{Н}} \sum I_{\text{НОМ.ТР}}, \quad (1.48)$$

где $k_{\text{Н}}$ — коэффициент надежности, принимается равным 3—4 при условии введения небольшой задержки (0,05 с дополнительно к собственному времени срабатывания ТО) либо более или равным 5 (учитывая собственное время срабатывания, равное 0,02—0,04 с); $\sum I_{\text{НОМ.ТР}}$ — сумма номинальных токов всех

трансформаторов, которые одновременно могут включаться под напряжение.

Проверка чувствительности ТО производится по выражению

$$k_{\text{ч}} = I_{\text{кз.мин}} / I_{\text{сз}}, \quad (1.49)$$

где $I_{\text{кз.мин}}$ — ток, проходящий через защиту при замыкании в начале ВЛ в минимальном режиме работы системы. Значение коэффициента чувствительности должно быть не менее 1,2 [4].

Необходимо иметь небольшую выдержку времени (приблизительно 0,1 с), благодаря которой не надо «загрублять» защиту по выражению (1.48).

Пример расчета параметров токовой направленной защиты нулевой последовательности и токовой отсечки ВЛ-220 кВ

В примере рассмотрен расчет параметров четырехступенчатой ТНЗНП и ТО, установленных на линии ВЛ1–220 кВ со стороны ПС 1 (см. рис. 1.5 на с. 36). В расчете используются исходные данные из табл. 1.6–1.8. Значения токов $3I_0$, протекающих по отдельным элементам схемы сетки, при замыканиях на землю в различных ее точках, необходимые для расчета параметров ТНЗНП ВЛ1, приведены в табл. 1.25.

Таблица 1.25

Значения токов $3I_0$ для расчета ТНЗНП ВЛ1

Элементы схемы сети	Ток $3I_0$ для заданных мест КЗ и режима работы сети, А								
	К1	К2		К3			К5	К7	
	С1-мин, С3-мин, откл. АТ2	Все включено	С1-мин, С3-мин, откл. АТ2	Все включено	С4-мин, С6-мин, откл. АТ4	С1-мин, С3-мин, откл. АТ2	Все включено	Все включено	С4-мин, откл. АТ4
ВЛ1	14935 от С1, 955 от ПС Б	1606	1574	—	534	425	1082	—	—
ВЛ2	—	—	—	1316	1183	—	—	—	—
ВЛ4	—	—	—	—	—	—	—	1004	956
АТ3	—	—	—	—	—	—	—	—	342

Первая ступень ТНЗНП

Ток срабатывания I ступени ТНЗНП, выбираемый из условия отстройки от утроенного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты при замыкании на землю на шинах ПС 2 (точка К2), определяем по выражению (1.35).

Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,3$ и $3I_{0 \text{ МАКС}(K2)} = 1606 \text{ А}$, получим

$$I_{0 \text{ СЗ.1}}^I \geq k_{\text{ОТС}} \cdot 3I_{0 \text{ МАКС}(K2)} = 1,3 \cdot 1606 = 2087,8 \text{ А}.$$

Условие выбора тока срабатывания по выражению (1.33) не рассматривается, т. к. на линии отсутствует устройство ОАПВ и выключатели имеют трехфазный привод.

Определение коэффициента чувствительности I ступени производится по выражению (1.34)

$$k_{\text{ч}} = 3I_{0 \text{ МИН}(K1)} / I_{0 \text{ СЗ.1}}^I = 14935 / 2087,8 = 7,1,$$

где $3I_{0 \text{ МИН}(K1)}$ — ток, проходящий через защиту при однофазном КЗ на землю в начале ВЛ1 в минимальном режиме работы систем С1 и С3, $3I_{0 \text{ МИН}(K1)} = 14935 \text{ А}$.

Значение коэффициента чувствительности должно быть не менее 1,2.

Вторая ступень ТНЗНП

Ток срабатывания II ступени ТНЗНП определяем исходя из двух условий:

- отстройка от утроенного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты при замыканиях на землю за предыдущим автотрансформатором на стороне его смежного напряжения, определяется по выражению (1.35). Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,2$ и $3I_{0 \text{ МАКС}(K5)} = 1082 \text{ А}$, получим

$$I_{0 \text{ СЗ.1}}^{\text{II}} \geq k_{\text{ОТС}} 3I_{0 \text{ МАКС}(K5)} = 1,2 \cdot 1082 = 1298,4 \text{ А};$$

- согласование с I степенью защиты 3 предыдущей линии ВЛ2 — по выражению (1.36). Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,1$, $k_{\text{ТОК}} = 0,45$ и $I_{0\text{СЗ.3}}^I = 1579,2$ А, получим

$$I_{0\text{СЗ.1}}^{\text{II}} \geq k_{\text{ОТС}} k_{\text{ТОК}} I_{0\text{СЗ.3}}^I = 1,1 \cdot 0,45 \cdot 1579,2 = 781,7 \text{ А},$$

где $k_{\text{ТОК}}$ — максимальный коэффициент токораспределения, равный отношению токов в месте установки ТНЗНП ВЛ1 и ТНЗНП ВЛ2 при замыкании на землю в конце ВЛ2 (точка К3),

$$k_{\text{ТОК}} = 3I_{0\text{ТНЗНП1 (К3)}} / 3I_{0\text{ТНЗНП3 (К3)}} = 534/1183 = 0,45;$$

$I_{0\text{СЗ.3}}^I$ — ток срабатывания I степени ТНЗНП ВЛ3

$$I_{0\text{СЗ.3}}^I \geq k_{\text{ОТС}} 3I_{0\text{МАКС(К3)}} = 1,2 \cdot 1316 = 1579,2 \text{ А}.$$

Принимаем $I_{0\text{СЗ.1}}^{\text{II}} = 1298,4$ А.

Определение коэффициента чувствительности II степени производится по выражению (1.38)

$$k_{\text{Ч}} = 3I_{0\text{МИН(К2)}} / I_{0\text{СЗ.1}}^{\text{II}} = 1574 / 1298,4 = 1,21,$$

где $3I_{0\text{МИН}}$ — минимальный ток, проходящий через защиту при замыкании на землю в конце ВЛ1 (точка К2), $3I_{0\text{МИН}} = 1574$ А.

Значение коэффициента чувствительности удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Третья степень ТНЗНП

Ток срабатывания III степени ТНЗНП определяем исходя из двух условий:

- согласование со II степенью ТНЗНП предыдущей линии ВЛ2 производим по выражению (1.39).

Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,1$, $k_{\text{ТОК}} = 0,32$ и $I_{0\text{СЗ.3}}^{\text{II}} = 968$ А, получим

$$I_{0\text{СЗ.1}}^{\text{III}} \geq k_{\text{ОТС}} k_{\text{ТОК}} I_{0\text{СЗ.3}}^{\text{II}} = 1,1 \cdot 0,32 \cdot 968 = 340,7 \text{ А};$$

- согласование с III ступенью защиты от замыканий на землю автотрансформатора на ПС 2, установленной на стороне напряжения 110 кВ, производим по выражению (1.40).

Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,1$, $k_{\text{ТОК}} = 0,36$ и $I_{0\text{СЗ.АТ}}^{\text{III}} = 815,6$ А, получим

$$I_{0\text{СЗ.1}}^{\text{III}} \geq k_{\text{ОТС}} k_{\text{ТОК}} I_{0\text{СЗ.АТ}}^{\text{III}} = 1,1 \cdot 0,36 \cdot 815,6 = 322,97 \text{ А},$$

где $k_{\text{ТОК}}$ — коэффициент токораспределения, равный отношению токов в месте установки ТНЗНП АТЗ (на стороне 110 кВ) и ТНЗНП ВЛ4 при замыкании на землю в конце ВЛ4 (точка К7),

$$k_{\text{ТОК}} = 3I_{0\text{ТНЗНП АТЗ (К7)}} / 3I_{0\text{ТНЗНП ВЛ4 (К7)}} = 342/956 = 0,36.$$

Принимаем $I_{0\text{СЗ.1}}^{\text{III}} = 340,7$ А.

Определение коэффициента чувствительности III ступени производится по выражению (1.38)

$$k_{\text{ч}} = 3I_{0\text{МИН(К2)}} / I_{0\text{СЗ.1}}^{\text{III}} = 1574 / 340,7 = 4,6,$$

где $3I_{0\text{МИН}}$ — минимальный ток, проходящий через защиту при замыкании на землю в конце ВЛ1 (точка К2), $3I_{0\text{МИН}} = 1574$ А.

Значение коэффициента чувствительности удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Четвертая ступень ТНЗНП

Ток срабатывания IV ступени определяем из условия отстройки от тока небаланса в нулевом проводе ТТ защиты при КЗ между тремя фазами на стороне НН автотрансформатора ПС 2 (точка К9) по выражению (1.42).

Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,25$, $k_{\text{ПЕР}} = 1$ и $3I_{0\text{НБ.У}} = 87,56$ А, получим

$$I_{0\text{СЗ.1}}^{\text{IV}} = k_{\text{ОТС}} k_{\text{ПЕР}} I_{0\text{НБ.У}} = 1,25 \cdot 1 \cdot 87,56 = 109,45 \text{ А},$$

где $I_{0 \text{ нб.у}}$ — ток небаланса в нулевом проводе ТТ в установившемся режиме при рассматриваемом внешнем КЗ между тремя фазами, определенный по выражению (1.43),

$$I_{0 \text{ нб.у}} = k_{\text{нб}} I_{\text{КЗ.МАКС(К9)}} = 0,05 \cdot 1749,3 = 87,46 \text{ А.}$$

Здесь $k_{\text{нб}}$ — коэффициент небаланса, равный 0,05 при кратностях тока КЗ до $(2...3)I_{\text{НОМ.ТТ}}$; $I_{\text{КЗ. МАКС (К9)}}$ — максимальное значение фазного тока, проходящего в месте установки защиты при КЗ между тремя фазами в точке К9, $I_{\text{КЗ. МАКС (К9)}} = 1749,3 \text{ А}$.

Принимаем $I_{0 \text{ СЗ.1}}^{\text{IV}} = 110 \text{ А}$.

Определение коэффициента чувствительности IV ступени производится при замыкании на землю в конце ВЛ2 (в конце зоны резервирования) по выражению (1.38)

$$k_{\text{ч}} = 3I_{0 \text{ мин(КЗ)}} / I_{0 \text{ СЗ.1}}^{\text{IV}} = 425 / 110 = 3,8,$$

где $3I_{0 \text{ мин (КЗ)}}$ — минимальный ток, проходящий через защиту при замыкании на землю в конце ВЛ2 (точка КЗ), $3I_{0 \text{ мин (КЗ)}} = 425 \text{ А}$.

Значение коэффициента чувствительности удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Направленность отдельных ступеней ТНЗНП ВЛ1

Отдельные ступени защиты могут быть выполнены ненаправленными в следующих случаях:

- I ступень, если она не действует при замыканиях на землю на шинах ПС, где установлена рассматриваемая защита;
- II и III ступени, если они не действуют при замыканиях на землю в конце защищаемых зон тех ступеней защит всех других линий, подключенных к шинам ПС, где установлена рассматриваемая защита, с которой они согласованы по времени;

- IV ступень, если выдержка времени ее больше времени последних ступеней защит всех других линий, подключенных к шинам ПС, где установлена рассматриваемая защита.

Поскольку значение тока $3I_{0\text{ МАКС}} = 955 \text{ А}$, протекающего по ВЛ1 при внешнем замыкании на землю (на шинах 220 кВ ПС 1 в точке К1), больше $I'_{0\text{ СЗ.1}} = 2087,8 \text{ А}$ и $I''_{0\text{ СЗ.1}} = 1298,4 \text{ А}$, то I и II ступени ТНЗНП ВЛ1 могут быть выполнены направленными. Токи срабатывания III и IV ступеней защиты (340,7 и 110 А соответственно) меньше тока $3I_{0\text{ МИН}}$, поэтому эти ступени ТНЗНП ВЛ1 должны быть выполнены направленными.

Токовая отсечка

Ток срабатывания токовой отсечки определяем по следующим условиям:

- отстройка от максимального тока внешнего КЗ производится по выражению (1.46), с. 99. Принимая $k_{\text{ОТС}} = 1,2$ и $I_{\text{КЗ. МАКС}} = 2564 \text{ А}$, получим

$$I_{\text{СЗ.ОТС}} \geq k_{\text{ОТС}} I_{\text{КЗ.МАКС}} = 1,2 \cdot 2564 = 3076,8 \text{ А},$$

где $I_{\text{КЗ. МАКС}}$ — максимальное значение периодической составляющей тока в месте установки защиты при внешнем трехфазном КЗ на шинах ПС Б, $I_{\text{КЗ. МАКС}} = 2564 \text{ А}$;

- отстройка от уравнильных токов при качаниях в системе производится по выражению (1.47). Принимая $k_{\text{ОТС}} = 1,2$ и $I_{\text{УР. КАЧ.МАКС}} = 2662,4 \text{ А}$, получим

$$I_{\text{СЗ.ОТС}} \geq k_{\text{ОТС}} I_{\text{УР.КАЧ.МАКС}} = 1,2 \cdot 2662,4 = 3195 \text{ А},$$

где $I_{\text{УР. КАЧ.МАКС}}$ — максимальный уравнильный ток по линии при качаниях в системе в полнофазном режиме.

Принимаем $I_{\text{СЗ. ОТС}} = 3195 \text{ А}$.

Проверка чувствительности ТО1 производится по выражению (1.49)

$$k_{\text{ч}} = I_{\text{КЗ.мин}} / I_{\text{СЗ.отс}} = \frac{12697,9}{3195} = 4,$$

где $I_{\text{КЗ. мин}}$ — ток двухфазного КЗ, проходящий через защиту при замыкании в начале ВЛ1 в минимальном режиме работы системы.

Значение коэффициента чувствительности удовлетворяет требованию ПУЭ.

Вторичные токи срабатывания реле тока (уставки по току) различных ступеней ТНЗНП получаются путем деления первичных токов срабатывания на $K_{\text{ТТ}} = 600/5$.

Принятые значения уставок ТНЗНП и ТО ВЛ1-220 ПС 1 — ПС 2 шкафа ШЭ2607016 по току срабатывания приведены ниже:

Наименование уставки	Значение уставки
Ток срабатывания РТ I ступени ТНЗНП, А, (0,05...30,00) $I_{2 \text{ ном.тт}}$, шаг 0,01	17,40
Ток срабатывания РТ II ступени ТНЗНП, А, (0,05...30,00) $I_{2 \text{ ном.тт}}$, шаг 0,01	10,82
Ток срабатывания РТ III ступени ТНЗНП, А, (0,05...30,00) $I_{2 \text{ ном.тт}}$, шаг 0,01	2,84
Ток срабатывания РТ IV ступени ТНЗНП, А, (0,04...0,50) $I_{2 \text{ ном.тт}}$, шаг 0,01	0,92
Ток срабатывания блокирующего РНМ, А, (0,05...30,00) $I_{2 \text{ ном.тт}}$, шаг 0,01	0,50
Ток срабатывания разрешающего РНМ, А, (0,05...30,00) $I_{2 \text{ ном.тт}}$, шаг 0,01	1,00
Напряжение срабатывания блокирующего РНМ, В, (0,5...5,0), шаг 0,1	2,0
Напряжение срабатывания разрешающего РНМ, В, (0,5...5,0), шаг 0,1	3,5
Ток срабатывания РТ токовой отсечки, А, (0,35...30,00) $I_{2 \text{ ном.тт}}$, шаг 0,01	26,62

Уставки по времени срабатывания различных ступеней ТНЗНП и ТО

Время действия I ступени принимаем равным 0,05 с.

Время действия II ступени согласуем с временем действия I ступени ТНЗНП ВЛ2 с учетом времени УРОВ по выражению (1.46)

$$t_{C3.1}^{II} = t_{C3.3}^I + t_{УРОВ} + t_{ОВ} + \Delta t = 0,05 + 0,3 + 0,05 + 0,3 = 0,7 \text{ с.}$$

Время действия III ступени согласуем с временем действия II ступени ТНЗНП ВЛ2 без учета времени УРОВ по выражению (1.47), т. к. на линии ВЛ2 установлена ДФЗ

$$t_{C3.1}^{III} = t_{C3.3}^{II} + t_{ОВ} + \Delta t = 0,7 + 0,05 + 0,3 = 1,05 \text{ с.}$$

Время действия IV ступени согласуем с временем действия IV ступени ТНЗНП ВЛ2, т. к. данная ступень выполняет функции дальнего резервирования. Принимаем уставку по времени IV ступени ТНЗНП ВЛ1 равной 3,5 с.

Для токовой отсечки принимаем уставку по времени срабатывания равной 0,1 с.

Принятые значения уставок по времени срабатывания ТНЗНП и ТО ВЛ1-220 ПС 1 – ПС 2 шкафа ШЭ2607 016 приведены в табл. 1.26.

Таблица 1.26

Уставки по времени срабатывания ТНЗНП и ТО ВЛ1

Номер элемента	Наименование уставки	Значение уставки, с
DT10	Время ввода ускорения II (III) ступени ТНЗНП при включении выключателя (0,7–2,0, шаг 0,1)	0,7
DT11	Уставка на срабатывание I ступени ТНЗНП (0,01–15,00, шаг 0,01)	0,05
DT12	Уставка на срабатывание II ступени ТНЗНП (0,05–15,00, шаг 0,01)	0,70

Окончание табл. 1.26

Номер элемента	Наименование уставки	Значение уставки, с
DT13	Уставка на срабатывание III ступени ТНЗНП (0,05–15,00, шаг 0,01)	1,05
DT14	Уставка на срабатывание IV ступени ТНЗНП (0,05–15,00, шаг 0,01)	4,00
DT15	Уставка ускорения II (III) ступени ТНЗНП при включении выключателя (0,05–5,00, шаг 0,01)	0,5
DT16	Уставка на срабатывание II (III) ступени ТНЗНП при оперативном ускорении (0,05–5, шаг 0,01)	0,1
DT27	Уставка на срабатывание токовой отсечки (0,05–15,00, шаг 0,01)	0,1

2. Защиты автотрансформатора напряжением 220/110/10 кВ

2.1. Типы и назначение защит, применяемых на автотрансформаторах напряжением 220/110/10 КВ

В автотрансформаторах (АТ) могут возникать короткие замыкания между обмотками разных фаз, одной или двух фаз на землю, между витками одной фазы и между обмотками разных напряжений. На вводах автотрансформаторов, ошиновке высшего, среднего и низшего напряжений также могут возникать короткие замыкания между фазами и фаз на землю.

К ненормальным режимам работы автотрансформаторов относятся: прохождение через автотрансформатор сверхтоков, вызванных внешними КЗ и перегрузками, понижение уровня масла, повышение его температуры.

Для защиты АТ с высшим напряжением 220 кВ при их повреждениях и ненормальных режимах работы применяются следующие устройства [4]:

- один комплект дифференциальной токовой защиты, действующей при повреждениях обмоток, вводов и ошиновки автотрансформатора;
- газовые защиты, действующие при повреждениях внутри бака автотрансформатора и устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), сопровождающихся вы-

- делением газа или движением маслוגазовой смеси из бака в расширитель, а также при понижениях уровня масла;
- резервные защиты на сторонах высшего, среднего и низшего напряжений АТ, действующие при внешних и внутренних КЗ и выполняемые в виде дистанционных защит, токовых направленных защит нулевой последовательности и максимальных токовых защит с комбинированным пуском по напряжению;
 - максимальная токовая защита от перегрузки;
 - устройство контроля изоляции на стороне низшего напряжения АТ;
 - технологические защиты (защиты от понижения уровня и повышения температуры масла, от потери охлаждения и т. п.).

В качестве комплекта основных защит и резервных защит стороны низшего напряжения АТ может использоваться шкаф типа ШЭ2607 042.

2.2. Защиты автотрансформатора напряжением 220/110/10 кВ и стороны низшего напряжения на базе шкафа ШЭ2607 042

2.2.1. Общая характеристика шкафа ШЭ2607 042

Состав и назначение устройств защиты шкафа ШЭ2607 042

Шкаф типа ШЭ2607 042 предназначен для защиты автотрансформатора с высшим напряжением 220 кВ. Он содержит:

- дифференциальную токовую защиту АТ (ДЗТ);
- максимальную токовую защиту стороны низшего напряжения (НН) АТ с пуском по напряжению (МТЗ НН);

- токовую отсечку стороны низшего напряжения (ТО НН);
- защиту от перегрузки (ЗП);
- реле максимального тока для блокировки РПН при перегрузке;
- токовые реле для пуска автоматики охлаждения (АО);
- реле максимального напряжения, реагирующее на увеличение напряжения нулевой последовательности для контроля изоляции стороны НН;
- устройство резервирования отказа выключателя стороны ВН (УРОВ ВН) и стороны СН (УРОВ СН).

Аппаратно функции шкафа ШЭ2607 042 реализуются с помощью микропроцессорного терминала типа БЭ2704V042. Кроме функций защиты, автоматики и сигнализации, программное обеспечение терминала реализует ряд дополнительных функций, характерных для всех терминалов серии БЭ2704.

В терминале предусмотрена местная сигнализация о действии защит и устройств, выполненная на светодиодных индикаторах.

Подключение шкафа ШЭ2607 042 к измерительным ТТ и ТН автотрансформатора

На рис. 2.1 приведена схема подключения шкафа ШЭ2607 042 к измерительным ТТ и ТН автотрансформатора.

В терминале БЭ2704V042 используются девять промежуточных трансформаторов тока ($TLA1 - TLA9$), обеспечивающих подключение к главным ТТ трех сторон АТ, и пять промежуточных трансформаторов напряжения ($TLV1 - TLV5$).

На токовые входы терминала подаются фазные токи сторон ВН, СН и НН АТ. Фазные токи используются для реализации алгоритмов ДЗТ, реле тока (РТ) МТЗ и ТО НН, ЗП, УРОВ ВН и УРОВ СН, токовых реле автоматики охлаждения и блокировки РПН при перегрузке.

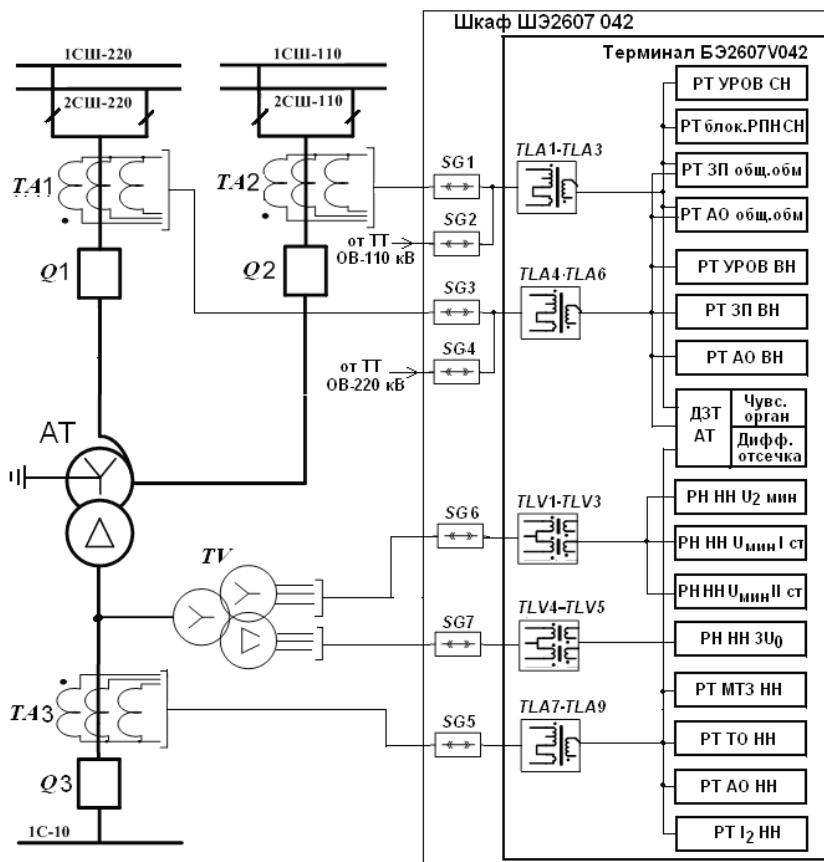


Рис. 2.1. Схема подключения шкафа ШЭ2607 042 к измерительным трансформаторам тока и напряжения

От ТН, установленного на стороне НН АТ, к терминалу подаются два линейных напряжения U_{AB} и U_{BC} от обмоток ТН, соединенных по схеме «звезда» и напряжение $3U_0$ от обмоток ТН, соединенных по схеме «разомкнутый треугольник». Линейные напряжения используются для реализации алгоритмов реле напряжения (РН): минимального напряжения ($U_{МФ} <$) и макси-

мального напряжения ($U_2 >$) для выполнения комбинированного пуска по напряжению МТЗ НН и устройства блокировки РПН при перегрузке. Напряжение $3U_0$ «разомкнутого треугольника» используется для контроля изоляции НН АТ.

Через дискретные входы терминала, имеющие оптоэлектронную развязку, принимаются сигналы от внешних устройств и переключателей шкафа.

Шкаф обеспечивает прием сигналов от отключающей и сигнальной ступеней газовой защиты автотрансформатора (ГЗ АТ), газовой защиты РПН автотрансформатора (ГЗ РПН), датчиков повышения температуры масла, повышения и понижения уровня масла, неисправности цепей охлаждения, контактов реле положения выключателя.

Выходные цепи шкафа независимыми контактами промежуточных реле обеспечивают: отключение выключателей автотрансформатора, запрет АПВ, блокирование автоматического включения резерва (АВР), пуск УРОВ, пуск схемы пожаротушения, блокировку РПН по току, выдачу сигналов в схемы автоматики охлаждения, сигнализации контроля напряжения и центральной сигнализации ПС.

2.2.2. Устройство и работа защит автотрансформатора на базе шкафа ШЗ2607 042

Дифференциальная защита автотрансформатора

Дифференциальная защита автотрансформатора — это основная быстродействующая защита от всех видов КЗ внутри бака, на наружных выводах и ошиновке АТ. Она выполнена в виде двухканальной дифференциальной токовой защиты, содержащей чувствительный орган и отсечку (функциональную схему ее логической части см. на рис. 2.2).



Для отстройки чувствительного реле ДЗТ от бросков тока намагничивания силового автотрансформатора контролируется уровень второй гармоники в дифференциальном токе. Уровень блокировки по второй гармонике может измеряться в диапазоне 8–20 % по отношению к основной гармонике.

Дифференциальная отсечка обеспечивает быстрое отключение автотрансформатора при внутренних КЗ. Уставка срабатывания дифференциальной отсечки должна быть отстроена по величине от броска намагничивающего тока.

Реле фаз *A*, *B* и *C* чувствительного органа ДЗТ и дифференциальной отсечки через логические элементы ИЛИ (7), (8) и (9), элементы ЗАПРЕТ (10), (11) и (12) и элемент ИЛИ (13) действуют на выходные реле терминала, контактами которых обеспечивается отключение выключателей всех сторон автотрансформатора, пуск УРОВ и запрет АПВ. В схеме предусмотрен пуск АВР при срабатывании ДЗТ или ГЗ АТ через логический элемент ИЛИ (15).

Возможна работа дифференциальной отсечки с выдержкой времени (ВВ) через элементы задержки *DT1*, *DT2* и *DT3* при установке программной накладки *XB02* или подаче сигнала со входа «Оперативный ввод ВВ для диф. отсечки», действующих через логический элемент ИЛИ (14) на программные переключатели (1), (2) и (3).

В схеме предусмотрен дискретный вход «Вывод ДЗТ АТ» и программная накладка *XB01* для вывода ДЗТ АТ из работы путем подачи единичных сигналов на инверсные входы элементов ЗАПРЕТ (10), (11) и (12) и нулевых сигналов на входы логических элементов И (4), (5) и (6).

Газовые защиты автотрансформатора и РПН

На рис. 2.3 приведена упрощенная функциональная схема логической части газовых защит автотрансформатора (ГЗ АТ) и РПН (ГЗ РПН).

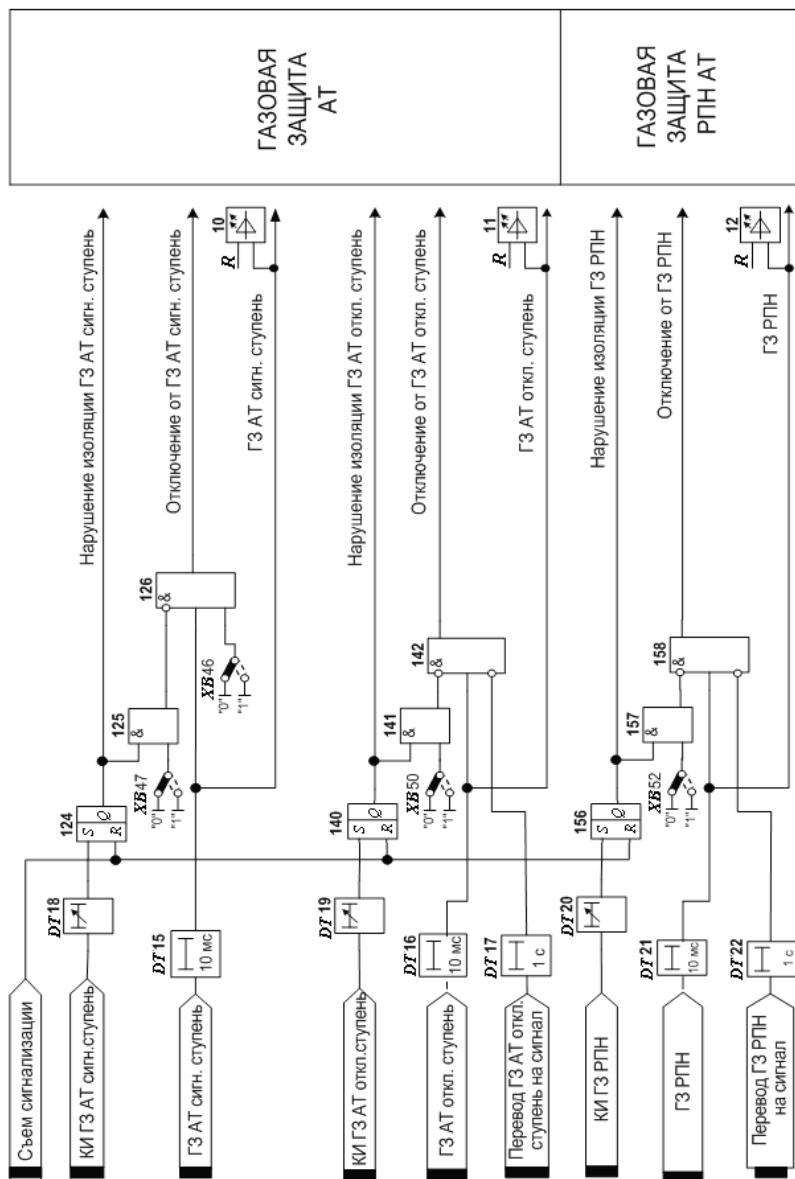


Рис. 2.3. Функциональная схема логической части ГЗ АТ и ГЗ РПН АТ терминала БЭ2704V042

Сигналы с соответствующих входов схемы подаются на отключение АТ:

- от отключающей ступени ГЗ АТ через элемент задержки *DT16* и логический элемент ЗАПРЕТ (142);
- от отключающей ступени ГЗ РПН через элемент задержки *DT21* и логический элемент ЗАПРЕТ (158).

В схеме предусмотрена сигнализация о срабатывании всех ступеней с помощью светодиодов: № 10 (сигнальная ступень ГЗ АТ), № 11 (отключающая ступень ГЗ АТ), № 12 (отключающая ступень ГЗ РПН).

Сигнальная ступень ГЗ АТ с помощью программной накладки *XB46* может быть переведена с действием на отключение.

Путем подачи сигналов с соответствующих входов схемы через элементы задержки *DT17* и *DT22* на инверсные входы элементов ЗАПРЕТ (142) и ЗАПРЕТ (159) соответственно отключающие ступени защит могут переводиться с действием только на сигнал.

При нарушении изоляции соединительных проводов различных ступеней защиты сигналы устройства КИ с соответствующих входов схемы поступают на *R*-входы *RS*-триггеров (124), (140) и (156), с *Q*-выходов которых они передаются в цепи сигнализации защиты. Возврат *RS*-триггеров в исходное состояние производится подачей сигнала с входа «Съем сигнализации».

С помощью программных накладок *XB47*, *XB50*, *XB52* отключающие ступени ГЗ АТ и ГЗ РПН могут автоматически выводиться из действия на отключение при нарушении изоляции соединительных проводов и действии устройств КИ путем подачи сигналов на инверсные входы элементов ЗАПРЕТ (126), (142) и (158) с выходов логических элементов И (125), (141) и (157).

Максимальная токовая защита и токовая отсечка стороны низшего напряжения автотрансформатора

Упрощенная функциональная схема логической части МТЗ и ТО стороны НН АТ приведена на рис. 2.4.



МТЗ НН и ТО НН выполняются в трехфазном исполнении и могут работать с пуском или без пуска по напряжению. Пуск по напряжению вводится в работу с помощью программной накладки *ХВ35*.

В схеме предусмотрена работа МТЗ НН через логический элемент И (59):

- с пуском по напряжению от пусковых органов напряжения стороны НН ($U_{\text{мф}} < U_2 >$) через логические элементы ИЛИ (57) и (58);
- без пуска по напряжению при оперативном вводе накладки *ХВ35* через элемент ИЛИ (58) или при оперативном вводе накладок *ХВ29* и *ХВ30* через логические элементы ИЛИ (62) и (63), элемент И (64) и элемент ИЛИ (58);
- без пуска по напряжению при отключенном положении выключателей сторон НН1 и НН2 от размыкающих контактов реле положения «включено» *КQC* НН1 и *КQC* НН2 через логические элементы ИЛИ (62) и (63), элемент И (64) и элемент ИЛИ (58).

С выхода элемента ЗАПРЕТ (61) МТЗ НН действует:

- при отключенном положении секционных выключателей СВ1 и СВ2 —
 - с меньшей выдержкой времени (временем I ступени) через элемент задержки *DT9* и программный переключатель М (312), который будет находиться в сработанном состоянии, на отключение выключателя стороны НН с пуском АПВ и блокировкой АВР;
 - с большей выдержкой времени, если выключатель стороны НН не отключился или после его отключения не произошел возврат защиты (не устранилось КЗ), через элемент задержки *DT9*, программный переключатель М (312), логический элемент ИЛИ (70) и элемент задержки *DT12* на отключение АТ и запрет АПВ;
- при включенном положении секционных выключателей СВ1 и СВ2 —

- с первой наименьшей выдержкой времени, равной времени I ступени, через элемент задержки $DT9$, программный переключатель М (312), который находится в несрабатанном состоянии, и элементы ЗАПРЕТ (326) и (327) на отключение секционных выключателей СВ1 и СВ2;
- со второй (на ступень селективности большей, чем первой) выдержкой времени (временем II ступени), если секционные выключатели СВ1 и СВ2 не отключились или после их отключения не произошел возврат защиты (не устранилось КЗ), через элемент задержки $DT10$ и элемент ЗАПРЕТ (313) на отключение выключателя стороны НН с пуском АПВ и блокировкой АВР;
- с третьей (на ступень селективности большей второй) выдержкой времени, если выключатель стороны НН не отключился или после его отключения не произошел возврат защиты (не устранилось КЗ), через элемент задержки $DT10$, элемент ЗАПРЕТ (313), логический элемент ИЛИ (70) и элемент задержки $DT12$ на отключение АТ со всех сторон, пуск УРОВ и запрет АПВ.

Программный переключатель М (312) изменяет свое состояние при наличии сигналов на выходе элемента ЗАПРЕТ (61), на входах схемы « $KQTНН1$ » и « $KQTНН2$ » (или установленных программных накладках $XB28$ и $XB29$) и накладке $XB40$.

Имеется возможность работы МТН НН от реле тока обратной последовательности ($I_2 >$), который вводится в работу с помощью программной накладкой $XB37$ на входе логического элемента И (56). Действие МТЗ НН блокируется на инверсном входе элемента И (61) при подаче сигнала со входа «Блокировка МТЗ НН по 2-й гармонике» и установленной накладке $XB28$.

С выхода элемента ЗАПРЕТ (61) сигнал пуска МТЗ НН подается в схему защиты от дуговых замыканий (ЗДЗ) и в схему логической защиты шин НН на вход элемента И (54), которая действует на отключение выключателя стороны НН через элемент задержки $DT12$ при установленной накладке $XB36$ и от-

сутствии сигналов на входах «РТ МТЗ НН1» и «РТ МТЗ НН2» о работе защит присоединений шин НН.

Токовая отсечка стороны НН АТ действует на отключение АТ со всех сторон, с пуском УРОВ и запретом АПВ при срабатывании хотя бы одного реле тока ТО НН, сигналы от которых объединяются на элементе ИЛИ (83).

В схеме предусмотрен вывод из работы МТЗ и ТО стороны НН АТ путем подачи сигналов на инверсные входы элементов ЗАПРЕТ (61) и (84) при появлении сигнала на входе «Вывод из работы МТЗ НН и ТО НН» или установке программной накладки *XB27*.

Устройство для блокировки РПН при перегрузке автотрансформатора

Функциональная схема логической части устройства блокировки РПН при перегрузке приведена на рис. 2.2.

При превышении токов стороны СН уставок срабатывания реле через логический элемент ИЛИ (299) выдается сигнал на запрет регулирования РПН через выходное реле терминала. Имеется возможность действия устройства для блокировки РПН от реле минимального напряжения стороны СН, включенных на линейные напряжения U_{AB} и U_{BC} .

Выбор режима работы устройства для блокировки РПН при перегрузке осуществляется с помощью программных накладок *XB25* и *XB26*.

Защита от перегрузки автотрансформатора и устройство для пуска автоматики охлаждения автотрансформатора

Функциональные схемы логических частей защиты от перегрузки и устройства для пуска автоматики охлаждения АТ приведены на рис. 2.5.

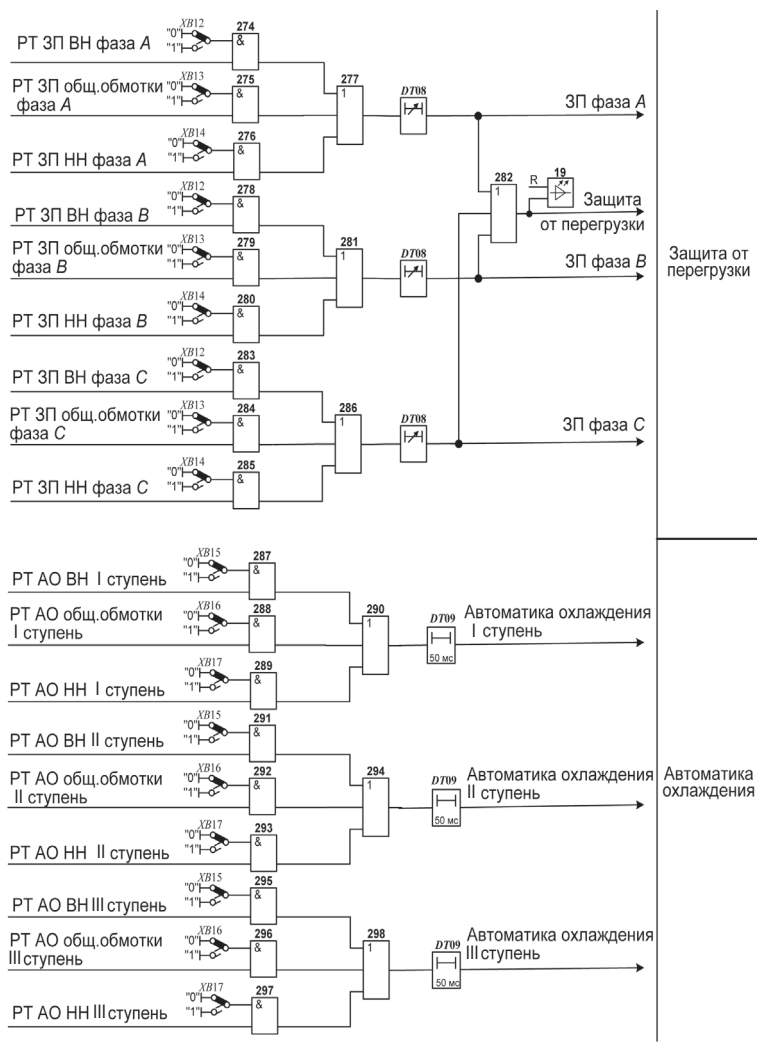


Рис. 2.5. Функциональная схема логической части ЗП и АО АТ терминала БЭ2704V042

Схема защиты от перегрузки, действующая на сигнал, состоит:

- три группы однофазных реле максимального тока, реагирующих на ток фаз *A*, *B* и *C* сторон ВН, НН и выводов общей обмотки автотрансформатора. Выходы реле тока объединены на элементах ИЛИ (277), (281) и (286);
- регулируемые выдержки времени на элементах задержки *DT08*.

С помощью программных накладок *XB12–XB14* имеется возможность вывода из работы реле тока любой фазы любой стороны АТ.

Для пуска автоматики охлаждения предусмотрены трехступенчатые токовые реле, контролирующие токи в фазах на сторонах ВН, НН и выводах нейтрали АТ. Через логические элементы ИЛИ (290), (294) и (298) и элементы задержки *DT09* реле тока различных ступеней действуют на включение определенной группы охладителей АТ.

С помощью программных накладок *XB15–XB17* имеется возможность вывода из работы реле тока любой ступени любой стороны АТ.

2.2.3. Расчет параметров защит автотрансформатора напряжением 220/110/10 кВ шкафа ШЗ2607 042

Методика расчета параметров защит автотрансформатора шкафа ШЗ2607 042

Расчет параметров ДЗТ, МТЗ, ТО, ЗП, токовых реле автоматики охлаждения, токового реле для блокировки РПН, реле напряжения необходимо производить в соответствии с требованиями «Руководящих указаний по релейной защите транс-

форматоров и автотрансформаторов» [6] и «Методических указаний по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования» [7].

Расчет параметров включает в себя определение значений токов и напряжений срабатывания реле, выдержек времени защиты и коэффициентов чувствительности.

Для конфигурирования терминала БЭ2704V042 задаются:

- группа соединения обмоток защищаемого трансформатора;
- базисные токи сторон ВН, СН, НН1, НН2;
- наличие или отсутствие сторон ВН, СН, НН1, НН2.

Включение главных ТТ на всех сторонах АТ может быть выполнено по схеме «звезда». При группе соединения обмоток автотрансформатора по схеме $Y/Y/\Delta-11$ и соединении главных ТТ сторон ВН и СН по схеме «звезда» компенсация фазового сдвига токов осуществляется программой конфигурирования. Когда главные ТТ АТ сторон ВН и СН соединены в треугольник, тогда для группы соединения обмоток автотрансформатора $Y/Y/\Delta-11$ подстройка не нужна, но необходимо при расчете базисного тока учесть коэффициент схемы $k_{CX} = \sqrt{3}$.

Определение номинальных и базисных токов по сторонам АТ

Номинальные и базисные токи по сторонам защищаемого трансформатора находятся с помощью выражений

$$I_{\text{НОМ.СТОП}} = \frac{S_{\text{НОМ.СТОП}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ.СТОП}}}, \quad (2.1)$$

где $S_{\text{НОМ.СТОП}}$ — номинальная мощность трансформатора; $U_{\text{НОМ.СТОП}}$ — номинальное напряжение стороны в среднем положении РПН;

$$I_{\text{БАЗ.СТОП}} = \frac{I_{\text{НОМ.СТОП}} k_{CX}}{K_{\text{ТТ}}}, \quad (2.2)$$

где $k_{\text{сх}}$ — коэффициент схемы ТТ, для ТТ, соединенных в звезду, $k_{\text{сх}} = 1$, для ТТ, соединенных в треугольник, $k_{\text{сх}} = \sqrt{3}$; $K_{\text{ТТ}}$ — коэффициент трансформации главных ТТ соответствующей стороны.

По значениям базисных токов производится выбор числа витков первичных обмоток входных ТТ терминала (грубое выравнивание), к которым подключаются вторичные обмотки главных ТТ.

Входные ТТ терминала имеют число витков первичной обмотки $W_1 = 16$ с отводами от первого и четвертого витков для грубого выравнивания токов. Первый отвод (при $W_1 = 1$ витку) используется для диапазона токов 4,001–16,000 А, второй отвод (при $W_1 = 4$ витка) используется для диапазона токов 1,001–4,000 А, третий отвод (при $W_1 = 16$ виткам) используется для диапазона токов 0,251–1,000 А. Таким образом для ДЗТ в терминале обеспечивается выравнивание токов в диапазоне 0,25–16 А.

Расчет параметров дифференциальной защиты

Для дифференциальной защиты трансформатора производится расчет и выбор следующих параметров:

- тока срабатывания чувствительного органа ДЗТ ($I_{\text{до}}$);
- тока начала торможения ДЗТ ($I_{\text{т.о}}$);
- тока торможения блокировки ДЗТ ($I_{\text{т.бл}}$);
- коэффициента торможения ДЗТ ($k_{\text{т}}$);
- уровня блокировки по току 2-й гармоники ДЗТ ($K_{\text{бл.2}}$);
- тока срабатывания дифференциальной отсечки ($I_{\text{отс}}$).

Чувствительный орган ДЗТ имеет токозависимую характеристику срабатывания, показанную на рис. 2.6.



Рис. 2.6. Характеристика срабатывания ДЗТ АТ
(I_d — дифференциальный ток; I_T — ток торможения)

Токозависимая характеристика состоит из горизонтального и наклонного участков с уставкой тока срабатывания

$$I_{CP} = I_{д.0} + k_T (I_T - I_{T.0}),$$

где I_{CP} — ток срабатывания чувствительного реле ДЗТ; $I_{д.0}$ — начальный ток срабатывания (регулируется в диапазоне 0,2–1,0 $I_{БАЗ. СТОР}$); k_T — коэффициент торможения (регулируется в диапазоне 0,2–0,7); I_T — тормозной ток; $I_{T.0}$ — ток начала торможения (регулируется в диапазоне 0,6–1,0 $I_{БАЗ. СТОР}$).

Под коэффициентом торможения понимается отношение приращения дифференциального тока к приращению тормозного тока в условиях срабатывания защиты. Уставка по току торможения блокировки изменяется в диапазоне 1,2–3,0 $I_{БАЗ. СТОР}$.

Дифференциальная отсечка предназначена для обеспечения надежной работы при больших токах повреждения в зоне действия защиты. Отсечка отстраивается от броска тока намагничивания по уставке срабатывания.

Ток срабатывания дифференциальной отсечки изменяется в диапазоне 6,5–12,0 $I_{БАЗ. СТОР}$. Средняя основная погрешность

ДЗТ по начальному току срабатывания и току срабатывания отсечки не более $(\pm 5) \%$ от уставки.

Начальный ток срабатывания чувствительного органа ДЗТ в относительных единицах (о.е.) при отсутствии торможения определяется с помощью выражения

$$I_{\text{Д.0}^* \text{ РАСЧ}} = k_{\text{ОТС}} I_{\text{НБ.РАСЧ}}, \quad (2.3)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, учитывающий погрешности измерительного органа терминала, ошибки расчета и необходимый запас, $k_{\text{ОТС}} = 1, 1...1,3$. При этом большее значение используется для пускорезервных АТ и трансформаторов, на которых возможно несинхронное АВР.

Уставка $I_{\text{Д.0}^* \text{ РАСЧ}}$ должна приниматься не менее 0,2.

Значение $I_{\text{НБ.РАСЧ}}$ согласно [7] определяется с помощью выражения

$$I_{\text{НБ.РАСЧ}} = k_{\text{ПЕР}} k_{\text{ОДН}} \varepsilon + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{ВЫР}} + \Delta f_{\text{ПТТ}}, \quad (2.4)$$

где $k_{\text{ПЕР}}$ — коэффициент, учитывающий переходный процесс, в соответствии с методическими указаниями [7] следует принимать: $k_{\text{ПЕР}} = 1, 5...2,5$ — при использовании на разных сторонах защищаемого автотрансформатора однотипных трансформаторов тока (только встроенных или только выносных); $k_{\text{ПЕР}} = 2...3$ при использовании на разных сторонах защищаемого автотрансформатора разнотипных трансформаторов тока. При этом меньшее значение $k_{\text{ПЕР}}$ принимается при одинаковой схеме соединения ТТ защиты на разных сторонах (например, в звезду), а большее значение — при разных схемах соединения ТТ защиты (на одной из сторон в звезду, на других — в треугольник); $k_{\text{ОДН}}$ — коэффициент однотипности трансформаторов тока, установленных на разных сторонах защищаемого автотрансформатора, $k_{\text{ОДН}} = 1$; ε — относительное значение полной погрешности ТТ в режиме, соответствующем установившемуся КЗ. В соответствии с руководящими указаниями [6] полная погрешность для ТТ класса 5 Р

и 10 Р составляет 0,05 и 0,10 соответственно; $\Delta U_{\text{РПН}}$ — относительная погрешность, обусловленная наличием РПН. Принимается равной половине действительного диапазона регулирования. Если РПН не используется, то $\Delta U_{\text{РПН}} = 0$; $\Delta f_{\text{ВЫР}}$ — относительная погрешность выравнивания токов плеч. Данная погрешность определяется по погрешностям входных ТТ, а также с помощью аналого-цифровых преобразователей терминала и может быть принята $\Delta f_{\text{ВЫР}} = 0,02$; $\Delta f_{\text{ПТТ}}$ — относительная погрешность внешнего выравнивающего автотрансформатора типа АТ31 или АТ32, используемого для выравнивания значения базисного тока соответствующей стороны, если он выходит за пределы диапазона 0,251–16,000 А. Токовая погрешность внешних выравнивающих автотрансформаторов АТ-31, АТ-32 не превышает 5 %, поэтому $\Delta f_{\text{ПТТ}} = 0,05$ по данным завода-изготовителя.

Ток начала торможения ДЗТ согласно рекомендациям методических указаний [7] принимается:

- $I_{\text{Т.0}} = 0,6$ для пускорезервных трансформаторов и трансформаторов, на которых возможно несинхронное АВР;
- $I_{\text{Т.0}} = 1,0$ во всех остальных случаях.

Ток торможения блокировки ДЗТ определяется исходя из отстройки от максимально возможного сквозного тока нагрузки АТ. Своего наибольшего значения сквозной ток нагрузки достигает при действии АВР секционного выключателя или АПВ питающих линий и может быть принят

$$I_{\text{Т.БЛ}} = k_{\text{ОТС}} k_{\text{ПРЕД.НАГР}} \frac{I_{\text{НОМ.НАГР}} k_{\text{СХ.ТТ.СТОП}}}{I_{\text{БАЗ.СТОП}} K_{\text{ТТ.СТОП}}}, \quad (2.5)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{ОТС}} = 1,1$; $k_{\text{ПРЕД.НАГР}}$ — коэффициент, определяющий предельную нагрузочную способность АТ в зависимости от его мощности [7]: $k_{\text{ПРЕД.НАГР}} = 1,5$ для АТ большой мощности; $k_{\text{ПРЕД.НАГР}} = 1,8$ для АТ средней мощности; $k_{\text{ПРЕД.НАГР}} = 2,0$ для распределительных АТ; $k_{\text{СХ.ТТ.СТОП}}$ — коэф-

фициент, учитывающий схему соединения вторичных обмоток главных ТТ соответствующей стороны; $K_{\text{ТТ. СТОР}}$ — коэффициент трансформации ТТ соответствующей стороны АТ.

Коэффициент торможения обеспечивает несрабатывание ДЗТ в диапазоне значений тормозного тока $I_{\text{Т.0}} - I_{\text{Т.БЛ}}$.

Если по защищаемому АТ протекает $I_{\text{СКВ.КЗ}}$, то он вызывает в защите дифференциальный ток, который определяется по выражению

$$I_{\text{Д}} = (k_{\text{ПЕР}} k_{\text{ОДН}} \mu + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{ВЫР}} + \Delta f_{\text{ПТТ}}) I_{\text{СКВ.КЗ}}, \quad (2.6)$$

где $k_{\text{ПЕР}}$, $k_{\text{ОДН}}$, ε , $\Delta U_{\text{РПН}}$, $\Delta f_{\text{ВЫР}}$, $\Delta f_{\text{ПТТ}}$ имеют те же значения что и в выражении (2.4); $I_{\text{СКВ.КЗ}}$ — максимальное значение тока, равное току внешнего металлического КЗ, приведенное к базисному току стороны внешнего КЗ,

$$I_{\text{СКВ.КЗ}} = \frac{I_{\text{КЗ.МАКС}} k_{\text{СХ.ТТ.СТОР}}}{I_{\text{БАЗ.СТОР}} K_{\text{ТТ.СТОР}}}.$$

При принятом способе формирования торможения для ДЗТ АТ тормозной ток определяется как

$$I_{\text{Т}} = \sqrt{I_{\text{СКВ.КЗ}} (I_{\text{СКВ.КЗ}} - I_{\text{Д}}) \cos \beta}, \quad (2.7)$$

где β — угол между векторами токов $I_{\text{СКВ}}$ и $(I_{\text{СКВ}} - I_{\text{Д}})$, $\beta = 180 - \alpha$. В проектных расчетах можно принять $\beta = 10...20^\circ$.

Коэффициент торможения определяется по формуле

$$k_{\text{Т}} \geq \frac{k_{\text{ОТС}} I_{\text{Д}} - I_{\text{Д.0}}}{I_{\text{Т}} - I_{\text{Т.0}}}, \quad (2.8)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{ОТС}} = 1,1$.

Уставку по уровню блокировки второй гармоники из опыта эксплуатации принимают для защит трансформаторов на уровне 10 %, для защит автотрансформаторов на уровне 15 %.

Коэффициент чувствительности защиты $k_{\text{ч}}$ в режиме с минимальным током КЗ в защищаемой зоне и отсутствии торможения определяется по выражению

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ.МИН}}^{(2)}}{I_{\text{Д.0}}}, \quad (2.9)$$

где $I_{\text{Д.0}}$ — значение тока срабатывания чувствительного органа ДЗТ в именованных единицах, $I_{\text{Д.0}} = I_{\text{Д.0}}^* \frac{I_{\text{БАЗ}} K_{\text{ТТ}}}{k_{\text{СХ}}}$.

Ток срабатывания дифференциальной отсечки в соответствии с методическими указаниями [7] должен выбираться исходя из двух условий:

- по отстройке от броска тока намагничивания $I_{\text{ОТС}} \geq 6,5$;
- по отстройке от максимального тока небаланса при переходном режиме внешнего КЗ

$$I_{\text{ОТС}} = 1,5 I_{\text{СКВ.КЗ}} (k_{\text{ПЕР}} k_{\text{ОДН}} \varepsilon + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{ВЫР}} + \Delta f_{\text{ПТТ}}), \quad (2.10)$$

где $k_{\text{ПЕР}}$ — коэффициент, учитывающий переходной режим, $k_{\text{ПЕР}} = 3$.

Расчет параметров максимальной токовой защиты с комбинированным пуском по напряжению

Расчет тока срабатывания максимального реле тока

Ток срабатывания реле МТЗ без пуска по напряжению отстраивается от максимального тока нагрузки с учетом самозапуска двигательной нагрузки по выражению

$$I_{\text{СР.МТЗ}} \geq \frac{k_{\text{ОТС}} k_{\text{СЗП}} k_{\text{СХ}}}{k_{\text{В}} K_{\text{ТТ}}} I_{\text{РАБ.МАКС}}, \quad (2.11)$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{отс}} = 1,2$; $k_{\text{сзп}}$ — коэффициент, учитывающий увеличение тока в условиях самозапуска заторможенных двигателей нагрузки: $k_{\text{сзп}} = 2,5$ для городских сетей общего назначения, $k_{\text{сзп}} = 2$ для сельских сетей. В предварительных расчетах, а также в случае отсутствия соответствующей информации данный коэффициент может быть принят из диапазона 1,5–2,5. Для нагрузки, имеющей в своем составе малую долю электродвигателей, принимают коэффициент самозапуска $k_{\text{сзп}} = 1,2 \dots 1,3$; $k_{\text{сх}}$ — коэффициент схемы; $k_{\text{в}}$ — коэффициент возврата, $k_{\text{в}} = 0,9$; $K_{\text{тт}}$ — коэффициент трансформации ТТ; $I_{\text{раб. макс}}$ — первичный максимальный рабочий ток на стороне установки защиты.

Ток срабатывания реле МТЗ с пуском по напряжению отстраивается от максимального нагрузочного тока трансформатора без учета самозапуска

$$I_{\text{ср. МТЗ}} \geq \frac{k_{\text{отс}} k_{\text{сх}}}{k_{\text{в}} K_{\text{тт}}} I_{\text{раб. макс}}, \quad (2.11)$$

где $k_{\text{отс}}$, $k_{\text{в}}$, $k_{\text{сх}}$, $K_{\text{тт}}$ и $I_{\text{раб. макс}}$ имеют те же значения, что и в выражении (2.11).

Проверка коэффициента чувствительности по току производится при металлическом КЗ расчетного вида в расчетной точке в режиме, обуславливающем наименьшее значение этого тока, по выражению

$$k_{\text{ч}} \geq \frac{I_{\text{кз. мин}} k_{\text{сх}}}{I_{\text{уст. МТЗ}} K_{\text{тт}}}, \quad (2.13)$$

где $I_{\text{кз. мин}}$ — ток в месте установки защиты при расчетном виде КЗ в расчетной точке в режиме, обуславливающем наименьшее значение тока в месте установки защиты; $I_{\text{уст. МТЗ}}$ — принятое значение тока срабатывания реле тока МТЗ.

В качестве расчетного вида повреждения принимается двухфазное КЗ.

Для МТЗ с пуском и без пуска по напряжению должен быть обеспечен коэффициент чувствительности не менее 1,5 при выполнении функций основной защиты, не менее 1,2 при КЗ в конце зоны резервирования.

Расчет напряжения срабатывания минимального реле напряжения

Согласно методическим указаниям [7] напряжение срабатывания минимального реле напряжения выбирают исходя из следующих условий:

- обеспечения возврата реле после отключения внешнего КЗ

$$U_{\text{ср.мтз}} \leq \frac{U_{\text{мин}}}{k_{\text{отс}} k_{\text{в}} K_{\text{тн}}}, \quad (2.14)$$

где $U_{\text{мин}}$ — междуфазное напряжение в месте установки защиты в условиях самозапуска после отключения внешнего КЗ. В предварительных расчетах, а также в случае отсутствия соответствующей информации значение $U_{\text{мин}}$ может быть принято равным $(0,85...0,9)U_{\text{ном}}$. Здесь $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение трансформатора рассматриваемой стороны защищаемого АТ. $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{отс}} = 1,2$; $k_{\text{в}}$ — коэффициент возврата реле минимального напряжения, $k_{\text{в}} = 1,1$; $K_{\text{тн}}$ — коэффициент трансформации ТН;

- отстройки от напряжения самозапуска при включении от АПВ или АВР заторможенных электродвигателей нагрузки

$$U_{\text{ср.мтз}} \leq \frac{U_{\text{сзп}}}{k_{\text{отс}} K_{\text{тн}}}, \quad (2.15)$$

где $U_{\text{сзп}}$ — первичное значение междуфазного напряжения в месте установки защиты в условиях самозапуска заторможенных электродвигателей нагрузки при включении их от АПВ или АВР. В предварительных расчетах, а также в случае отсутствия соответствующей информации значение может быть принято

примерно $0,7U_{НОМ}$; $k_{ОТС}$ — коэффициент отстройки, принимается из диапазона 1,1–1,2.

Напряжение срабатывания принимается равным наименьшему значению из полученных.

Чувствительность минимального реле напряжения проверяют по выражению

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{УСТ.МТЗ}} K_{\text{ТН}}}{U_{\text{КЗ.МАКС}}} \geq 1,5, \quad (2.16)$$

где $U_{\text{УСТ.МТЗ}}$ — принятое значение параметра срабатывания минимального реле напряжения; $U_{\text{КЗ.МАКС}}$ — значение междуфазного напряжения в месте установки ТН при металлическом КЗ между фазами в расчетной точке в режиме, обуславливающем наибольшее значение этого напряжения.

Расчет напряжения срабатывания реле напряжения обратной последовательности

Параметр срабатывания реле напряжения обратной последовательности должен отстраиваться от напряжения небаланса, обусловленного несимметрией фазных напряжений в нормальном рабочем режиме, небаланса, обусловленного различием погрешностей разных фаз ТН; рекомендуется принимать его

$$U_{2,\text{СР.МТЗ}} = (0,06...0,1)U_{НОМ} / K_{\text{ТН}}, \quad (2.17)$$

где $U_{НОМ}$ — номинальное напряжение защищаемого трансформатора.

По данным экспериментов и опыта эксплуатации при таком напряжении срабатывания обеспечивается отстройка от напряжения небаланса в расчетном (нагрузочном) режиме.

Чувствительность данного реле проверяют по выражению

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{2,\text{КЗ.МИН}}}{U_{2,\text{УСТ.МТЗ}} K_{\text{ТН}}} \geq 1,5, \quad (2.18)$$

где $U_{2.КЗ. \text{ мин}}$ — значение междуфазного напряжения обратной последовательности, приведенное к вторичным величинам, в месте установки ТН при металлическом междуфазном КЗ в расчетной точке в режиме, обуславливающем наименьшее значение этого напряжения; $U_{2.уст. \text{ МТЗ}}$ — принятое значение параметра срабатывания реле напряжения обратной последовательности.

Определение выдержек времени МТЗ

Выдержка времени МТЗ I ступени выбирается по условиям согласования с последними, наиболее чувствительными ступенями защит от многофазных КЗ предыдущих элементов (максимальной токовой с пуском или без пуска по напряжению или дистанционной защиты). Определение выдержки времени производится по выражению

$$t_{\text{сз.МТЗ I ст}} = t_{\text{сз.см}} + \Delta t, \quad (2.19)$$

где $t_{\text{сз.см}}$ — время срабатывания наиболее чувствительных ступеней смежных защит, с которыми производится согласование; Δt — ступень селективности, принимается при малых (до 2,0 с) выдержках времени равной 0,4 с, при больших выдержках времени МТЗ равной 0,5 с. По рекомендациям [7] при согласовании цифровых реле и применении вакуумных или элегазовых выключателей с полным временем отключения (0,04–0,05 с) можно принимать ступень селективности в диапазоне 0,25–0,3 с.

Действие МТЗ стороны НН определяется по следующим выдержкам времени:

- «МТЗ НН 1 ст» — время срабатывания I ступени МТЗ НН, действующей на отключение секционных выключателей или на отключение выключателя ввода секции шин 10 кВ (при отключенном состоянии секционных выключателей);

- «МТЗ НН 2 ст» — время срабатывания II ступени МТЗ НН, действующей на отключение выключателя ввода секции шин 10 кВ, принимается на ступень селективности больше времени срабатывания I ступени, если после отключения секционных выключателей КЗ не устранено.

Время действия МТЗ стороны НН на полное отключение АТ, если после срабатывания I или II ступеней КЗ не ликвидировано, будет на ступень селективности больше:

- времени срабатывания I ступени при отключенном состоянии секционных выключателей;
- времени срабатывания II ступени при включенном состоянии секционных выключателей.

Расчет параметров защиты от перегрузки

На автотрансформаторах защита от перегрузки устанавливается на стороне ВН, на стороне НН и в общей обмотке. Защита от перегрузки общей обмотки устанавливается на автотрансформаторах, если возможен режим передачи электроэнергии со сторон ВН и СН на сторону НН. Защита от перегрузки срабатывает в случае превышения фазным током (фазы А) заданного тока срабатывания I_{C3} . Она действует с выдержкой времени t_{C3} на сигнал.

Расчет параметров срабатывания производится одинаково для всех сторон. Рекомендуются вести расчет в первичных величинах, приведенных к той стороне автотрансформатора, на которой установлена рассматриваемая защита.

Выбор параметров срабатывания ЗП необходимо производить в соответствии с требованиями завода-изготовителя автотрансформатора. Выбираются следующие параметры срабатывания:

- ток срабатывания ЗП на стороне ВН;
- ток срабатывания ЗП в общей обмотке;

- ток срабатывания ЗП на стороне НН;
- время срабатывания ЗП.

Расчет тока срабатывания максимального реле тока

Ток срабатывания максимального реле тока отстраивается от номинального тока обмотки защищаемого автотрансформатора

$$I_{\text{ЗП.СТОП}} = \frac{k_{\text{ОТС}} I_{\text{НОМ.СТОП}}}{k_{\text{В}} K_{\text{ТТ.СТОП}}}, \quad (2.20)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки ЗП, который принимается 1,05; $I_{\text{НОМ.СТОП}}$ — первичный номинальный ток стороны автотрансформатора, где установлена защита, с учетом регулирования напряжения на данной стороне (ВН, НН); $k_{\text{В}}$ — коэффициент возврата, принимается 0,9; $K_{\text{ТТ.СТОП}}$ — коэффициент трансформации ТТ соответствующей стороны АТ.

При расчете тока срабатывания защиты от перегрузки в общей обмотке в качестве $I_{\text{НОМ}}$ должен рассматриваться номинальный ток общей обмотки АТ, равный разности номинальных первичных токов стороны ВН и стороны СН,

$$I_{\text{ЗП.ОБЩ.ОБМ}} = \frac{k_{\text{ОТС}} I_{\text{НОМ.ОБЩ.ОБМ}}}{k_{\text{В}} K_{\text{ТТ.ВН}}}, \quad (2.21)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки ЗП, принимается равным 1,05; $I_{\text{НОМ.ОБЩ.ОБМ}}$ — номинальный ток общей обмотки, который выбирается по каталожным данным автотрансформатора или рассчитывается по формуле

$$I_{\text{НОМ.ОБЩ.ОБМ}} = I_{\text{НОМ.СН}} - I_{\text{НОМ.ВН}}.$$

Здесь $I_{\text{НОМ.ВН}}$ — номинальный первичный ток обмотки стороны ВН; $I_{\text{НОМ.СН}}$ — номинальный ток обмотки стороны СН.

$k_{\text{В}}$ — коэффициент возврата реле тока ЗП, принимается 0,9; $K_{\text{ТТ.ВН}}$ — коэффициент трансформации ТТ стороны ВН.

Определение выдержки времени ЗП

Время срабатывания защиты необходимо отстраивать от режимов кратковременных перегрузок и можно принимать без расчета из диапазона 9–10 с.

Расчет параметров автоматики охлаждения

Расчет токов срабатывания реле тока автоматики охлаждения необходимо производить в соответствии с требованиями завода-изготовителя автотрансформатора. Ток срабатывания АО для АТ определяется по выражению

$$I_{\text{АО.СТОП}} = \frac{k_{\text{ОТС}}}{k_{\text{В}}} k_{\text{НАГР}} \frac{I_{\text{НОМ.СТОП}}}{K_{\text{ТТ.СТОП}}}, \quad (2.22)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки АО, $k_{\text{ОТС}} = 1,05$; $k_{\text{В}}$ — коэффициент возврата реле тока АО, $k_{\text{В}} = 0,9$; $k_{\text{НАГР}}$ — коэффициент уставки срабатывания. Для реле тока АО АТ I ступени $k_{\text{НАГР}} = 0,4$, для II ступени $k_{\text{НАГР}} = 0,8$; $I_{\text{НОМ.СТОП}}$ — номинальный первичный ток обмотки соответствующей стороны ВН, НН для автотрансформатора; $K_{\text{ТТ.СТОП}}$ — коэффициент трансформации ТТ соответствующей стороны АТ.

Ток срабатывания реле тока для автоматики охлаждения по току общей обмотки АТ определяется по выражению

$$I_{\text{АО.ОБЩ.ОБМ}} = \frac{k_{\text{ОТС}}}{k_{\text{В}}} k_{\text{НАГР}} \frac{I_{\text{НОМ.СН}} - I_{\text{НОМ.ВН}}}{K_{\text{ТТ.ВН}}}, \quad (2.23)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки АО, $k_{\text{ОТС}} = 1,05$; $k_{\text{В}}$ — коэффициент возврата реле тока АО, $k_{\text{В}} = 0,9$; $k_{\text{НАГР}}$ — коэффициент уставки срабатывания. Для I ступени $k_{\text{НАГР}} = 0,4$, для II ступени $k_{\text{НАГР}} = 0,8$; $I_{\text{НОМ.СН}}$ — номинальный первичный ток обмотки стороны СН; $I_{\text{НОМ.ВН}}$ — номинальный первичный ток обмотки стороны ВН; $K_{\text{ТТ.ВН}}$ — коэффициент трансформации ТТ стороны ВН.

Расчет параметров УРОВ

Реле тока УРОВ предназначено для возврата схемы УРОВ при отсутствии отказа выключателя и для определения отказавшего выключателя при КЗ.

Ток срабатывания реле тока УРОВ должен выбираться по возможности минимальным. Рекомендованное значение тока срабатывания УРОВ

$$I_{\text{рт. уров}} = (0,05 \dots 0,1) I_{2 \text{ ном.тт}}, \quad (2.24)$$

где $I_{2 \text{ ном.тт}}$ — номинальный вторичный ток присоединения.

Выдержка времени УРОВ должна выбираться по условию отстройки от времени отключения исправного выключателя с учетом времени возврата устройства, погрешности внутренних элементов выдержки времени и необходимого запаса в соответствии с выражением

$$t_{\text{уров}} = t_{\text{откл.в}} + t_{\text{в.уров}} + t_{\text{зап}}, \quad (2.25)$$

где $t_{\text{откл.в}}$ — время отключения выключателя с той стороны защищаемого автотрансформатора, для которой рассматривается УРОВ; $t_{\text{в.уров}}$ — максимальное время возврата реле тока УРОВ, принимается не более 0,03 с; $t_{\text{зап}}$ — время запаса, принимаемое равным 0,1 с.

Выдержка времени УРОВ выбирается из диапазона 0,2–0,3 с.

Расчет параметров токовой отсечки

Расчет параметров ТО заключается в определении тока срабатывания максимального реле тока по выражению

$$I_{\text{ср.то}} \geq \frac{k_{\text{отс}} k_{\text{сх}}}{K_{\text{тт}}} I_{\text{кз.макс}}, \quad (2.26)$$

где $k_{\text{отс}} = 1,2$; $I_{\text{кз.макс}}$ — ток трехфазного КЗ за токоограничивающим реактором.

Пример расчета параметров защит автотрансформатора типа АТДЦТН-125000/220/110

В примере рассматривается расчет параметров защит автотрансформатора АТ1, установленного на ПС 1 (см. рис. 1.5 на с. 36).

Параметры автотрансформатора АТ1 приведены в табл. 1.8.

Схема ПС 1 предусматривает питание АТ1 со стороны ВН и СН и параллельную работу автотрансформаторов на стороне 220 и 110 кВ.

Значения токов КЗ, необходимые для расчета параметров защит, составляют:

- максимальный ток внешнего трехфазного КЗ в точке К4 (на стороне СН АТ) $I_{\text{КЗ. МАКС}}^{(3)} = 1965 \text{ А}$;
- минимальный ток трехфазного КЗ в точке К8 (на стороне НН АТ) $I_{\text{КЗ. МИН}}^{(3)} = 890 \text{ А}$.

Ток двухфазного КЗ в этом режиме

$$I_{\text{КЗ.МИН}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{КЗ.МИН}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 890 = 770,7 \text{ А}.$$

Конфигурирование терминала БЗ2704V042

Расчет первичных токов автотрансформатора, соответствующих его номинальной мощности, и базисных токов на сторонах ВН, СН и НН согласно выражениям (2.1) и (2.2) приведен в табл. 2.1.

По базисным токам главных ТТ производится выбор числа витков первичных обмоток входных ТТ по сторонам АТ для грубого выравнивания токов.

Расчет первичных и базисных токов на сторонах ВН, СН и НН

Таблица 2.1

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Значение		
		220 кВ	110 кВ	10 кВ
Первичные токи на сторонах АТ, А	$I_{\text{ном,стор}} = \frac{S_{\text{ном,стор}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном,стор}}}$	$\frac{125 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 230} = 314$	$\frac{125 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 121} = 597$	$\frac{66 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 11} = 3464$
Схема соединения ТТ	—	Y	Y	Y
Коэффициент схемы	$k_{\text{СХ}}$	1	1	1
Коэффициент трансформации ТТ	$K_{\text{ТТ}}$	1000/5	1000/5	6000/5
Базисные токи на сторонах АТ, А	$I_{\text{баз,стор}} = \frac{I_{\text{ном,стор}} k_{\text{СХ}}}{K_{\text{ТТ}}}$	$\frac{314 \cdot 1}{1000/5} = 1,57$	$\frac{597 \cdot 1}{1000/5} = 2,98$	$\frac{3464 \cdot 1}{6000/5} = 2,88$

Результаты конфигурирования терминала БЭ2704V042 приведены ниже:

Наименование величин	Значения величин
Базисный ток стороны ВН, А (0,251–16,000 с шагом 0,001)	1,57
Базисный ток стороны СН, А (0,251–16,000 с шагом 0,001)	2,98
Базисный ток стороны НН1, А (0,251–16,000 с шагом 0,001)	2,88
Базисный ток стороны НН2, А (0,251–16,000 с шагом 0,001)	—
Схема соединения АТ ВН/НН (Y/Y (Δ/Δ), Y/Δ)	Y/Δ
Схема соединения АТ СН/НН (Y/Y (Δ/Δ), Y/Δ)	Y/Δ
Сторона ВН (нет, есть)	Есть
Сторона СН (нет, есть)	Есть
Сторона НН1 (нет, есть)	Есть
Сторона НН2 (нет, есть)	Нет

Расчет параметров срабатывания ДЗТ

Определение начального тока срабатывания ДЗТ производится в соответствии с выражениями (2.3) и (2.4). Принимая $k_{\text{ОТС}} = 1,1$, $k_{\text{ПЕР}} = 2,0$, $k_{\text{ОДН}} = 1,0$, $\varepsilon = 0,1$, $\Delta U_{\text{РПН}} = 0,06$, $\Delta f_{\text{ВЫР}} = 0,02$, $\Delta f_{\text{ПТТ}} = 0$, получим следующие значения $I_{\text{НБ.РАСЧ}}$ и $I_{\text{Д.0*РАСЧ}}$:

$$I_{\text{НБ.РАСЧ}} = k_{\text{ПЕР}} k_{\text{ОДН}} \mu + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{ВЫР}} + \Delta f_{\text{ПТТ}} = \\ = 2,0 \cdot 1,0 \cdot 0,1 + 0,06 + 0,02 + 0 = 0,28,$$

$$I_{\text{Д.0*РАСЧ}} = k_{\text{ОТС}} I_{\text{НБ.РАСЧ}} = 1,1 \cdot 0,28 = 0,308.$$

Принимаем $I_{\text{Д.0*}} = 0,31$.

Ток начала торможения ДЗТ принимаем $I_{\text{Т.0}} = 1,0$.

Ток торможения блокировки ДЗТ определяется в соответствии с выражением (2.5). Принимая $k_{\text{ОТС}} = 1,1$, $k_{\text{ПРЕД. НАГР}} = 1,5$, $I_{\text{НОМ.ВН}} = 314 \text{ А}$, $I_{\text{БАЗ.ВН}} = 1,57 \text{ А}$, $k_{\text{СХ.ТТ. СТОР}} = 1$, $K_{\text{ТТ. СТОР}} = 1000/5$, получим

$$I_{\text{Т.БЛ}} = k_{\text{ОТС}} k_{\text{ПРЕД.НАГР}} \frac{I_{\text{НОМ.ВН}} k_{\text{СХ.ТТ.СТОР}}}{I_{\text{БАЗ.ВН}} K_{\text{ТТ.СТОР}}} = \\ = 1,1 \cdot 1,5 \cdot \frac{314 \cdot 1}{1,57 \cdot 1000 / 5} = 1,65.$$

Принимаем значение тока торможения блокировки $I_{\text{Т.БЛ}} = 1,65$.

Коэффициент торможения определяется в соответствии с выражениями (2.6)–(2.8). Принимая $\varepsilon = 0,10$, $\beta = 15^\circ$ и $k_{\text{ОТС}} = 1,1$, получим

$$I_{\text{СКВ.КЗ}} = \frac{I_{\text{КЗ.МАКС}}^{(3)} k_{\text{СХ.ТТ.ВН}}}{I_{\text{БАЗ.ВН}} K_{\text{ТТ.ВН}}} = \frac{1965 \cdot 1}{1,57 \cdot 1000 / 5} = 6,26,$$

$$I_{\text{Д}} = (k_{\text{пер}} k_{\text{одн}} \mu + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{выр}} + \Delta f_{\text{ПТТ}}) I_{\text{СКВ.КЗ}} = 0,28 \cdot 6,26 = 1,75,$$

$$I_{\text{Т}} = \sqrt{I_{\text{СКВ.КЗ}} (I_{\text{СКВ.КЗ}} - I_{\text{НБ}}) \cos \beta} = \sqrt{6,26 \cdot (6,26 - 1,75) \cdot \cos 15^\circ} = 5,22,$$

$$k_{\text{Т}} \geq \frac{k_{\text{ОТС}} I_{\text{Д}} - I_{\text{Д.0}}}{I_{\text{Т}} - I_{\text{Т.0}}} = \frac{1,1 \cdot 1,75 - 0,31}{5,52 - 1,0} = 0,357.$$

Принимаем $k_{\text{Т}} = 0,4$.

Уровень блокировки по второй гармонике принимаем равным 0,15, что соответствует 15 %.

Коэффициент чувствительности защиты $k_{\text{ч}}$ в режиме с минимальным током КЗ в защищаемой зоне и при отсутствии торможения определяется по выражению (2.9).

Определяя значение тока срабатывания чувствительного органа ДЗТ в именованных единицах

$$I_{Д.0} = I_{Д.0} * \frac{I_{БАЗ} K_{ГТ}}{k_{СХ}} = 0,31 \cdot \frac{1,57 \cdot 1000 / 5}{1} = 97,3 \text{ А},$$

получим

$$k_{ч} = \frac{I_{КЗ.МИН}^{(2)}}{I_{Д.0}} = \frac{770,7}{97,3} = 7,9 \geq 2.$$

Ток срабатывания дифференциальной отсечки, вычисленный в относительных единицах, составляет:

- по отстройке от броска тока намагничивания $I_{отс} \geq 6,5$;
- по отстройке от максимального тока небаланса при переходном режиме внешнего КЗ, определяемого по выражению (2.10) при значении $k_{ПЕР} = 3$,

$$I_{отс} = 1,5 I_{КЗ} (k_{пер} k_{одн} \mu + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{выр} + \Delta f_{ПТТ}) = 1,5 \cdot 6,26 \cdot 0,38 = 3,56.$$

Принимаем $I_{отс} = 6,5$.

Результаты расчета дифференциальной защиты АТ приведены ниже:

Наименование величин	Значения величин
Ток срабатывания ДЗАТ, о. е. (0,2–1,0 с шагом 0,01)	0,31
Ток начала торможения ДЗАТ, о. е. (0,60–1,0 с шагом 0,01)	1,0
Ток торможения блокировки ДЗАТ, о. е. (1,2–3,0 с шагом 0,1)	1,65
Коэффициент торможения ДЗАТ, о. е. (0,2–0,7 с шагом 0,1)	0,4
Уровень блокировки по 2-й гармонике, о. е. (0,08–0,15 с шагом 0,01)	0,15
Ток срабатывания дифференциальной отсечки, о. е. (6,5–12 с шагом 0,1)	6,5

Расчет параметров срабатывания МТЗ НН

Расчет тока срабатывания максимального реле тока

Ток срабатывания реле МТЗ без пуска по напряжению определяется по выражению (2.11)

$$I_{\text{ср.МТЗ}} \geq \frac{k_{\text{отс}} k_{\text{сзп}} k_{\text{сх}}}{k_{\text{в}} K_{\text{тт}}} I_{\text{раб.макс}} = \frac{1,2 \cdot 1,2 \cdot 1}{0,9 \cdot 6000 / 5} \cdot 3464 = 4,62 \text{ А},$$

где $I_{\text{раб. макс}}$ — максимальный рабочий ток, равный $I_{\text{ном.нн}}$,
 $I_{\text{раб. макс}} = 3464 \text{ А}$

Принимаем $I_{\text{уст.МТЗ}} = 4,62 \text{ А}$.

Проверка чувствительности защиты производится согласно выражению (2.13) при двухфазном КЗ на стороне НН АТ (точка К8 на рис. 1.5)

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз.мин}} k_{\text{сх}}}{I_{\text{уст.МТЗ}} K_{\text{тт}}} = \frac{(\sqrt{3} / 2) \cdot 939 \cdot (230 / 11) \cdot 1}{4,62 \cdot 6000 / 5} = 3 > 1,5.$$

Поскольку схема электрической сети, представленная на рис. 1.5, не позволяет проверить чувствительность защиты при КЗ в конце зоны резервирования, выполним расчет параметров МТЗ с комбинированным пуском по напряжению. В этом случае ток срабатывания реле тока МТЗ, определенный по выражению (2.12) при $k_{\text{сзп}} = 1$, будет равен 3,85 А, а коэффициент чувствительности согласно выражению (2.13) — 3,67.

Расчет напряжения срабатывания минимального реле напряжения

Напряжение срабатывания минимального реле напряжения определяется по выражениям (2.14) и (2.15) исходя из следующих условий:

- обеспечения возврата реле после отключения внешнего КЗ

$$U_{\text{ср.МТЗ}} \leq \frac{U_{\text{мин}}}{k_{\text{отс}} k_{\text{в}} K_{\text{тн}}} = \frac{0,9 \cdot 10,5 \cdot 1000}{1,2 \cdot 1,1 \cdot 10000 / 100} = 71,59 \text{ В};$$

- отстройки от напряжения самозапуска при включении от АПВ или АВР заторможенных двигателей нагрузки

$$U_{\text{ср.МТЗ}} \leq \frac{U_{\text{сзп}}}{k_{\text{отс}} K_{\text{тн}}} = \frac{0,7 \cdot 10,5 \cdot 1000}{1,2 \cdot 10000 / 100} = 61,25 \text{ В}.$$

Принимаем $U_{\text{уст. МТЗ}} = 61,25 \text{ В}$.

Расчет напряжения срабатывания реле напряжения обратной последовательности

Напряжение срабатывания реле напряжения обратной последовательности определяется по выражению (2.17)

$$U_{2\text{ср.МТЗ}} = \frac{0,06 U_{\text{ном}}}{K_{\text{тн}}} = \frac{0,06 \cdot 10,5 \cdot 1000}{10000 / 100} = 6,36 \text{ В}.$$

Принимаем $U_{2\text{уст. МТЗ}} = 6,36 \text{ В}$.

Определение выдержек времени МТЗ

Время срабатывания I ступени МТЗ определяется по выражению (2.19). Принимая время срабатывания МТЗ, установленной на секционном выключателе, равным 1,0 с, а степень селективности $\Delta t = 0,3 \text{ с}$, получим

$$t_{\text{сз.МТЗ I CT}} = t_{\text{сз.СВ}} + \Delta t = 1,0 + 0,3 = 1,3 \text{ с}.$$

Выдержка времени II ступени МТЗ НН выбирается на ступень селективности больше времени I ступени

$$t_{\text{сз.МТЗ 2 CT}} = t_{\text{сз.МТЗ I CT}} + \Delta t = 1,3 + 0,3 = 1,6 \text{ с}.$$

Выдержка времени I ступени МТЗ устанавливается на элементе задержки *DT9*, выдержка времени II ступени — на эле-

менте задержки $DT10$; на элементе задержки $DT12$ устанавливается время, равное ступени селективности $\Delta t = 0,3$ с.

Результаты расчета МТЗ стороны НН АТ заданы ниже:

Наименование величин	Значения величин
Ток срабатывания МТЗ НН, А (0,10–30, 00) $I_{2\text{ ном.тт}}$ с шагом 0,01	4,62
Напряжение срабатывания минимального реле пуска по напряжению НН, В (10,0–100,0 с шагом 0,1)	61,25
Напряжение срабатывания реле обратной последовательности НН, В (6,0– 24,0 с шагом 0,1)	6,36
Время срабатывания I ступени МТЗ НН, с (0,05–27 с шагом 0,01)	1,3
Время срабатывания II ступени МТЗ НН, с (0,05–27 с шагом 0,01)	1,6

Расчет параметров срабатывания защиты от перегрузки

Расчет тока срабатывания реле максимального тока ЗП

Данный расчет производится по выражениям (2.20) и (2.21):

- для стороны ВН

$$I_{\text{ЗП.ВН}} = \frac{k_{\text{отс}} I_{\text{ном.ВН}}}{k_{\text{в}} K_{\text{тт.ВН}}} = \frac{1,05 \cdot 314}{0,9 \cdot 1000 / 5} = 1,83 \text{ А};$$

- для стороны НН

$$I_{\text{ЗП.НН}} = \frac{k_{\text{отс}} I_{\text{ном.НН}}}{k_{\text{в}} K_{\text{тт.ВН}}} = \frac{1,05 \cdot 3464}{0,9 \cdot 6000 / 5} = 3,37 \text{ А};$$

- для общей обмотки АТ

$$I_{\text{ЗП.ОБЩ.ОБ}} = \frac{k_{\text{отс}} (I_{\text{ном.СН}} - I_{\text{ном.ВН}})}{k_{\text{в}} K_{\text{тт.ВН}}} = \frac{1,05 \cdot (596 - 314)}{0,9 \cdot 1000 / 5} = 1,65 \text{ А}.$$

Определение выдержки времени ЗП

Для отстройки от режимов временных перегрузок время срабатывания защиты необходимо принимать без расчета из диапазона 9,0–10,0 с.

Принимаем $t_{CЗ} = 9,0$ с.

Результаты расчета параметров защиты от перегрузки приведены далее:

Наименование величин	Значения величин
Ток срабатывания ЗП на стороне ВН, А, (0,10–30,00) $I_{2\text{НОМ.ТТ}}$ с шагом 0,01	1,83
Ток срабатывания ЗП на стороне нейтрали, А, (0,10–10) $I_{2\text{НОМ.ТТ}}$ с шагом 0,01	1,65
Ток срабатывания ЗП на стороне НН, А, (0,10–10) $I_{2\text{НОМ.ТТ}}$ с шагом 0,01	3,37
Время срабатывания ЗП, с, (0,05–27) с шагом 0,01	9,0

Расчет параметров автоматики охлаждения

Расчет токов срабатывания реле пуска автоматики охлаждения производится по выражениям (2.22) и (2.23):

- для I ступени автоматики охлаждения АТ

$$I_{\text{АО.ВН}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{Б}}} k_{\text{уст}} \frac{I_{\text{НОМ.ВН}}}{K_{\text{ТТ.ВН}}} = \frac{1,05}{0,9} \cdot 0,4 \cdot \frac{314}{1000/5} = 0,732 \text{ А};$$

$$I_{\text{АО.НН}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{Б}}} k_{\text{уст}} \frac{I_{\text{НОМ.НН}}}{K_{\text{ТТ.НН}}} = \frac{1,05}{0,9} \cdot 0,4 \cdot \frac{3464}{6000/5} = 1,347 \text{ А};$$

$$\begin{aligned} I_{\text{АО.ОБЩ.ОБ}} &= \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{Б}}} k_{\text{уст}} \frac{I_{\text{НОМ.СН}} - I_{\text{НОМ.ВН}}}{K_{\text{ТТ.ВН}}} = \\ &= \frac{1,05}{0,9} \cdot 0,4 \cdot \frac{596 - 314}{1000/5} = 0,658 \text{ А}; \end{aligned}$$

- для II ступени автоматики охлаждения АТ

$$I_{\text{АО.ВН}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{В}}} k_{\text{уст}} \frac{I_{\text{НОМ.ВН}}}{K_{\text{ТТ.ВН}}} = \frac{1,05}{0,9} \cdot 0,8 \cdot \frac{314}{1000/5} = 1,46 \text{ А};$$

$$I_{\text{АО.НН}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{В}}} k_{\text{уст}} \frac{I_{\text{НОМ.НН}}}{K_{\text{ТТ.НН}}} = \frac{1,05}{0,9} \cdot 0,8 \cdot \frac{3464}{6000/5} = 2,69 \text{ А};$$

$$I_{\text{АО.ОБЩ.ОБ}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{В}}} k_{\text{уст}} \frac{I_{\text{НОМ.СН}} - I_{\text{НОМ.ВН}}}{K_{\text{ТТ.ВН}}} = \frac{1,05}{0,9} \cdot 0,8 \cdot \frac{596 - 314}{1000/5} = 1,316 \text{ А}.$$

Результаты расчета параметров автоматики охлаждения см. ниже:

Наименование величин	Значения величин
Ток срабатывания I ступени автоматики охлаждения ВН, А, $(0,10-10)I_{\text{НОМ}}$ с шагом 0,01	0,73
Ток срабатывания I ступени автоматики охлаждения нейтрали, о. е., $(0,10-10)I_{\text{НОМ}}$ с шагом 0,01	0,66
Ток срабатывания I ступени автоматики охлаждения НН, А, $(0,10-10)I_{\text{НОМ}}$ с шагом 0,01	1,35
Ток срабатывания II ступени автоматики охлаждения ВН, А, $(0,10-10)I_{\text{НОМ}}$ с шагом 0,01	1,46
Ток срабатывания II ступени автоматики охлаждения нейтрали, о. е., $(0,10-10)I_{\text{НОМ}}$ с шагом 0,01	1,32
Ток срабатывания II ступени автоматики охлаждения НН, А, $(0,10-10)I_{\text{НОМ}}$ с шагом 0,01	2,69

Расчет параметров срабатывания УРОВ ВН и УРОВ СН

Токи срабатывания реле тока УРОВ ВН и УРОВ СН, определяемые по выражению (2.24), получаются одинаковыми, т. к. номинальные вторичные токи ТТ ($I_{2\text{НОМ}}$) этих сторон составляют

$$I_{\text{РТ.УРОВ.ВН(СН)}} = 0,1 I_{2\text{НОМ.ТТ.ВН(СН)}} = 0,1 \cdot 5 = 0,5 \text{ А}.$$

Выдержка времени УРОВ ВН и СН выбирается согласно вы-
ражению (2.25)

$$t_{\text{УРОВ}} = t_{\text{откл.В}} + t_{\text{В.УРОВ}} + t_{\text{зап}} = 0,1 + 0,03 + 0,1 = 0,23 \text{ с},$$

где $t_{\text{откл.В}}$ — полное максимальное время отключения элегазово-
го выключателя с трехфазным приводом, $t_{\text{откл.В}} = 0,1 \text{ с}$; $t_{\text{В.УРОВ}}$ —
время возврата реле тока УРОВ.

Принимаем $I_{\text{РТ. УРОВ.ВН (СН)}} = 0,5 \text{ А}$, $t_{\text{СЗ}} = 0,3 \text{ с}$.

Результаты расчета параметров УРОВ приведены далее:

Наименование величин	Значения величин
Ток срабатывания реле тока УРОВ ВН, А, (0,04—0,4) $I_{2 \text{ ном.тт}}$ с шагом 0,01	0,5
Ток срабатывания реле тока УРОВ СН, А, (0,04—0,4) $I_{2 \text{ ном.тт}}$ с шагом 0,01	0,5
Время срабатывания УРОВ ВН, с, (0,1—0,6 с шагом 0,01)	0,3
Время срабатывания УРОВ СН, с, (0,1—0,6 с шагом 0,01)	0,3

2.3. Резервные защиты автотрансформатора на базе шкафа ШЭ2607 071

2.3.1. Общая характеристика шкафа ШЭ2607 071

Состав и назначение устройств защиты шкафа ШЭ2607 071

Резервные защиты АТ выполнены с помощью шкафа
ШЭ2607 071, который содержит:

- четырехступенчатую дистанционную защиту;
- пятиступенчатую токовую направленную защиту нулевой
последовательности;

- максимальную токовую защиту;
- токовую отсечку;
- устройства АРПТ, АУВ и УРОВ, которые имеют назначения и выполнения, аналогичные соответствующим устройствам шкафа ШЭ2607 016.

Указанные выше функции реализованы на базе микропроцессорного терминала БЭ2704V071, в состав которого входят измерительные органы, логическая часть, входные и выходные цепи, а также устройства сигнализации. Программное обеспечение терминала реализует ряд дополнительных функций, характерных для всех терминалов серии БЭ2704.

В терминале предусмотрена местная сигнализация о действиях защит и устройств, выполненная на светодиодных индикаторах.

Подключение шкафов ШЭ2607 071 к измерительным ТТ и ТН защищаемого автотрансформатора

Схема подключения шкафов ШЭ2607 071 к измерительным трансформаторам защищаемого автотрансформатора приведена на рис. 2.7.

Резервные защиты АТ выполняются с помощью двух шкафов ШЭ2607 071, один из которых подключается к измерительным трансформаторам стороны ВН, а другой — к измерительным трансформаторам стороны СН. Оба шкафа подключаются к трансформатору напряжения стороны НН.

Для реализации перечисленных выше функций резервных защит АТ в терминале БЭ2704V071 использовано 5 аналоговых входов тока и 5 аналоговых входов напряжения.

Подключение измерительных и пусковых органов защит и устройств автоматики терминала (реле тока, напряжения и сопротивления) к измерительным ТТ и ТН производится аналогично тому, как это сделано для резервных защит ЛЭП шкафа ШЭ2607 016 (см. рис. 1.6 на с. 51).

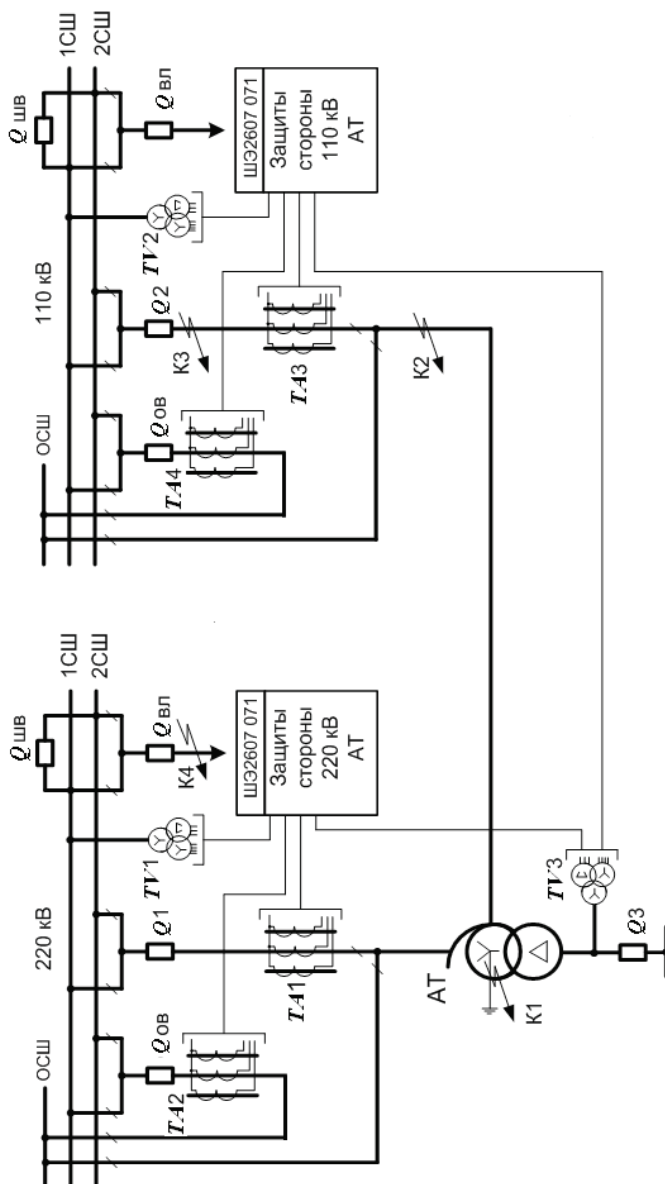


Рис. 2.7. Схема подключения шкафов ШЭ2607 071 к измерительным ТТ и ТН

2.3.2. Устройство и работа дистанционной защиты шкафа ШЗ2607 071

Дистанционная защита предназначена для действия при междуфазных КЗ как в самом АТ, так и во внешних сетях высшего и среднего напряжений.

Схема дистанционной защиты содержит:

- четыре направленных и дополнительную ненаправленную ступени;
- блокировку при качаниях;
- блокировку при неисправностях в цепях переменного напряжения;
- логическую часть.

Предназначение I направленной ступени ДЗ — для резервирования основных защит АТ, II ступени — для резервирования основных защит АТ и частичного резервирования защит элементов смежной стороны, а III и IV — для дальнего резервирования в сетях высшего и среднего напряжения и согласования защит смежных линий с защитами автотрансформатора.

Измерительные и пусковые органы дистанционной защиты

Измерительные реле сопротивления

Каждая из ступеней ДЗ содержит по три реле сопротивления, включенных на разности фазных токов ($I_A - I_B$, $I_B - I_C$, $I_C - I_A$) и соответствующие междуфазные напряжения (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}).

Характеристики срабатывания реле сопротивлений, направленных в АТ (I и II ступени), показаны на рис. 2.8, реле сопротивлений, направленных в сеть соответствующего напряжения (III и IV ступени), показаны на рис. 2.9.

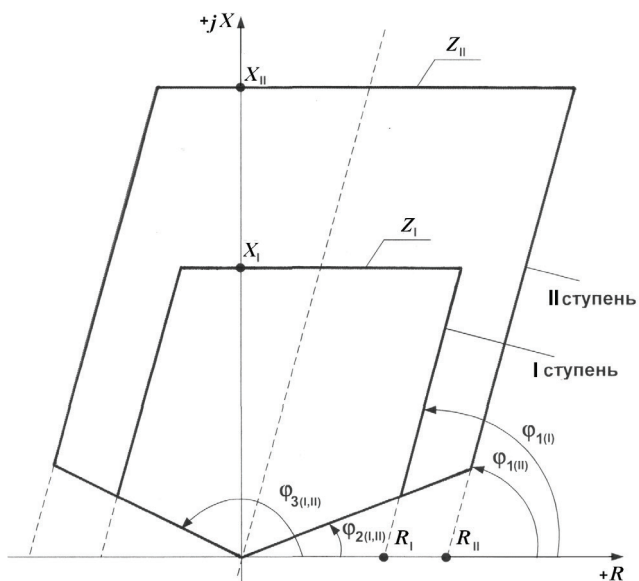


Рис. 2.8. Характеристики срабатывания РС, направленных в АТ

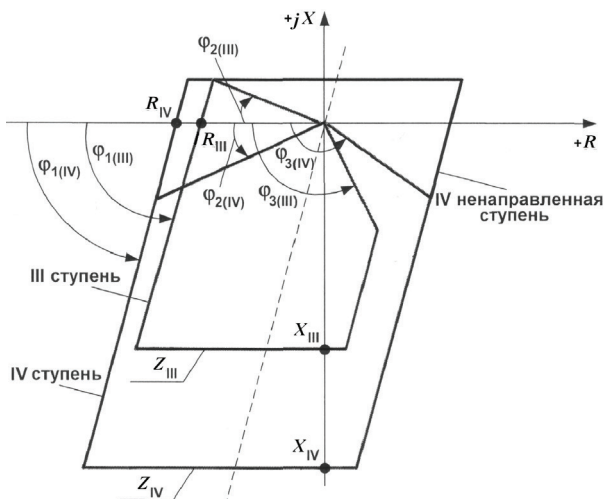


Рис. 2.9. Характеристики срабатывания РС, направленных в сеть

Характеристика срабатывания каждого реле представляет собой параллелограмм, верхняя сторона которого параллельна оси R и пересекает ось X в точке с координатой, соответствующей $X_{уст}$, правая сторона имеет угол наклона φ_1 относительно оси R и пересекает ее в точке с координатой, соответствующей $R_{уст}$.

Характеристики РС I, II и IV ступеней, кроме того, ограничены с помощью двух отрезков, исходящих из начала координат, причем направленность их определяется по углам наклона этих отрезков φ_2 и φ_3 относительно оси R . Отсчет всех углов производится от оси R против часовой стрелки. Для характеристики РС III ступени эти отрезки расположены в четвертом и третьем квадрантах, причем угол φ_2 отсчитывается от оси R по часовой стрелке.

Характеристика РС дополнительной ненаправленной ступени имеет форму параллелограмма, смещенного в третий квадрант на значение не более $0,1X_{уст}$.

Диапазон изменения параметров, определяющих форму характеристик реле сопротивления направленных ступеней (I–IV) ДЗ, указан в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Диапазон изменения параметров РС ДЗ

Ступени	$R_{уст}$, Ом на фазу	$X_{уст}$, Ом на фазу	$\varphi_1, ^\circ$	$\varphi_2, ^\circ$	$\varphi_3, ^\circ$
I, II	0,2–100 ($I_{ном} = 5$ А)	0,2–100 ($I_{ном} = 5$ А)	45–90	–89...+89	91–180
III, IV	1,0–500 ($I_{ном} = 1$ А)	1,0–500 ($I_{ном} = 1$ А)			

Ток точной работы $I_{тр}$ для всех РС при работе на угле линии электропередачи не превышает $0,1I_{ном}$ во всем диапазоне уставок.

Время срабатывания РС при угле максимальной чувствительности и токах КЗ не менее $2I_{тр}$ не превышает 0,025 с, время возврата — 0,05 с.

Устройства блокировок при качаниях и при неисправностях цепей переменного напряжения

Назначения и исполнение устройств блокировок при качаниях и неисправностях цепей переменного напряжения имеют аналогичные соответствующим назначениям и исполнению устройств ДЗ линии шкафа ШЭ2607 016.

Функциональная схема логической части дистанционной защиты

В табл. 2.3 перечислены программные накладки, а в табл. 2.4 приведены элементы задержки в функциональной схеме логической части ДЗ.

Таблица 2.3

Наименование и назначение программных накладок ДЗ

Наименование	Назначение	Положение	Значение по умолчанию
XB5	Контроль действия III ступени ДЗ	0 — от БКм	От БКм
		1 — от БКб	
XB6	Ускоренный возврат БК при отключении выключателя	0 — не предусмотрен	Не предусмотрен
		1 — предусмотрен	
XB9	Контроль действия ступеней ДЗ и МТЗ от БНН	0 — не предусмотрен	Предусмотрен
		1 — предусмотрен	
XB20	Действие II ступени ДЗ	0 — не предусмотрено	Предусмотрено
		1 — предусмотрено	
XB22	Вывод I, II ступеней ДЗ при неисправностях в цепях напряжения	0 — предусмотрен	Предусмотрен
		1 — не предусмотрен	

Таблица 2.4

Наименование и назначение элементов задержки ДЗ

Наименование	Назначение	Диапазон, с
<i>DT1</i>	Время ввода медленнодействующих ступеней ДЗ от БК	3–12
<i>DT2</i>	Задержка на срабатывание III ступени ДЗ	0,05–15
<i>DT3</i>	Задержка на срабатывание IV ступени ДЗ	0,05–15
<i>DT14</i>	Задержка от БНН на вывод защит, направленных в АТ, и направленности ТНЗНП	0,05–10
<i>DT16</i>	Время блокирования I и II ступеней ДЗ после возврата РС III ступени ДЗ	0,00–5
<i>DT17</i>	Задержка на срабатывание II ступени ДЗ	0,00–15
<i>DT20</i>	Задержка на срабатывание I ступени ДЗ	0,00–15
<i>DT24</i>	Время ввода быстродействующих ступеней ДЗ от чувствительного реле БК	0,2–1,0
<i>DT25</i>	Время ввода быстродействующих ступеней ДЗ от грубого реле БК	0,2–1,0
<i>DT29</i>	Задержка сигнализации на срабатывание БНН	5

Упрощенная функциональная схема логической части ДЗ показана на рис. 2.10 и 2.11.

Логическая схема ДЗ принимает сигналы от направленных РС I, II, III и IV ступеней, РС ненаправленной ступени, чувствительного и грубого реле тока (РТ) БК, реагирующих на изменения во времени токов обратной (DI_2) и прямой (DI_1) последовательностей, БНН, трех дополнительных реле минимального напряжения (РН), ускорения от смежной стороны и сигнал контроля цепи включения от реле положения «Отключено» KQT выключателя своей стороны АТ или заменяющего его обходного выключателя (ОВ).

С помощью логических элементов ИЛИ (62), (63), (75), (83) для каждой направленной ступени ДЗ осуществляется объединение сигналов срабатывания РС, включенных на разности фазных токов и междуфазные напряжения.

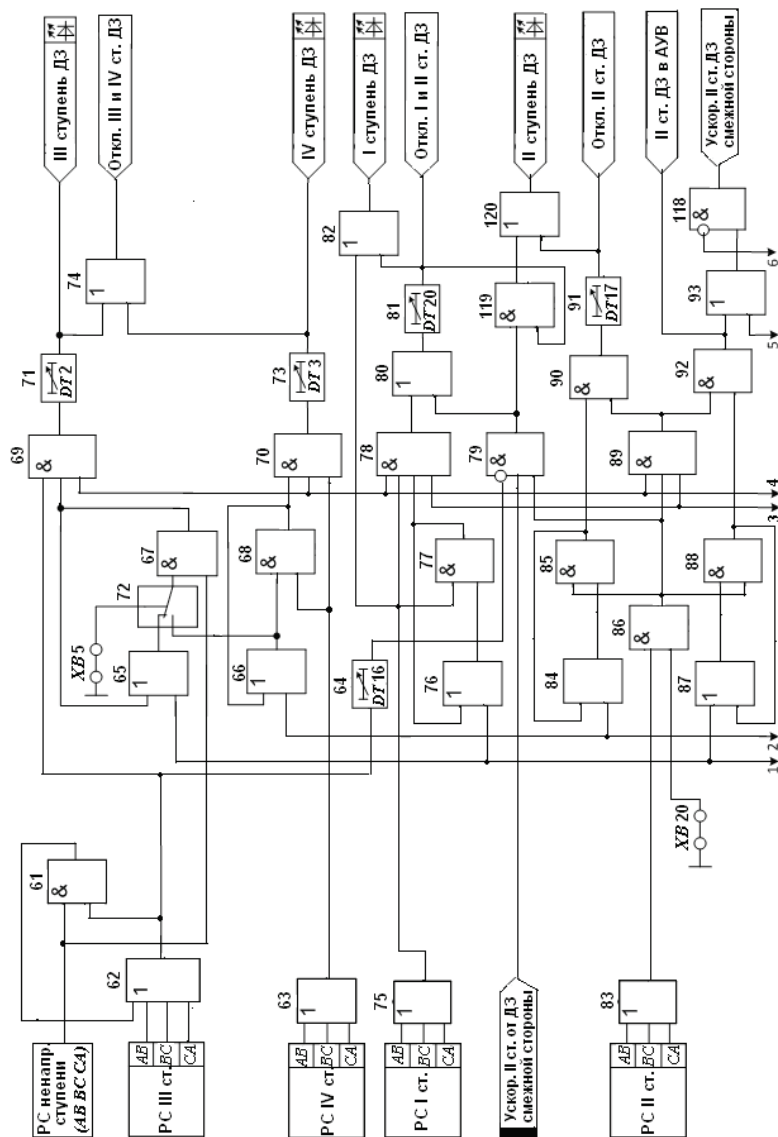


Рис. 2.10. Упрощенная функциональная схема логической части ДЗ АТ терминала БЭ2704V071

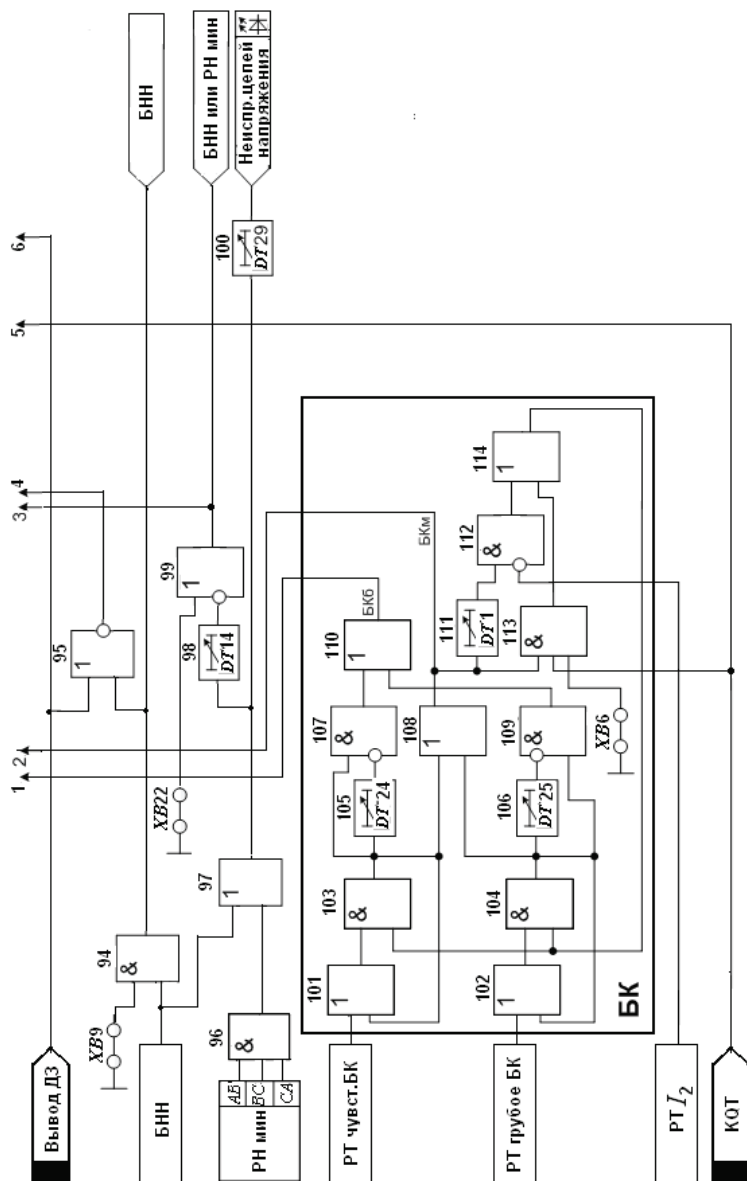


Рис. 2.11. Упрощенная функциональная схема логической части ДЗ АТ терминала БЭ2704V071

Действие направленных ступеней ДЗ (на примере комплекта защиты, установленного на стороне 220 кВ) осуществляется следующим образом.

В случае возникновения КЗ в АТ (точка К1 на рис. 2.7) I ступень ДЗ через логические элементы ИЛИ (75), И (78), ИЛИ (80) и элемент задержки *DT20* (81) подействует на отключение АТ со всех сторон: на отключение выключателя *Q1* или заменяющего его ОВ своей стороны, на отключение выключателя *Q2* или заменяющего его ОВ смежной стороны и на отключение выключателя *Q3* стороны НН. Одновременно производится пуск УРОВ и запрет АПВ выключателей всех сторон АТ.

Сигналы о срабатывании РС I ступени и о действии I ступени на отключение АТ через логический элемент ИЛИ (82) выдаются в схему сигнализации.

Если КЗ происходит на смежной стороне между АТ и местом установки ТТ (точка К2 на рис. 2.7) в зоне работы II ступени ДЗ, то при наличии сигнала ускорения от смежной стороны, который выдается при срабатывании РС II ступени ДЗ смежной стороны и установленной накладке *SB20* (действие II ступени предусмотрено) через логические элементы И (86), ЗАПРЕТ (79) и ИЛИ (80), также с выдержкой времени, установленной на элементе задержки *DT20* (81), выполняется действие на отключение АТ со всех сторон. Дополнительно контролируется отсутствие сигнала срабатывания РС III ступени ДЗ, задержанного на выдержку времени *DT16* (64).

Одновременно с этим через логические элементы И (119) и ИЛИ (120) подается сигнал о срабатывании II ступени ДЗ.

Если КЗ происходит на смежной стороне в зоне работы РС II ступени ДЗ (точка К3 на рис. 2.7) и сигнал ускорения от смежной стороны отсутствует, то защита с первой выдержкой времени, установленной на элементе задержки *DT17* (91), действует на отключение шиносоединительного (ШСВ) и секционного (СВ) выключателей смежной стороны, далее со второй (на ступень селективности большей) выдержкой времени — на отклю-

чение выключателя смежной стороны или заменяющего его ОВ и с третьей (еще на ступень селективности большей) выдержкой времени — на отключение АТ со всех сторон: на отключение выключателя $Q1$ или заменяющего его ОВ своей стороны, и на отключение выключателя $Q2$ или заменяющего его ОВ смежной стороны, и на отключение выключателя $Q3$ стороны НН.

При срабатывании РС II ступени через логические элементы И (86), И (89) и И (92) выдается сигнал в схему АУВ и далее через логические элементы И (93), ЗАПРЕТ (118), — на ускорение ДЗ смежной стороны через выходное реле терминала. Ускорение ДЗ смежной стороны производится также при фиксации отключенного состояния выключателя своей стороны подачей входного сигнала KQT через логические элементы ИЛИ (93) и ЗАПРЕТ (118).

Действие РС II ступени ДЗ может быть запрещено снятием программной накладки $XB20$.

При внешних КЗ (точка К4 на рис. 2.7) в зоне работы РС III или IV ступеней эти ступени действуют с выдержками времени, установленными на элементах задержки $DT2$ (71) и $DT3$ (73) соответственно через логический элемент ИЛИ (74) на отключение ШСВ и СВ своей стороны, далее на отключение выключателя своей стороны или заменяющего его ОВ и на отключение АТ со всех сторон, как описано выше.

Действие III ступени ДЗ происходит по цепи, включающей логические элементы И (62) и ИЛИ (69).

Схемой логики ДЗ предусмотрен подхват отключающего импульса РС III ступени от РС ненаправленной ступени при работе защиты по памяти при близких трехфазных внешних КЗ, когда все междуфазные напряжения на входе РС близки к нулю. Для этого сигнал о срабатывании ненаправленной ступени через логический элемент ИЛИ (61) подается на вход элемента ИЛИ (62). В этом режиме для определения направленности ступеней в течение времени не менее 0,06 с используются соответствующие напряжения предаварийного режима.

Возвращение схемы возврата в исходное состояние происходит только после возврата РС ненаправленной ступени.

Действие IV ступени ДЗ происходит по цепи, включающей логические элементы ИЛИ (63), И (68) и И (70).

Вывод защиты из работы осуществляется путем подачи единичного сигнала со входа «Вывод ДЗ» на вход логического элемента ИЛИ-НЕ (95). При этом на один из входов элементов И (69), И (70), И (78) и И (89) поступает сигнал нулевого уровня, запрещая прохождение через них сигналов от измерительных РС.

Отключение ШСВ и СВ смежной стороны, ШСВ и СВ своей стороны производится с использованием выходных реле терминала и внешних реле шкафа.

Отключение выключателя своей стороны выполняется схемой АУВ через выходные реле терминала. Если присоединение стороны переведено на ОВ, то действие на его отключение осуществляется через выходное реле терминала с использованием внешнего реле шкафа.

Действия на отключение выключателя смежной стороны и на заменяющий его ОВ, выключателя стороны НН осуществляются через выходные реле терминала и внешние реле шкафа.

Действия на пуск УРОВ и запрет АПВ выключателя своей стороны выполняются внутренними сигналами схемы АУВ, а выдача соответствующих сигналов на ОВ своей стороны — выходными реле терминала.

Сигнал в схему логики ДЗ о переводе присоединения своей стороны на ОВ принимается от оперативного переключателя SA11 «Обходной выключатель» через дискретный вход терминала (27). Аналогичный сигнал о переводе присоединения смежной стороны на ОВ принимается в схему логики с дискретного входа терминала (39).

С использованием программной накладки XB9 все ступени ДЗ могут быть заблокированы при неисправностях в цепях переменного напряжения, выявляемых устройством БНН. Бло-

кирование действия защиты осуществляется по цепи, включающей логические элементы И (94) и ИЛИ-НЕ (95), путем подачи сигналов нулевого уровня на входы логических элементов И (69), И (70), И (78) и И (89).

Для дополнительного контроля одновременного исчезновения всех фазных напряжений используются три реле минимального напряжения в фазах *A*, *B* и *C*, включенные по схеме И (96). При наличии длительного сигнала, превышающего выдержку времени элемента задержки *DT14* (98), об исчезновении всех фазных напряжений или при срабатывании БНН, ступени ДЗ, направленные в АТ, могут быть заблокированы путем подачи сигнала нулевого уровня с выхода элемента ЗАПРЕТ (99) на входы логических элементов И (78) и И (89). Действие этой блокировки вводится программной накладкой *XB22*.

Сигналы срабатывания БНН или дополнительных реле минимального напряжения с выдержкой времени, установленной на элементе задержки *DT29* (100), выдаются в цепи сигнализации.

Устройство БК является дополнительным пусковым органом, разрешающим действие ДЗ при коротких замыканиях. При срабатывании оно выдает два сигнала:

- сигнал БКб, разрешающий ввод в работу быстродействующих ступеней ДЗ (I и III), поступает с выхода логического элемента ИЛИ (110) через элемент ИЛИ (65), программный переключатель (72) и элемент И (67) на вход логического элемента И (69);
- сигнал БКм, разрешающий ввод в работу медленнодействующих ступеней ДЗ (II и IV), поступает с выхода логического элемента ИЛИ (108) через элементы ИЛИ (66) и И (68) на вход логического элемента И (70), а через элементы ИЛИ (84) и И (86) на вход логического элемента И (90).

Сигнал о срабатывании чувствительного органа БК «РТ чувст. БК» через логические элементы ИЛИ (101), И (103) и ЗА-

ПРЕТ (107) подается на первый вход элемента ИЛИ (110), а сигнал о срабатывании грубого органа БК «РТ грубое БК» через логические элементы ИЛИ (102), И (104) и ЗАПРЕТ (109) подается на второй вход элемента ИЛИ (110), вызывая появление сигнала БКб на его выходе. Продолжительность существования этого сигнала, достаточная для работы быстродействующих ступеней ДЗ, определяется выдержками времени, установленными на элементах задержки $DT24$ (105) и $DT25$ (106). После срабатывания элементов задержки $DT24$ (105) и $DT25$ (106) сигналы с их выходов поступают на инверсные входы элементов ЗАПРЕТ (107) и ЗАПРЕТ (109), в результате чего сигнал БКб исчезает и быстродействующие ступени ДЗ выводятся из работы.

Сигнал БКм появляется на выходе логического элемента ИЛИ (108) также в результате срабатывания чувствительного или грубого органов БК, а продолжительность его существования при отсутствии сигнала о срабатывании реле тока I_2 определяется выдержкой времени, установленной на элементе задержки $DT1$ (111). Это время, кроме того, определяет возврат устройства БК в исходное состояние и готовность его к новому действию.

Если при КЗ произойдет срабатывание реле тока I_2 , то медленнодействующие ступени будут введены в работу до его возврата.

Имеется возможность разрешить работу быстродействующих ступеней ДЗ в течение времени ввода медленнодействующих ступеней от сигнала БКм путем установки программной накладки $XB5$.

В нормальном режиме работы с возникновением режима качаний РС могут работать. При этом реле тока БК, отстроенные от режима качаний выбором уставок по изменению токов обратной и прямой последовательностей, не срабатывают и блокируют прохождение сигналов срабатывания от РС.

В случае возникновения КЗ вместе с РС срабатывают и реле БК, которые разрешают прохождение сигналов срабатывания защиты:

- от РС быстродействующих ступеней на время, определяемое выдержкой времени элемента $DT24$ (105) при срабатывании чувствительного реле тока БК или элемента $DT25$ (106) при срабатывании грубого БК;
- от РС медленнодействующих ступеней на время, определяемое выдержкой времени элемента $DT1$ (111), и далее на все время, пока реле тока I_2 находится в сработанном состоянии.

Если КЗ происходит в зоне действия III и IV ступеней и РС IV ступени срабатывают в течение времени ввода их в работу от БК, то для III ступени разрешающий сигнал от БК удерживается даже по истечении времени ввода за счет наличия обратной связи с выхода элемента И (67) на вход элемента ИЛИ (65). Возврат схемы в исходное состояние происходит только после возврата РС IV ступени.

Если РС I и III ступени не срабатывают в течение времени ввода, то их повторный ввод возможен только после отработки выдержки времени $DT1$ (111). Если после отработки выдержки времени $DT24$ (105) после первого запуска БК происходит срабатывание грубого реле (при повторных КЗ, КЗ на фоне качаний и т. п.), то разрешается повторный ввод быстродействующих ступеней на время $DT25$ (106). Отсчет выдержки времени $DT1$ (111) начинается с момента первого запуска БК.

Медленнодействующие ступени ДЗ вводятся в работу разрешающим сигналом БК на время, заданное выдержкой времени $DT1$ (111). Однако разрешается их действие на все время, пока реле тока I_2 находится в сработанном состоянии.

Для обеспечения действия на отключение быстродействующих ступеней ДЗ после включения на КЗ в режиме АПВ, накладкой $XB6$ можно по сигналу KQT при отключении выключателя разрешить ускоренный возврат схемы БК.

2.3.3. Расчет параметров дистанционной защиты АТ

Расчет сопротивлений срабатывания измерительных органов дистанционной защиты АТ

Первая ступень ДЗ (направленная в АТ)

Сопротивление срабатывания I ступени защиты определяется по условию отстройки от КЗ на стороне смежного (ВН или СН) напряжения АТ

$$Z_{сз}^I \leq \frac{Z_{АТ}}{k_{отс}}, \quad (2.27)$$

где $Z_{АТ}$ — суммарное сопротивление обмоток сторон ВН и СН АТ, приведенное к напряжению стороны, где установлена защита; $k_{отс}$ — коэффициент отстройки.

Вторая ступень ДЗ (направленная в АТ)

Сопротивление срабатывания II ступени защиты ($Z_{сз}^{II}$) определяется по условию согласования с III ступенью ДЗ АТ, установленной на стороне смежного (ВН или СН) напряжения АТ,

$$Z_{сз}^{II} \leq \frac{Z_{АТ} + Z_{сз.АТ(см.ст)}^{III}}{k_{отс}}, \quad (2.28)$$

где $Z_{АТ}$ и $Z_{сз.АТ}^{III}$ — суммарное сопротивление обмоток сторон ВН и СН АТ и сопротивление срабатывания III ступени ДЗ, установленной на стороне смежного напряжения АТ, которые приведены к напряжению стороны, где установлена защита; $k_{отс}$ — коэффициент отстройки.

Третья ступень ДЗ (направленная в сеть ВН или СН)

Сопротивление срабатывания III ступени ДЗ определяется по условию согласования с первыми ступенями ДЗ смежных линий сети, примыкающей к той стороне АТ, на которой установлена защита,

$$Z_{сз}^{III} \leq \frac{Z_{сз.ВЛ}^I}{k_{отс} k_{ток}}, \quad (2.29)$$

где $Z_{сз.ВЛ}^I$ — сопротивление срабатывания I ступени ДЗ линии; $k_{отс}$ — коэффициент отстройки; $k_{ток}$ — коэффициент токораспределения, равный отношению токов в месте установки защиты АТ и в линии при КЗ в конце ЛЭП.

При определении $Z_{сз}^{III}$ по согласованию с $Z_{сз.ВЛ}^I$ нескольких линий в качестве окончательного значения необходимо принимать наименьшее из них.

Четвертая ступень ДЗ (направленная в сеть ВН или СН)

Определение сопротивления срабатывания IV ступени ($Z_{сз}^{IV}$) аналогично вышеуказанному условию для III ступени с той лишь разницей, что согласование выполняется со вторыми ступенями ДЗ линий сети, примыкающей к той стороне АТ, на которой установлена защита, либо производится отстройка $Z_{сз}^{IV}$ от минимального значения сопротивления нагрузки в месте установки защиты в послеаварийном максимальном нагрузочном режиме $Z_{нагр. расч}$.

Модуль сопротивления $Z_{нагр. расч}$ определяется по выражению (1.25) со с. 71, фаза этого вектора — по выражению (1.26), а значение $Z_{сз}^{IV}$ — по выражению (1.27).

Значение $k_{отс}$ в выражениях (2.27), (2.28), (2.29) и (1.27) рекомендуется принимать равным 1,15–1,2.

Задание уставок реле сопротивления

Уставки реле сопротивления каждой из ступеней защиты задаются вторичными значениями сопротивлений срабатывания $R_{уст}$ и $X_{уст}$, а также углами φ_1 — φ_3 их характеристик.

Вторичные значения сопротивлений срабатывания определяются по выражению (1.20) (с. 35). Диапазон изменения параметров, определяющих значения сопротивлений срабатывания и форму характеристик реле сопротивления направленных ступеней ДЗ шкафа ШЭ2607 071, указан в табл. 2.2.

Рекомендуемые значения углов φ_1 — φ_3 реле сопротивления: $\varphi_1 = \varphi_{м.ч}$ (для I ступени $\varphi_{лин}$); $\varphi_2 = -10...-15^\circ$; $\varphi_3 = 130...135^\circ$.

Проверка чувствительности различных ступеней ДЗ АТ

Определяющим условием выбора сопротивления срабатывания II и IV ступеней ДЗ является обеспечение нормируемой чувствительности в установленной зоне.

Коэффициенты чувствительности определяются по следующим выражениям:

- для II ступени

$$k_{ч} = \frac{Z_{C3}^{II}}{Z_{AT}}, \quad (2.30)$$

- для IV ступени

$$k_{ч} = \frac{Z_{C3}^{IV}}{Z_{3AM}}, \quad (2.31)$$

где Z_{AT} — модуль суммарного сопротивления обмоток ВН и СН АТ, приведенного к напряжению стороны АТ, где установлена защита; Z_{3AM} — модуль сопротивления, замеряемый защитой при КЗ в конце ВЛ данного класса напряжения.

Согласно ПУЭ [4] чувствительность II ступени ДЗ к металлическим междуфазным КЗ на шинах смежного напряжения

АТ должна быть не ниже 1,25, а для IV ступени ДЗ — не ниже 1,2 при КЗ в зоне резервирования.

Для правильной работы защиты (обеспечения селективности и чувствительности) необходимо выполнить проверку чувствительности каждой ступени ДЗ по току точной работы при КЗ между тремя фазами в расчетной точке в соответствии с выражением (1.30) (с. 73).

Выбор параметров срабатывания устройства блокировки при качаниях

По степени чувствительности к режиму несимметрии токов БК имеет два пусковых органа (реле тока): чувствительный и грубый.

Диапазоны уставок пусковых органов БК, расчет их параметров и значения коэффициентов чувствительности при КЗ в основной зоне и в зоне резервирования аналогичны дистанционной защите ВЛ шкафа ШЭ2607 016.

Определение времени срабатывания различных ступеней ДЗ АТ

Первая ступень защиты, направленная в сторону АТ, действует без выдержки времени на отключение его со всех сторон. Остальные ступени ДЗ АТ действуют с тремя выдержками времени:

- с первой (наименьшей) выдержкой времени ($t_{C3.1}$) на отключение СВ и ШСВ сборных шин стороны смежного напряжения (стороны ВН или СН АТ);
- со второй (на ступень селективности большей) выдержкой времени ($t_{C3.2} = t_{C3.1} + \Delta t$) на отключение выключателя АТ стороны смежного напряжения (стороны ВН или СН АТ);

- с третьей (наибольшей) выдержкой времени ($t_{C3,3} = t_{C3,2} + \Delta t$) на полное отключение АТ.

Значение Δt принимается равным 0,3 с.

Ниже приводятся указания по определению первых (наименьших) выдержек времени II, III и IV ступеней ДЗ АТ.

Наименьшее время действия II ступени ДЗ АТ согласуется со временем действия III ступени ДЗ АТ, установленной на стороне смежного напряжения, по выражению

$$t_{C3,AT}^{II} = t_{C3,AT (CM,CT)}^{III} + \Delta t. \quad (2.32)$$

Наименьшее время действия III ступени ДЗ АТ согласуется со временем действия I (или II) ступеней ДЗ линий сети, примыкающей к той стороне АТ, где установлена защита, по выражению

$$t_{C3,AT}^{III} = t_{C3,ВЛ}^{I(II)} + \Delta t. \quad (2.33)$$

Наименьшее время действия IV ступени ДЗ АТ согласуется со временем действия III ступеней ДЗ линий сети, примыкающей к той стороне АТ, где установлена защита, по выражению

$$t_{C3,AT}^{IV} = t_{C3,ВЛ}^{III} + \Delta t. \quad (2.34)$$

Пример расчета параметров дистанционной защиты АТ

В примере рассмотрен расчет параметров дистанционной защиты АТ1, установленного на ПС 1 (см. рис. 1.5 на с. 36). В расчете используются исходные данные из табл. 1.6–1.8.

Значения токов КЗ и коэффициентов токораспределения, необходимые для расчета параметров дистанционной защиты АТ1, приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

**Значения токов КЗ и коэффициентов токораспределения
для расчета ДЗ АТ**

Точка КЗ	Режим работы	Токи в элементах, А			Коэффициенты токорас- пределения
		АТ1	ВЛ1	ВЛ3	
К2	С1-мин, откл. АТ2	323	2462	—	$k_{\text{ТОК.1}} = \frac{I_{\text{КЗ.АТ1}}}{I_{\text{КЗ.ВЛ1}}} = \frac{323}{2462} = 0,13$
К6	С3-мин, откл. АТ2	908	—	1008	$k_{\text{ТОК.2}} = \frac{I_{\text{КЗ.АТ1}}}{I_{\text{КЗ.ВЛ3}}} = \frac{908}{1008} = 0,9$

Дистанционная защита стороны 220 кВ АТ1

Первая ступень ДЗ (направленная в АТ1)

Сопротивление срабатывания I ступени дистанционной защиты определяется по выражению (2.27).

Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,15$ и $Z_{\text{АТ}} = 1,03 + j46,5$ Ом, получим

$$Z_{\text{сз.АТ(220)}}^{\text{I}} \leq \frac{Z_{\text{АТ}}}{k_{\text{отс}}} = \frac{1,03 + j46,5}{1,15} = 0,9 + j40,4 = 40,41 \angle 88,7^\circ \text{ Ом.}$$

Принимаем $Z_{\text{сз.АТ(220)}}^{\text{I}} = 0,9 + j40,4$ Ом.

Вторая ступень ДЗ (направленная в АТ1)

Сопротивление срабатывания II ступени дистанционной защиты определяется по выражению (2.28). Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,15$, $Z_{\text{АТ}} = 1,03 + j46,5$ Ом и

$$Z_{\text{сз.АТ(СМ.СТ)}}^{\text{III}} = Z_{\text{сз.АТ(110)}}^{\text{III}} K_{\text{АТ}}^2 = (5 + j17) \cdot \left(\frac{230}{115} \right)^2 = 20 + j68 \text{ Ом,}$$

получим

$$Z_{\text{сз.АТ(220)}}^{\text{II}} \leq \frac{Z_{\text{АТ}} + Z_{\text{сз.АТ(СМ.СТ)}}^{\text{III}}}{k_{\text{отс}}} = \frac{(1,03 + j46,5) + (20 + j68)}{1,15} =$$

$$= 18,35 + j99,56 = 101,24 \angle 77,5^\circ \text{ Ом.}$$

Принимаем $Z_{\text{сз.АТ(220)}}^{\text{II}} = 18,35 + j99,56 \text{ Ом.}$

Коэффициент чувствительности II ступени ДЗ АТ определяется по выражению (2.30)

$$k_{\text{ч}} = \frac{Z_{\text{сз.АТ}}^{\text{II}}}{Z_{\text{АТ}}} = \frac{101,24}{46,51} = 2,2 > 1,25.$$

Третья ступень ДЗ (направленная в сеть 220 кВ)

Сопротивление срабатывания III ступени дистанционной защиты определяется по выражению (2.29). Принимая значения $k_{\text{отс}} = 1,15$, $k_{\text{ТОК.1}} = 0,13$ и $Z_{\text{сз.ВЛ1}}^{\text{I}} = 8,69 + j38,08 \text{ Ом}$, получим

$$Z_{\text{сз.АТ(220)}}^{\text{III}} \leq \frac{Z_{\text{сз.ВЛ1}}^{\text{I}}}{k_{\text{отс}} k_{\text{ТОК.1}}} = \frac{8,69 + j38,08}{1,15 \cdot 0,13} = 57,9 + j253,86 =$$

$$= 260,04 \angle 77,15^\circ \text{ Ом.}$$

Принимаем $Z_{\text{сз.АТ(220)}}^{\text{III}} = 57,9 + j253,86 \text{ Ом.}$

Четвертая ступень ДЗ (направленная в сеть 220 кВ)

Сопротивление срабатывания IV ступени дистанционной защиты определяем по условию отстройки от минимально возможного значения сопротивления нагрузки в месте установки защиты согласно выражению (1.30).

Принимая $I_{\text{РАБ. МАКС}} = 314 \text{ А}$, $k_{\text{отс}} = 1,2$, $k_{\text{В}} = 1,05$, $\varphi_{\text{Л}} = 77,1^\circ$ и $\varphi_{\text{НАГР}} = 25,8^\circ$, получим

$$Z_{сз.АТ(220)}^{IV} \leq \frac{U_{\text{МИН}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{РАБ.МАКС}} k_{\text{отс}} k_B \cos(\varphi_{\text{Л}} - \varphi_{\text{НАГР}})} =$$

$$= \frac{0,9 \cdot 220 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 314 \cdot 1,2 \cdot 1,05 \cdot 0,625} = 462,3 \text{ Ом.}$$

Модулю этого сопротивления соответствует угол $\varphi_{\text{Л}} = 77,1^\circ$. Поэтому комплексное значение $Z_{сз.АТ(220)}^{IV} = 103,3 + j451,12 \text{ Ом.}$

Принимаем $Z_{сз.АТ(220)}^{IV} = 103,3 + j451,12 \text{ Ом.}$

Коэффициент чувствительности IV ступени ДЗ АТ определяется по выражению (2.31)

$$k_{\text{ч}} = \frac{Z_{\text{СЗ}}^{IV}}{Z_{\text{ЗАМ}}} = \frac{462,8}{345,38} = 1,34 > 1,2.$$

Дистанционная защита стороны 110 кВ АТ1

Первая ступень ДЗ (направленная в АТ1)

Сопротивление срабатывания I ступени дистанционной защиты определяется по выражению (2.27). Принимая значения $k_{\text{отс}} = 1,15$ и $Z_{\text{АТ}(110)} = \frac{Z_{\text{АТ}(220)}}{K_{\text{АТ}}^2}$, получим

$$Z_{сз.АТ(110)}^I \leq \frac{Z_{\text{АТ}(220)}}{k_{\text{отс}} K_{\text{АТ}}^2} = \frac{1,03 + j46,5}{1,15} \cdot \left(\frac{115}{230} \right)^2 =$$

$$= 0,224 + j10,1 = 10,102 \angle 88,7^\circ \text{ Ом.}$$

Принимаем $Z_{сз.АТ(110)}^I = 0,224 + j10,1 \text{ Ом.}$

Вторая ступень ДЗ (направленная в АТ1)

Сопротивление срабатывания II ступени дистанционной защиты определяется по выражению (2.28). Принимая значения $k_{\text{отс}} = 1,15$, получим

$$Z_{AT(110)} = \frac{Z_{AT(220)}}{K_{AT}^2} \text{ и } Z_{C3.AT(CM.CT)}^{III} = \frac{Z_{C3.AT(220)}^{III}}{K_{AT}^2},$$

$$Z_{C3.AT(110)}^{II} \leq \frac{Z_{AT(220)} + Z_{C3.AT(220)}^{III}}{k_{отс} \cdot K_{AT}^2} = \frac{(1,03 + j46,5) + (57,9 + j253,86)}{1,15} \cdot \left(\frac{115}{230}\right)^2 =$$

$$= 12,8 + j65,29 = 66,53 \angle 87,7^\circ \text{ Ом.}$$

Коэффициент чувствительности II степени ДЗ АТ определяется по выражению (2.30)

$$k_{\text{ч}} = \frac{Z_{C3.AT(110)}^{II}}{Z_{AT(110)}} = \frac{66,53}{46,51 \cdot \left(\frac{115}{230}\right)^2} = 5,7 > 1,25.$$

Принимаем $Z_{C3.AT(110)}^{II} = 12,8 + j65,29 \text{ Ом.}$

Третья ступень ДЗ (направленная в сеть 110 кВ)

Сопротивление срабатывания III степени дистанционной защиты определяется по выражению (2.29). Принимая значения $k_{отс} = 1,15$, $k_{ТОК.2} = 0,9$

$$\text{и } Z_{C3.ВЛ3}^I = \frac{Z_{ВЛ3}}{k_{отс}} = \frac{6 + j20,25}{1,15} = 5,2 + j17,6 \text{ Ом,}$$

получим

$$Z_{C3.AT(110)}^{III} \leq \frac{Z_{C3.ВЛ3}^I}{k_{отс} \cdot k_{ТОК.2}} = \frac{5,2 + j17,6}{1,15 \cdot 0,9} = 5,02 + j17,0 = 17,72 \angle 72,8^\circ \text{ Ом.}$$

Принимаем $Z_{C3.AT(110)}^{III} = 5,0 + j17,0 \text{ Ом.}$

Четвертая ступень ДЗ (направленная в сеть 110 кВ)

Сопротивление срабатывания IV степени дистанционной защиты определяем по условию отстройки от минимально возможного значения сопротивления нагрузки в месте уста-

новки защиты согласно выражению (1.27). Принимая значения $I_{\text{РАБ. МАКС}} = 597 \text{ А}$, $k_{\text{ОТС}} = 1,2$, $k_{\text{В}} = 1,05$, $\varphi_{\text{Л}} = 73,7^\circ$ и $\varphi_{\text{НАГР}} = 25,8^\circ$, получим

$$\begin{aligned} Z_{\text{сз.АТ(110)}}^{\text{IV}} &\leq \frac{U_{\text{МИН}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{РАБ. МАКС}} k_{\text{отс}} k_{\text{В}} \cos(\varphi_{\text{Л}} - \varphi_{\text{НАГР}})} = \\ &= \frac{0,9 \cdot 110 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 597 \cdot 1,2 \cdot 1,05 \cdot 0,67} = 113,5 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Модулю этого сопротивления соответствует угол $\varphi_{\text{Л}} = 73,7^\circ$. Поэтому комплексное значение $Z_{\text{сз.АТ(110)}}^{\text{IV}} = 31,88 + j108,93 \text{ Ом}$.

Принимаем $Z_{\text{сз.АТ(110)}}^{\text{IV}} = 31,88 + j108,93 \text{ Ом}$.

Коэффициент чувствительности IV ступени ДЗ АТ определяется по выражению (2.31).

Принимая значение $Z_{\text{ЗАМ(110)}} = \frac{Z_{\text{ВЛЗ}}}{k_{\text{ТОК2}}} = \frac{21,1}{0,45} = 46,88 \text{ Ом}$, получим

$$k_{\text{Ч}} = \frac{Z_{\text{сз.АТ(110)}}^{\text{IV}}}{Z_{\text{ЗАМ(110)}}} = \frac{115,7}{46,88} = 2,46 > 1,2.$$

Приведение первичных параметров срабатывания реле сопротивления дистанционных защит ко вторичным цепям ТТ и ТН

Вторичные параметры срабатывания реле сопротивления различных ступеней ДЗ определяются по выражению (1.20) (с. 35).

Для ДЗ АТ стороны 220 кВ при $K_{\text{ТТ}} = 1000/5$ и $K_{\text{ТН}} = 220000/100$ имеем:

- для I ступени $R_{\text{УСТ}} = 0,08 \text{ Ом}$ и $X_{\text{УСТ}} = 3,63 \text{ Ом}$;
- для II ступени $R_{\text{УСТ}} = 1,65 \text{ Ом}$ и $X_{\text{УСТ}} = 8,96 \text{ Ом}$;
- для III ступени $R_{\text{УСТ}} = 5,21 \text{ Ом}$ и $X_{\text{УСТ}} = 22,84 \text{ Ом}$;
- для IV ступени $R_{\text{УСТ}} = 9,29 \text{ Ом}$ и $X_{\text{УСТ}} = 37,36 \text{ Ом}$.

Для ДЗ АТ стороны 110 кВ при $K_{\text{ГТ}} = 1000/5$ и $K_{\text{ТН}} = 110000/100$ имеем:

- для I ступени $R_{\text{УСТ}} = 0,04$ Ом и $X_{\text{УСТ}} = 1,81$ Ом;
- для II ступени $R_{\text{УСТ}} = 2,3$ Ом и $X_{\text{УСТ}} = 11,75$ Ом;
- для III ступени $R_{\text{УСТ}} = 0,9$ Ом и $X_{\text{УСТ}} = 3,06$ Ом;
- для IV ступени $R_{\text{УСТ}} = 5,79$ Ом и $X_{\text{УСТ}} = 19,80$ Ом.

Принятые значения уставок дистанционной защиты АТ1 ПС А шкафа ШЭ2607/071 по сопротивлению срабатывания приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Уставки по сопротивлению срабатывания дистанционной защиты АТ1

Наименование уставки	Значение уставки	
	Сто- рона 220 кВ	Сто- рона 110 кВ
Уставка по оси X характеристики РС I ступени, Ом (0,2–100, шаг 0,01)	3,63	1,81
Уставка по оси R характеристики РС I ступени, Ом (0,2–100, шаг 0,01)	0,2	0,2
Угол наклона φ_1 характеристики РС I ступени, ° (45–90, шаг 1,0)	89	89
Уставка по оси X характеристики РС II ступени, Ом (0,2–100, шаг 0,01)	8,96	11,75
Уставка по оси R характеристики РС II ступени, Ом (0,2–100, шаг 0,01)	1,65	2,30
Угол наклона φ_1 характеристики РС II ступени, ° (45–89, шаг 1,0)	77	88
Угол наклона φ_3 нижней левой части характеристик РС I и II ступени, ° (91–179, шаг 1)	150	150
Угол наклона φ_2 нижней правой части характеристик РС I и II ступени, ° (–89...+89, шаг 1)	20	20
Уставка по оси X характеристики РС III ступени, Ом (0,2–100, шаг 0,01)	22,84	3,06
Уставка по оси R характеристики РС III ступени, Ом (0,2–100, шаг 0,01)	5,21	0,9
Угол наклона φ_1 характеристики РС III ступени, ° (45–89, шаг 1)	79	73

Окончание табл. 2.6

Наименование уставки	Значение уставки	
	Сто- рона 220 кВ	Сто- рона 110 кВ
Угол наклона φ_3 нижней левой части характеристики РС III ступени, ° (91–179, шаг 1)	115	115
Угол наклона φ_2 нижней правой части характеристики РС III ступени, ° (–89...+89, шаг 1)	–10	–10
Уставка по оси X характеристики РС IV ступени, Ом (0,2–100, шаг 0,01)	37,36	9,29
Уставка по оси R характеристики РС IV ступени, Ом (0,2–100, шаг 0,01)	19,80	5,79
Угол наклона φ_1 характеристики РС IV ступени, ° (45–89, шаг 1)	77	74
Угол наклона φ_3 нижней левой части характеристики РС IV ступени, ° (91–179, шаг 1)	130	130
Угол наклона φ_2 нижней правой части характеристики РС IV ступени, ° (–89...+89, шаг 1)	20	20

Уставки по времени срабатывания различных ступеней ДЗ АТ1

Уставку по времени действия I ступени принимаем равной 0,05 с.

Наименьшие значения уставок по времени действия II, III и IV ступеней определяются по выражениям (2.32)–(2.34). Вторые значения уставок по времени действия каждой из этих ступеней получаются путем прибавления к ним ступени селективности (Δt), третьи — путем прибавления удвоенного значения ступени селективности ($2\Delta t$).

Принятые значения уставок по времени срабатывания всех ступеней дистанционных защит АТ1 приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Уставки по времени срабатывания дистанционных защит АТ1

Назначение уставки		Значение t_{C3} , с	
		для сторо- ны 220 кВ	для сторо- ны 110 кВ
Уставка на срабатывание I ступени ДЗ, с (0,000–15,000, шаг 0,001)		0,050	0,050
Уставка на срабатывание II ступени ДЗ, с (0,05–15,00, шаг 0,01)	$t_{C3.1}^{II}$	1,70	1,60
	$t_{C3.2}^{II}$	2,00	1,90
	$t_{C3.3}^{II}$	3,30	2,20
Уставка на срабатывание III ступени ДЗ, с (0,05–15,00, шаг 0,01)	$t_{C3.1}^{III}$	0,75	0,75
	$t_{C3.2}^{III}$	1,05	1,05
	$t_{C3.3}^{III}$	1,30	1,30
Уставка на срабатывание IV ступени ДЗ, с (0,05–15,00, шаг 0,01)	$t_{C3.1}^{IV}$	4,30	4,30
	$t_{C3.2}^{IV}$	4,60	4,60
	$t_{C3.3}^{IV}$	4,90	4,90

2.3.4. Устройство и работа токовых защит шкафа ШЭ2607 071

Токовые защиты шкафа ШЭ2607 071 включают в себя пятиступенчатую токовую направленную защиту нулевой последовательности, максимальную токовую защиту и трехфазную токовую отсечку.

Токовая направленная защита нулевой последовательности

Схема токовой направленной защиты нулевой последовательности содержит пять направленных ступеней, включающих:

- пять реле тока нулевой последовательности;
- два реле направления мощности нулевой последовательности (РНМНП);
- логическую часть.

Первые две ступени ТНЗНП предназначены для резервирования основных защит АТ, а три другие — для дальнего резервирования в сетях высшего и среднего напряжения и согласования защит смежных линий с защитами АТ.

Измерительные и пусковые органы ТНЗНП

Каждая из ступеней ТНЗНП содержит реле тока, реагирующее на ток нулевой последовательности. Обеспечивается отстройка II и IV ступеней ТНЗНП от апериодического и периодического бросков тока намагничивания.

Диапазон регулирования уставок по току срабатывания реле тока всех ступеней ТНЗНП $0,05–30 I_{\text{НОМ}}$. Средняя основная погрешность по току срабатывания реле тока ТНЗНП составляет не более 5 % от уставки.

Для обеспечения направленности ТНЗНП используются два РНМНП:

- прямой направленности, которое срабатывает при направлении мощности нулевой последовательности от АТ к шинам той стороны АТ, на которой установлена защита, т. е. при КЗ в защищаемом АТ;
- обратной направленности, которое срабатывает при обратном направлении мощности нулевой последовательности, т. е. при КЗ в сети того напряжения, на котором установлена защита.

Порог срабатывания реле направления мощности прямой и обратной направленности по току $3I_0 (I_{\text{ср}})$ регулируется в пределах $0,04–0,50 I_{\text{НОМ}}$, а по напряжению $3U_0 (U_{\text{ср}}) — 0,5–5 \text{ В}$.

Уставки РНМНП по углу максимальной чувствительности при утроенных по отношению к порогам срабатывания значениях тока и напряжения: у реле прямой направленности 250° , у реле обратной направленности — 70° . При этом обеспечивается минимальная угловая ширина зон срабатывания разрешающего и блокирующего РНМНП не менее 160° .

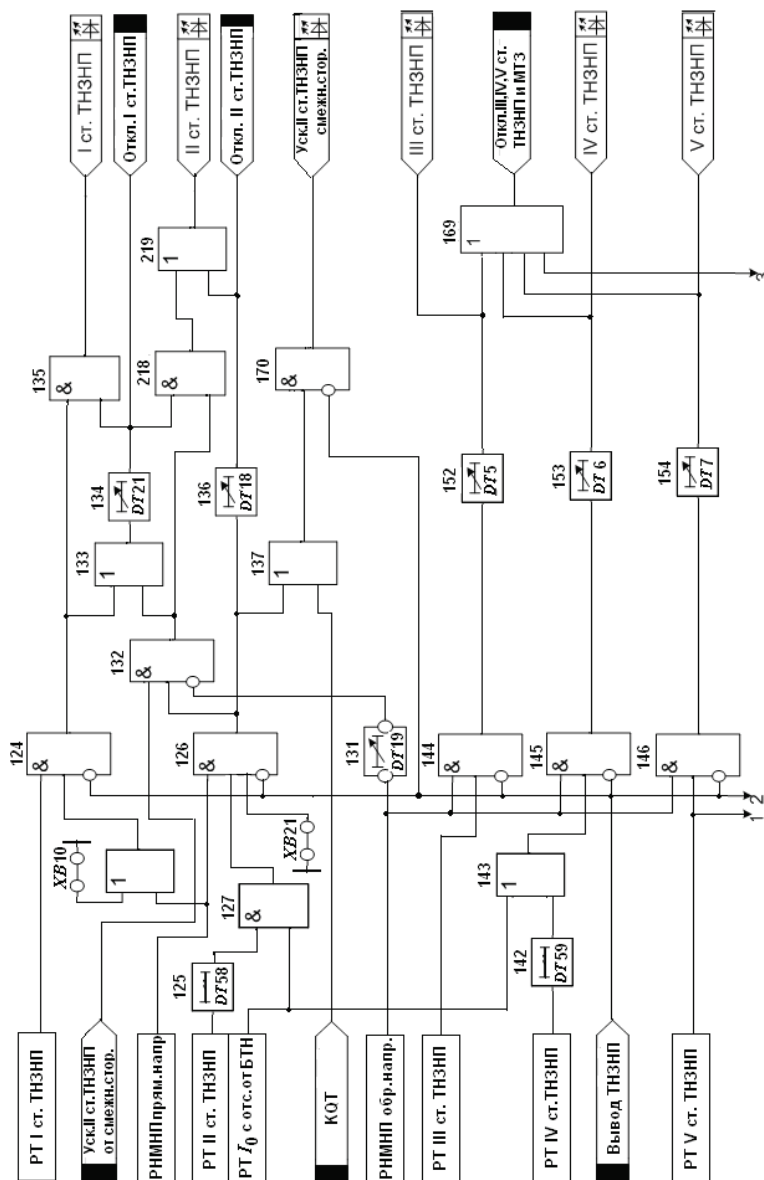


Рис. 2.12. Упрощенная функциональная схема логической части ТНЗНП и ТО АТ терминала БЭ2704V071

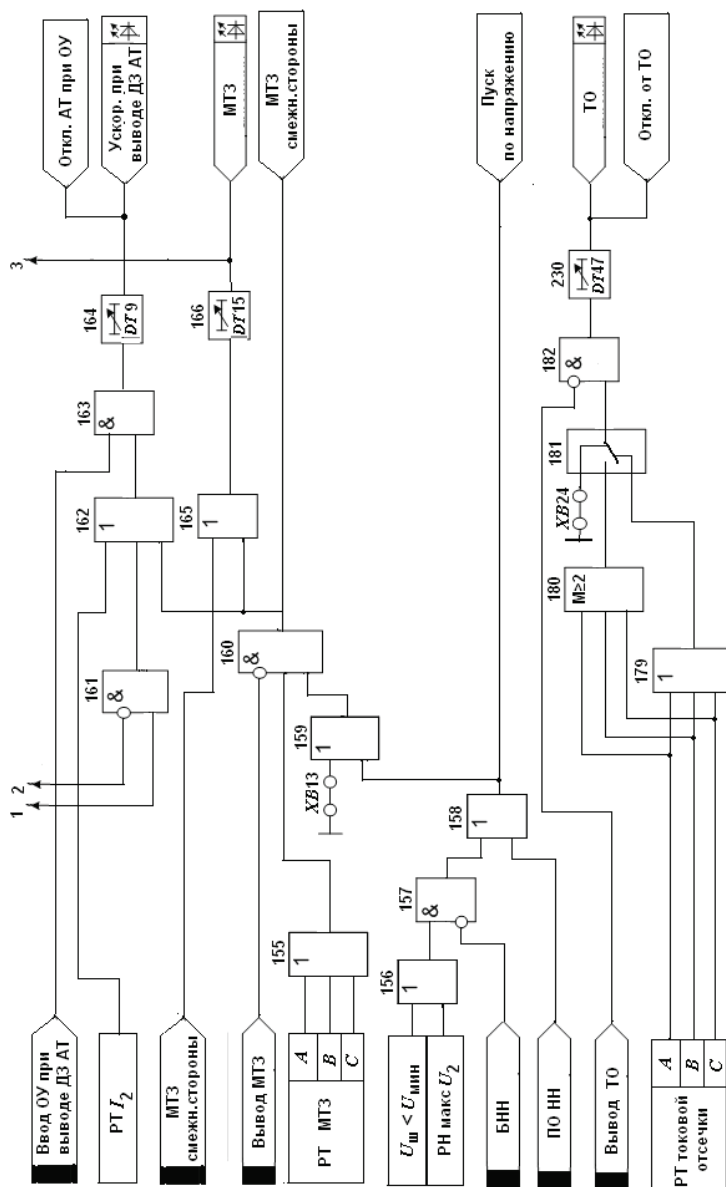


Рис. 2.13. Упрощенная функциональная схема логической части ТНЗНП и ТО АТ терминала БЭ2704V071

Функциональная схема логической части ТНЗНП, МТЗ и ТО

Упрощенная функциональная схема логической части ТНЗНП, МТЗ и ТО показана на рис. 2.12 и 2.13.

В табл. 2.8 перечислены программные накладки с указанием их положения, а в табл. 2.9 приведены наименования и назначения элементов задержки в функциональной схеме логической части ТНЗНП и ТО.

Таблица 2.8

Наименование и назначение программных накладок ТНЗНП и ТО

Наименование	Назначение	Положение	Значение по умолчанию
XB10	Контроль направленности I ступени ТНЗНП	1 — не предусмотрен	Не предусмотрен
		0 — предусмотрен	
XB13	Контроль направленности II ступени ТНЗНП	1 — не предусмотрен	Не предусмотрен
		0 — предусмотрен	
XB21	Ускорение действия II или III ступени ТНЗНП при включении выключателя	0 — не предусмотрено	Предусмотрено
		1 — предусмотрено	
XB24	Режим действия токовой отсечки	0 — пофазный	Междуфазный
		1 — междуфазный	

Таблица 2.9

Наименование и назначение элементов задержки ТНЗНП и ТО

Наименование	Назначение	Диапазон, с
DT5	Задержка на срабатывание III ступени ТНЗНП	0,05—15
DT6	Задержка на срабатывание IV ступени ТНЗНП	0,05—15
DT7	Задержка на срабатывание V ступени ТНЗНП	0,05—15
DT9	Задержка на срабатывание с оперативным ускорением при выводе ДЗТ	0,00—5
DT15	Задержка на срабатывание МТЗ	0,05—15
DT18	Задержка на срабатывание II ступени ТНЗНП	0,05—15

Окончание табл. 2.9

Наименование	Назначение	Диапазон, с
DT19	Время продления запрета отключения АТ от РНМНП обратной направленности	0,00–5
DT21	Задержка на срабатывание I ступени ТНЗНП	0,05–15
DT47	Задержка на срабатывание токовой отсечки	0,00–1,0
DT58	Задержка на срабатывание РТ IV ступени ТНЗНП для отстройки от апериодической составляющей тока	0,02
DT59	Задержка на срабатывание РТ II ступени ТНЗНП для отстройки от апериодической составляющей тока	0,02

Работа логической части токовой направленной защиты нулевой последовательности

Логическая схема ТНЗНП принимает сигналы от реле тока I, II, III, IV и V ступеней, РНМНП прямой и обратной направленности, сигнал ускорения от смежной стороны и сигнал от реле положения «Отключено» (*KQT*) выключателя своей стороны АТ или заменяющего его ОВ.

Срабатывание РТ I и II ступеней ТНЗНП контролируется РНМНП прямой направленности. Направленность I ступени может быть выведена установкой программной накладки *XB10*.

Действие различных ступеней ТНЗНП (на примере комплекта защиты, установленного на стороне 220 кВ) осуществляется следующим образом.

В случае возникновения КЗ в АТ (точка К1 на рис. 2.7) I ступень ТНЗНП через логические элементы ЗАПРЕТ (124), ИЛИ (133) и элемент задержки *DT21* (134) подействует на отключение АТ со всех сторон: на отключение выключателя *Q1* или заменяющего его ОВ своей стороны, на отключение выключателя *Q2* или заменяющего его ОВ смежной стороны

и на отключение выключателя $Q3$ стороны НН. Одновременно производится пуск УРОВ и запрет АПВ выключателей всех сторон АТ.

Сигналы о срабатывании РС I ступени и о действии I ступени на отключение АТ через логический элемент И (135) выдаются в схему сигнализации.

Если КЗ происходит на стороне смежного напряжения между АТ и местом установки ТТ (точка К2 на рис. 2.7), имеется сигнал ускорения, поступающий на вход схемы при срабатывании РТ II ступени ТНЗНП смежной стороны, и установлена накладка $SB21$ (действие II ступени предусмотрено), то через элемент задержки $DT58$ (125), и логические элементы И (127), ЗАПРЕТ (126) и (132), ИЛИ (133), и элемент задержки $DT21$ (134) II ступень с ускорением действует на отключение АТ со всех сторон. Дополнительно при этом контролируется отсутствие сигнала срабатывания РНМНП обратной направленности, задержанного на выдержку времени $DT19$ (131). Одновременно с этим через логические элементы И (218) и ИЛИ (219) подается сигнал о срабатывании II ступени ДЗ, производится пуск УРОВ и запрет АПВ выключателей всех сторон АТ.

При КЗ на стороне смежного напряжения АТ (точка К3 на рис. 2.7) в зоне работы II ступени ТНЗНП и при отсутствии сигнала ускорения от смежной стороны II ступень без ускорения через элемент задержки $DT58$ (125), логические элементы И (127), ЗАПРЕТ (126) и элемент задержки $DT18$ (136) с первой выдержкой времени, установленной на элементе $DT18$ (136), действует на отключение шиносоединительного (ШСВ) и секционного (СВ) выключателей смежной стороны, далее со второй (на ступень селективности большей) выдержкой времени — на отключение выключателя смежной стороны или заменяющего его ОВ и с третьей (еще на ступень селективности большей) выдержкой времени на отключение АТ со всех сторон: на отключение выключателя $Q1$ или заменяющего его ОВ своей стороны, на отключение выключателя $Q2$ или заменяю-

шего его ОВ смежной стороны и на отключение выключателя $Q3$ стороны НН.

При срабатывании РС II ступени через логические элементы ИЛИ (137) и ЗАПРЕТ (170) выдается сигнал на ускорение II ступени ТНЗНП смежной стороны через выходное реле терминала. Ускорение ТНЗНП смежной стороны производится также при фиксации отключенного состояния выключателя своей стороны или заменяющего его ОВ подачей входного сигнала KQT через логические элементы ИЛИ (137) и ЗАПРЕТ (170).

Действие РС II ступени ДЗ может быть запрещено снятием программной накладки $XB21$.

Ступени III, IV и V ТНЗНП контролируются РНМНП обратной направленности, и при КЗ на шинах своей стороны или на отходящих от них присоединениях (точка К4 на рис. 2.7) эти ступени действуют с выдержками времени, установленными на элементах задержки $DT5$ (152), $DT6$ (153) и $DT7$ (154) соответственно через логический элемент ИЛИ (169) на отключение ШСВ и СВ своей стороны, далее на отключение выключателя своей стороны или заменяющего его ОВ и на отключение АТ со всех сторон, как было описано выше.

Действие III–V ступеней ТНЗНП осуществляется следующим образом:

- по цепи III ступени через логический элемент ЗАПРЕТ (144) и элемент задержки $DT5$ (152);
- по цепи IV ступени через элемент задержки $DT59$ (142), логические элементы ИЛИ (143) и ЗАПРЕТ (145) и элемент задержки $DT6$ (153).
- по цепи V ступени через логические элементы ЗАПРЕТ (146) и элемент задержки $DT7$ (154).

Одновременно с этим сигналы о срабатывании III–IV ступеней ТНЗНП выдаются в схему сигнализации.

При выводе дифференциальной защиты АТ возможно оперативное ускорение действия защиты при срабатывании реле тока V ступени ТНЗНП, реле тока МТЗ или реле тока I_2 , ис-

пользуемого в схеме БК, подачей входного сигнала «Ввод ОУ при выводе ДЗ АТ». Через логические элементы ЗАПРЕТ (161), ИЛИ (162) и И (163) с выдержкой времени оперативного ускорения, установленной на элементе задержки $DT9$ (164), выполняется действие на отключение АТ со всех сторон.

Вывод защиты из работы осуществляется путем подачи единичного сигнала со входа «Вывод ТНЗНП» на инверсные входы логических элементов ЗАПРЕТ (124), ЗАПРЕТ (126), ЗАПРЕТ (144), ЗАПРЕТ (145), ЗАПРЕТ (146) и ЗАПРЕТ (161), запрещающих прохождение через них сигналов от измерительных РТ.

Максимальная токовая защита

Схема максимальной токовой защиты содержит:

- три реле максимального тока;
- комбинированный пусковой орган по напряжению;
- логическую часть.

Максимальная токовая защита предназначена для резервирования работы основных защит АТ и действия на отключение при внешних многофазных КЗ.

Логическая схема МТЗ (см. рис. 2.13) принимает сигналы от трех реле максимального тока, включенных на токи фаз А, В и С и объединенных по схеме ИЛИ (155), и от комбинированного пускового органа по напряжению.

В логике пускового органа по напряжению используются реле минимального напряжения $U_{\text{ш}} < U_{\text{мин}}$ и реле напряжения обратной последовательности U_2 , подключенные к ТН сборных шин своей стороны, а также пусковой орган по напряжению (ПО НН), подключенный к ТН сборных шин стороны НН.

Действие реле $U_{\text{ш}} < U_{\text{мин}}$ и U_2 блокируется при срабатывании БНН путем подачи сигнала на инверсный вход элемента ЗАПРЕТ (157).

Пусковой орган по напряжению в схеме МТЗ может быть выведен из работы с помощью программной накладки *XB13*.

Выходной сигнал пускового органа по напряжению выдается на выходное реле терминала «Пуск по напряжению».

Максимальная токовая защита действует с выдержкой времени, установленной на элементе задержки *DT15* (166), так же, как на III–V ступенях ТНЗНП, направленных в шины. Предусмотрено аналогичное действие защиты при приеме сигнала о срабатывании МТЗ смежной стороны и соответственно выдача сигнала о срабатывании МТЗ на смежную сторону.

Вывод защиты из работы производится при подаче единичного сигнала с входа «Вывод МТЗ» на инверсный вход логического элемента ЗАПРЕТ (160).

Токвая отсечка

Логическая схема ТО (см. рис. 2.13) принимает сигналы от трех реле максимального тока, включенных на токи фаз *A*, *B* и *C*, объединенных по схеме ИЛИ (179) и по мажоритарной схеме $M \geq 2$ (180). Режим действия ТО задается программной накладкой *XB24* и программным переключателем 181.

Токвая отсечка действует с выдержкой времени элемента *DT47* (230) на отключение АТ со всех сторон с пусками УРОВ и запретами АПВ отключаемых выключателей и выводится из работы подачей сигнала «Вывод ТО».

2.3.4. Расчет параметров токовых защит АТ шкафа ШЗ2607 071

Методика расчета параметров ТНЗНП АТ

Расчет параметров ступенчатой ТНЗНП АТ в общем случае сводится к определению:

- тока срабатывания отдельных ступеней защиты;

- коэффициентов чувствительности отдельных ступеней защиты;
- времени срабатывания отдельных ступеней защиты.

Первая ступень ТНЗНП (направленная в АТ)

Ток срабатывания I ступени защиты при выполнении ее без выдержки времени определяется из условий отстройки от утроенного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты:

- при замыкании на землю на шинах смежной стороны АТ (стороны ВН или СН), примыкающей к сети с глухозаземленной нейтралью,

$$I_{0\text{ СЗ.АТ}}^I \geq k_{\text{ОТС}} 3I_{0\text{ МАКС}}, \quad (2.35)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{ОТС}} = 1,3$; $3I_{0\text{ МАКС}}$ — максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты при замыкании на землю на шинах смежной стороны АТ;

- при кратковременных неполнофазных режимах, возникающих при неодновременном включении одной или двух фаз выключателя АТ или в цикле ОАПВ на линиях прилегающей сети,

$$I_{0\text{ СЗ.АТ}}^I \geq k_{\text{ОТС}} 3I_{0\text{ НЕП}},$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{ОТС}} = 1,3$; $3I_{0\text{ НЕП}}$ — максимальное значение утроенного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты в неполнофазных режимах.

Проверка чувствительности I ступени ТНЗНП АТ не производится.

Вторая ступень ТНЗНП (направленная в АТ)

Ток срабатывания II ступени защиты определяется по условию согласования с III ступенью ТНЗНП АТ, установленной на стороне смежного напряжения (стороне ВН или СН), примыкающей к сети с глухозаземленной нейтралью,

$$I_{0\text{СЗ.АТ}}^{\text{II}} \geq k_{\text{ОТС}} I_{0\text{СЗ.АТ(СМ.СТ)}}^{\text{III}}, \quad (2.36)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{ОТС}} = 1,1$; $I_{0\text{СЗ.АТ(СМ.СТ)}}^{\text{III}}$ — ток срабатывания III ступени ТНЗНП смежной стороны АТ.

Проверка чувствительности II ступени ТНЗНП АТ производится при замыкании на землю на сборных шинах смежной стороны АТ (стороны ВН или СН), примыкающей к сети с глухозаземленной нейтралью.

Третья ступень ТНЗНП (направленная в сеть ВН или СН)

Ток срабатывания III ступени защиты определяется по условию согласования с I (или II) ступенью ТНЗНП смежных линий сети, примыкающей к той стороне АТ, на которой установлена защита,

$$I_{0\text{СЗ.АТ}}^{\text{III}} \geq k_{\text{ОТС}} k_{\text{ТОК}} 3I_{0\text{СЗ.ВЛ}}^{\text{I}}, \quad (2.37)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{ОТС}} = 1,1$; $k_{\text{ТОК}}$ — коэффициент токораспределения, равный отношению токов $3I_0$ в месте установки защиты и в смежной линии, с которой производится согласование, при замыкании на землю в конце смежной линии; $I_{0\text{СЗ.ВЛ}}^{\text{I}}$ — ток срабатывания I ступени ТНЗНП смежной линии.

Проверка чувствительности III ступени ТНЗНП производится при замыкании на землю на сборных шинах своей стороны, т. е. стороны того напряжения, где установлена защита.

Четвертая ступень ТНЗНП (направленная в сеть ВН или СН)

Ток срабатывания IV ступени защиты определяется по условию согласования со II ступенью ТНЗНП смежных линий сети, примыкающей к той стороне АТ, на которой установлена защита,

$$I_{0\text{ СЗ.АТ}}^{\text{IV}} \geq k_{\text{ОТС}} k_{\text{ТОК}} 3I_{0\text{ СЗ.ВЛ}}^{\text{II}}, \quad (2.38)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ и $k_{\text{ТОК}}$ имеют те же значения, что и в выражении (2.37); $I_{0\text{ СЗ.ВЛ}}^{\text{II}}$ — ток срабатывания II ступени ТНЗНП смежной линии.

Проверка чувствительности IV ступени ТНЗНП АТ производится при замыкании на землю в конце смежных линий, с защитами которых производится согласование.

В целях повышения чувствительности может оказаться целесообразным согласовывать III и IV ступени защиты не с I и II, а соответственно со II и III ступенями защит смежных линий.

Пятая ступень ТНЗНП (направленная в сеть ВН или СН)

Ток срабатывания V ступени защиты определяется по условию отстройки от максимального тока небаланса в нулевом проводе ТТ в нагрузочном режиме и при внешних трехфазных КЗ согласно выражениям (1.42)–(1.45) со с. 97 и 98, аналогично тому, как это делается для IV ступени ТНЗНП линии.

Коэффициент чувствительности II–V ступеней ТНЗНП АТ определяется по выражению

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0\text{ МИН}}}{I_{0\text{ СЗ.АТ}}}, \quad (2.39)$$

где $3I_{0\text{ МИН}}$ — минимальное значение утроенного тока нулевой последовательности, протекающего через защиту при замыкании на землю в установленной точке сети; $I_{0\text{ СЗ.АТ}}$ — ток срабатывания соответствующей ступени ТНЗНП АТ.

По требованиям ПУЭ необходимо иметь коэффициент чувствительности не менее 1,2.

Определение времени срабатывания различных ступеней ТНЗНП АТ

Первая ступень защиты, направленная в сторону АТ, действует без выдержки времени на отключение его со всех сторон. Остальные ступени ТНЗНП АТ действуют с тремя различными выдержками времени аналогично дистанционной защите.

Наименьшее время действия II ступени ТНЗНП АТ согласуется со временем действия III ступени ТНЗНП АТ, установленной на стороне смежного напряжения, по выражению (2.32).

Наименьшее время действия III ступени ТНЗНП АТ согласуется со временем действия I (или II) ступени ТНЗНП линий сети, примыкающей к той стороне АТ, где установлена защита, по выражению (2.33).

Наименьшее время действия IV ступени ТНЗНП АТ согласуется со временем действия II (или III) ступени ТНЗНП линий сети, примыкающей к той стороне АТ, где установлена защита, по выражению (2.34).

Наименьшее время действия V ступени ТНЗНП АТ принимается на ступень селективности больше времени действия IV ступени ТНЗНП линий сети, примыкающей к той стороне АТ, где установлена защита.

Методика расчета параметров МТЗ и ТО АТ

Расчет параметров МТЗ и ТО сторон ВН и СН АТ сводится к определению значений токов и напряжений срабатывания реле, выдержек времени защит и коэффициентов чувствительности.

Для МТЗ сторон ВН и СН АТ расчет параметров производится аналогично тому, как это делается для МТЗ стороны НН АТ, выполненной с использованием шкафа ШЭ2704 042:

- по выражениям (2.11) (с. 130) или (2.12) (с. 131) определяется ток срабатывания максимального реле тока;
- по выражениям (2.14) и (2.15) определяется напряжение срабатывания минимального реле напряжения;
- по выражению (2.17) определяется напряжение срабатывания реле напряжения обратной последовательности;
- коэффициенты чувствительности МТЗ определяются по выражениям (2.13), (2.16) и (2.18), время срабатывания — по выражению (2.19).

Для ТО сторон ВН и СН АТ расчет параметров заключается в определении тока срабатывания максимального реле тока по выражению (2.26). При этом ток $I_{\text{КЗ. МАКС}}$ принимается равным максимальному значению тока КЗ на стороне смежного напряжения АТ или в конце линии, подключенной к шинам того напряжения, где установлена защита. Коэффициент чувствительности ТО определяются по выражению (2.13) при двухфазном КЗ на выводах соответствующего напряжения АТ.

Пример расчета параметров токовой направленной защиты нулевой последовательности АТ

В примере рассмотрен расчет параметров ступенчатой ТНЗНП АТ1, установленного на ПС 1 (см. рис. 1.5 на с. 36). В расчете используются исходные данные из табл. 1.6—1.8.

Значения токов $3I_0$ при замыканиях на землю в различных точках схемы сети, необходимые для расчета параметров ТНЗНП АТ1, приведены в табл. 2.10 (токи КЗ приведены к напряжению 220 кВ).

Таблица 2.10

Значения токов $3I_0$ для расчета ТНЗНП АТ1

Элементы	Ток $3I_0$ для заданного места КЗ и режима работы сети, А										
	К1		К2			К4		К6			
	СЗ-мин	Откл. АТ2	С1-мин, откл. АТ2	СЗ-мин, откл. АТ2	СЗ-мин	С1-мин, С2-мин	Откл. АТ2	СЗ-мин, откл. АТ2	С1-мин, откл. АТ2	С1-мин	Откл. одна ВЛЗ
АТ1	951	1468	146	141	91	2539	3104	655	651	434	—
ВЛ1	—	—	1575	—	—	—	—	—	—	—	—
ВЛ3	—	—	—	—	—	—	—	727	—	—	811

ТНЗНП стороны 220 кВ АТ1

Первая ступень ТНЗНП (направлена в АТ1)

Ток срабатывания I ступени ТНЗНП определяется по выражению (2.35). Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,3$ и $3I_{0 \text{ МАКС(К4)}} = 3104 \text{ А}$, получим

$$I_{0 \text{ СЗ.АТ(220)}}^I \geq k_{\text{ОТС}} 3I_{0 \text{ МАКС(К4)}} = 1,3 \cdot 3104 = 4035,2 \text{ А.}$$

Вторая ступень ТНЗНП (направленная в АТ1)

Ток срабатывания II ступени ТНЗНП определяется по выражению (2.36). Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,1$ и $I_{0 \text{ СЗ.АТ(СМ.СТ)}}^{\text{III}} =$

$$= \frac{I_{0 \text{ СЗ.АТ(110)}}^{\text{III}}}{K_{\text{АТ}}}, \text{ получим}$$

$$I_{0 \text{ СЗ.АТ(220)}}^{\text{II}} \geq k_{\text{ОТС}} I_{0 \text{ СЗ.АТ(СМ.СТ)}}^{\text{III}} = 1,1 \cdot 2087,5 \cdot \frac{115}{230} = 1148,1 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности II ступени ТНЗНП АТ, определяемый по выражению (2.39),

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0 \text{ мин(К4)}}}{I_{0 \text{ СЗ.АТ(220)}}^{\text{II}}} = \frac{2539}{1148,1} = 2,2,$$

где $3I_{0 \text{ мин(К4)}}$ — минимальный ток, проходящий через защиту при замыкании на землю на сборных шинах стороны 110 кВ АТ (точка К4), $3I_{0 \text{ мин(К4)}} = 2539 \text{ А}$.

Значение коэффициента чувствительности удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Третья ступень ТНЗНП (направленная в сеть 220 кВ)

Ток срабатывания III ступени ТНЗНП определяется по выражению (2.37). Принимая значения $k_{\text{отс}} = 1,1$, $k_{\text{ток.1}} = \frac{3I_{0 \text{ АТ1}}}{3I_{0 \text{ ВЛ1}}} = \frac{146}{1575} = 0,09$ и $I_{0 \text{ СЗ.ВЛ1}}^{\text{I}} = 2087,8 \text{ А}$, получим

$$I_{0 \text{ СЗ.АТ(220)}}^{\text{III}} \geq k_{\text{отс}} k_{\text{ток.1}} I_{0 \text{ СЗ.ВЛ1}}^{\text{I}} = 1,1 \cdot 0,09 \cdot 2087,8 = 206,7 \text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности III ступени ТНЗНП АТ, определяемый по выражению (2.39),

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0 \text{ мин(К1)}}}{I_{0 \text{ СЗ.АТ(220)}}^{\text{III}}} = \frac{951}{206,7} = 4,6,$$

где $3I_{0 \text{ мин(К1)}}$ — минимальный ток, проходящий через защиту при замыкании на землю на сборных шинах стороны 220 кВ АТ (точка К1), $3I_{0 \text{ мин(К1)}} = 951 \text{ А}$.

Значение коэффициента чувствительности удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Четвертая ступень ТНЗНП (направленная в сеть 220 кВ)

Ток срабатывания IV ступени ТНЗНП определяется по выражению (2.38). Принимая значения $k_{\text{отс}} = 1,1$, $k_{\text{ток.1}} = 0,09$ и $I_{0 \text{ СЗ.ВЛ1}}^{\text{II}} = 1298,4 \text{ А}$,

получим

$$I_{0\text{ СЗ.АТ(220)}}^{\text{IV}} \geq k_{\text{ОТС}} k_{\text{ТОК.1}} I_{0\text{ СЗ.ВЛ1}}^{\text{II}} = 1,1 \cdot 0,09 \cdot 1298,4 = 128,5 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности IV ступени ТНЗНП АТ, определяемый по выражению (2.39),

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0\text{ МИН(К2)}}}{I_{0\text{ СЗ.АТ(220)}}^{\text{IV}}} = \frac{141}{128,5} = 1,1 < 1,2.$$

Для повышения чувствительности IV ступени ТНЗНП АТ с целью надежного резервирования защиты ВЛ1 при замыканиях на землю в конце линии необходимо произвести ее согласование с током срабатывания III ступени ТНЗНП ВЛ1, равным 340,7 А.

Пятая ступень ТНЗНП (направленная в сеть 220 кВ)

Ток срабатывания V ступени определяем из условия отстройки от тока небаланса в нулевом проводе ТТ защиты при КЗ между тремя фазами на шинах 220 кВ ПС 2 (точка К2) по выражению (1.42) со с. 92. Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,25$, $k_{\text{ПЕР}} = 1$ и $3I_{0\text{ НБ.У}} = 32,3 \text{ А}$, получим

$$I_{0\text{ СЗ.АТ(220)}}^{\text{V}} = k_{\text{ОТС}} k_{\text{ПЕР}} I_{0\text{ НБ.У}} = 1,25 \cdot 1 \cdot 32,3 = 40,37 \text{ А,}$$

где $I_{0\text{ НБ.У}}$ — ток небаланса в нулевом проводе ТТ в установившемся режиме при рассматриваемом внешнем КЗ между тремя фазами, определенный по выражению (1.43),

$$I_{0\text{ НБ.У}} = k_{\text{НБ}} I_{\text{КЗ.МАКС(К2)}}^{(3)} = 0,1 \cdot 323 = 32,3 \text{ А,}$$

где $k_{\text{НБ}}$ — коэффициент небаланса, равный 0,1; $I_{\text{КЗ. МАКС (К2)}}^{(3)}$ — максимальное значение фазного тока, проходящего в месте установки защиты при КЗ между тремя фазами в точке К2, $I_{\text{КЗ. МАКС (К2)}}^{(3)} = 323 \text{ А}$.

Принимаем $I_{0\text{ СЗ.АТ(220)}}^{\text{V}} = 40,37 \text{ А}$.

Определение коэффициента чувствительности пятой ступени производится при замыкании на землю на шинах 220 кВ ПС 2 по выражению (2.39)

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0 \text{ мин(К2)}}}{I_{0 \text{ СЗ.АТ(220)}}^V} = \frac{91}{40,37} = 2,2,$$

где $3I_{0 \text{ мин(К2)}}$ — минимальный ток, проходящий через защиту при замыкании на землю на шинах 220 кВ ПС 2 (точка К2), $3I_{0 \text{ мин(К2)}} = 91 \text{ А}$.

Значение коэффициента чувствительности удовлетворяет требованиям ПУЭ.

ТНЗНП стороны 110 кВ АТ1

Первая ступень ТНЗНП (направленная в АТ1)

Ток срабатывания I ступени ТНЗНП определяется по выражению (2.35). Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,3$ и $3I_{0 \text{ МАКС(К1)}} = 1468 \text{ К}_{\text{АТ}}$ А, получим

$$I_{0 \text{ СЗ.АТ(110)}}^I \geq k_{\text{ОТС}} 3I_{0 \text{ МАКС(К1)}} = 1,3 \cdot 1468 \cdot \frac{230}{115} = 3816,8 \text{ А}.$$

Вторая ступень ТНЗНП (направленная в АТ1)

Ток срабатывания II ступени ТНЗНП определяется по выражению (2.36). Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,1$ и $I_{0 \text{ СЗ.АТ(СМ.СТ)}}^{\text{III}} = I_{0 \text{ СЗ.АТ(220)}}^{\text{III}} \text{ К}_{\text{АТ}}$, получим

$$I_{0 \text{ СЗ.АТ(110)}}^{\text{II}} \geq k_{\text{ОТС}} I_{0 \text{ СЗ.АТ(220)}}^{\text{III}} = 1,1 \cdot 206,7 \cdot \frac{230}{115} = 454,7 \text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности II ступени ТНЗНП АТ, определяемый по выражению (2.39),

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0 \text{ мин(К1)}} \text{ К}_{\text{АТ}}}{I_{0 \text{ СЗ.АТ(110)}}^{\text{II}}} = \frac{951 \cdot (230 / 115)}{454,7} = 4,2,$$

где $3I_{0 \text{ мин (К1)}}$ — минимальный ток, проходящий через защиту при замыкании на землю на сборных шинах стороны 220 кВ АТ (точка К1), $3I_{0 \text{ мин (К1)}} = 951 \text{ А}$.

Значение коэффициента чувствительности удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Третья ступень ТНЗНП (направленная в сеть 110 кВ)

Ток срабатывания III ступени ТНЗНП определяется по выражению (2.37). Принимая значения $k_{\text{отс}} = 1,1$, $k_{\text{ток.2}} = \frac{3I_{0 \text{ АТ1}}}{3I_{0 \text{ ВЛ3}}} = \frac{655}{727} = 0,9$ и $I_{0 \text{ СЗ.ВЛ3}}^I = k_{\text{отс}} 3I_{0 \text{ макс(К6)}} = 1,3 \cdot 811 \cdot \frac{230}{115} = 2108,6 \text{ А}$, получим

$$I_{0 \text{ СЗ.АТ(110)}}^{\text{III}} \geq k_{\text{отс}} k_{\text{ток.2}} I_{0 \text{ СЗ.ВЛ3}}^I = 1,1 \cdot 0,9 \cdot 2108,6 = 2087,5 \text{ А},$$

где $3I_{0 \text{ макс (К6)}}$ — максимальный ток, проходящий через ВЛ3 при замыкании в конце линии (точка К6 на рис. 2.7).

Коэффициент чувствительности III ступени ТНЗНП, определяемый по выражению (2.39),

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0 \text{ мин(К4)}} K_{\text{АТ}}}{I_{0 \text{ СЗ.АТ(110)}}^{\text{III}}} = \frac{2539 \cdot (230 / 115)}{2087,5} = 2,4,$$

где $3I_{0 \text{ мин (К4)}}$ — минимальный ток, проходящий через защиту при замыкании на землю на сборных шинах стороны 110 кВ АТ (точка К4), $3I_{0 \text{ мин (К4)}} = 2539 \text{ А}$.

Значение коэффициента чувствительности удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Четвертая ступень ТНЗНП (направленная в сеть 110 кВ)

Ток срабатывания IV ступени ТНЗНП определяется по выражению (2.38). Принимая значения $k_{\text{отс}} = 1,1$, $k_{\text{ток.2}} = 0,9$ и $I_{0 \text{ СЗ.ВЛ3}}^{\text{II}} = 1075,8 \text{ А}$, получим

$$I_{0\text{СЗ.АТ}(110)}^{\text{IV}} \geq k_{\text{ОТС}} k_{\text{ТОК.2}} I_{0\text{СЗ.ВЛЗ}}^{\text{II}} = 1,1 \cdot 0,9 \cdot 1075,8 = 1065 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности IV ступени ТНЗНП АТ, определяемый по выражению (2.39),

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0\text{МИН}(K6)} K_{\text{АТ}}}{I_{0\text{СЗ.АТ}(110)}^{\text{IV}}} = \frac{651 \cdot (230 / 115)}{1065} = 1,22,$$

где $3I_{0\text{МИН}(K6)}$ — минимальный ток, проходящий через защиту при замыкании на землю в конце ВЛЗ (точка К6), $3I_{0\text{МИН}(K6)} = 651 \text{ А}$.

Значение коэффициента чувствительности удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Пятая ступень ТНЗНП (направленная в сеть 110 кВ)

Ток срабатывания V ступени определяем из условия отстройки от тока небаланса в нулевом проводе ТТ защиты при КЗ между тремя фазами в конце ВЛЗ (точка К6) по выражению (1.42) со с. 92. Принимая значения $k_{\text{ОТС}} = 1,25$, $k_{\text{ПЕР}} = 1$ и $3I_{0\text{НБ.У}} = 181,6 \text{ А}$, получим

$$I_{0\text{СЗ.АТ}(110)}^{\text{V}} = k_{\text{ОТС}} k_{\text{ПЕР}} I_{0\text{НБ.У}} = 1,25 \cdot 1 \cdot 181,6 = 227 \text{ А},$$

где $I_{0\text{НБ.У}}$ — ток небаланса в нулевом проводе ТТ в установившемся режиме при рассматриваемом внешнем КЗ между тремя фазами, определенный по выражению (1.43),

$$I_{0\text{НБ.У}} = k_{\text{НБ}} I_{\text{КЗ.МАКС}(K6)}^{(3)} K_{\text{АТ}} = 0,1 \cdot 908 \cdot \frac{230}{115} = 181,6 \text{ А},$$

где $k_{\text{НБ}}$ — коэффициент небаланса, равный 0,1; $I_{\text{КЗ.МАКС}(K6)}^{(3)}$ — максимальное значение фазного тока, проходящего в месте установки защиты при КЗ между тремя фазами в точке К6, приведенное к напряжению 230 кВ, $I_{\text{КЗ.МАКС}(K6)}^{(3)} = 908 \text{ А}$.

Принимаем $I_{0\text{СЗ.АТ}(110)}^{\text{V}} = 227 \text{ А}$.

Определение коэффициента чувствительности V ступени производится при замыкании на землю на шинах 220 кВ ПС Б по выражению (2.39)

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0 \text{ мин(К6)}} K_{\text{АТ}}}{I_{0 \text{ СЗ.АТ(110)}}^V} = \frac{434 \cdot (230 / 115)}{227} = 3,8,$$

где $3I_{0 \text{ мин(К2)}}$ — минимальный ток, проходящий через защиту при замыкании на землю в конце ВЛЗ (точка К6), приведенный к напряжению 230 кВ, $3I_{0 \text{ мин(К2)}} = 434$ А.

Значение коэффициента чувствительности удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Ввиду малого значения тока срабатывания защиты, определенного по условию отстройки от максимального тока небаланса в нулевом проводе ТТ при внешнем трехфазном КЗ, необходимо выполнить проверку его по условию отстройки от суммарного тока небаланса в нулевом проводе ТТ, протекающего в максимальном нагрузочном режиме, по выражению (1.44).

Приведение первичных токов срабатывания реле тока ТНЗНП ко вторичным цепям ТТ

Вторичные значения токов срабатывания (уставки по току) реле тока различных ступеней ТНЗНП получаются путем деления первичных токов срабатывания на $K_{\text{ТТ}} = 1000/5$.

Принятые значения уставок ТНЗНП АТ1 ПС 1 шкафа ШЭ2607071 по току срабатывания сведены в табл. 2.11. В ней приводятся также уставки по току и напряжению срабатывания РНМНП, соответствующие их значениям, принимаемым по умолчанию.

Таблица 2.11

Уставки по току срабатывания ТНЗНП АТ1

Наименование уставки	Значение уставки	
	для сторо- ны 220 кВ	для сторо- ны 110 кВ
Ток срабатывания РТ I ступени ТНЗНП, А, (0,05...30,00) $I_{2\text{НОМ.ТТ}}$, шаг 0,01	20,18	19,08
Ток срабатывания РТ II ступени ТНЗНП, А, (0,05...30,00) $I_{2\text{НОМ.ТТ}}$, шаг 0,01	5,74	2,27
Ток срабатывания РТ III ступени ТНЗНП, А, (0,05...30,00) $I_{2\text{НОМ.ТТ}}$, шаг 0,01	1,04	10,44
Ток срабатывания РТ IV ступени ТНЗНП, А, (0,05...30,00) $I_{2\text{НОМ.ТТ}}$, шаг 0,01	0,64	5,33
Ток срабатывания РТ V ступени ТНЗНП, А, (0,05...30,00) $I_{2\text{НОМ.ТТ}}$, шаг 0,01	0,2	1,1
Ток срабатывания РНМНП прямой направленности (в АТ), А, (0,040...0,500) $I_{2\text{НОМ.ТТ}}$, шаг 0,001	0,20	
Ток срабатывания РНМНП обратной направленности (в шины), А, (0,040...0,500) $I_{2\text{НОМ.ТТ}}$, шаг 0,01	0,10	
Напряжение срабатывания РНМНП прямой направленности (в АТ), В, 0,50—5,00, шаг 0,01	4,0	
Напряжение срабатывания РНМНП обратной направленности (в шины), В, 0,50—5,00, шаг 0,01	2,0	

**Уставки по времени срабатывания
различных ступеней ТНЗНП**

Время действия I ступени принимаем равным 0,05 с.

Наименьшие (первые) значения уставок по времени действия II, III и IV ступеней определяем по выражениям (2.32)—(2.34). Вторые значения уставок каждой из этих ступеней полу-

чаются путем прибавления к ним ступени селективности (Δt), третьи значения — путем прибавления удвоенного значения ступени селективности ($2\Delta t$).

Время действия V ступени согласуем с временем действия IV ступени ТНЗНП ВЛ1, т. к. эта ступень выполняет функции дальнего резервирования.

Принятые значения уставок по времени срабатывания всех ступеней дистанционных защит АТ1 приведены в табл. 2.12.

Таблица 2.12

Уставки по времени срабатывания дистанционных защит АТ1

Назначение уставки		Значение $t_{сз}$, с	
		для сторо- ны 220 кВ	для сторо- ны 110 кВ
Уставка на срабатывание I ступени ТНЗНП, с (0,000—15,000, шаг 0,001)		0,05	0,05
Уставка на срабатывание II ступени ТНЗНП, с (0,05—15,00, шаг 0,01)	$t_{сз,1}^{II}$	0,95	0,65
	$t_{сз,2}^{II}$	1,25	0,95
	$t_{сз,3}^{II}$	1,55	1,25
Уставка на срабатывание III ступени ТНЗНП, с (0,05—15,00, шаг 0,01)	$t_{сз,1}^{III}$	0,35	0,65
	$t_{сз,2}^{III}$	0,65	0,95
	$t_{сз,3}^{III}$	0,95	1,25
Уставка на срабатывание IV ступени ТНЗНП, с (0,05—15,00, шаг 0,01)	$t_{сз,1}^{IV}$	1,00	0,95
	$t_{сз,2}^{IV}$	1,30	1,25
	$t_{сз,3}^{IV}$	1,60	1,55
Уставка на срабатывание V ступени ТНЗНП, с (0,05—15,00, шаг 0,01)	$t_{сз,1}^V$	3,8	3,5
	$t_{сз,2}^V$	4,1	3,8
	$t_{сз,3}^V$	4,4	4,1

Пример расчета параметров МТЗ и ТО сторон ВН и СН АТ

В примере рассмотрен расчет параметров МТЗ и ТО для АТ1, установленного на ПС 1 (см. рис. 1.5 на с. 36).

Значения токов трехфазных КЗ при замыканиях в различных точках схемы сети, необходимые для расчета параметров МТЗ

и ТО АТ1, приведены в табл. 2.13 (токи КЗ приведены к напряжению 220 кВ).

Таблица 2.13

Значения токов КЗ для расчета МТЗ и ТО АТ1

Элементы	Ток $I_{\text{КЗ}}^{(3)}$ для заданных мест КЗ и режима работы сети, А						
	К1		К4		К8		
	С1-мин, С3-мин	Все включено	Все включено	С3-мин, С5-мин	С1-мин, С3-мин, откл. АТ2	С1-мин, откл. СН, откл. АТ2	С3-мин, откл. ВН, откл. АТ2
Сторона ВН АТ1	18108 от С1 и С2	—	1965	—	288	671	—
Сторона СН АТ1	—	1985	—	5645 от С3 и С4	651	—	853
Сторона НН АТ1	—	—	—	—	939	671	853

МТЗ и ТО стороны 220 кВ АТ1

Расчет тока срабатывания максимального реле тока МТЗ

Ток срабатывания реле МТЗ с пуском по напряжению определяется по выражению (2.12) (с. 131)

$$I_{\text{ср.МТЗ ВН}} \geq \frac{k_{\text{отс}} k_{\text{сх}}}{k_{\text{в}} K_{\text{тт}}} I_{\text{раб.ВН}} = \frac{1,2 \cdot 1}{0,9 \cdot 1000 / 5} \cdot 0,7 \cdot 314 = 1,465 \text{ А},$$

где $I_{\text{раб.ВН}}$ — рабочий ток, равный 70 % от номинального первичного тока стороны ВН АТ, $I_{\text{раб.ВН}} = 0,7 \cdot 314 \text{ А}$.

Принимаем $I_{\text{уст.МТЗ ВН}} = 1,47 \text{ А}$.

Проверка чувствительности защиты производится согласно выражению (2.13) при двухфазном КЗ на стороне НН АТ (точка К8 на рис. 1.5)

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ.мин}} k_{\text{сх}}}{I_{\text{уст.МТЗ ВН}} K_{\text{тт}}} = \frac{(\sqrt{3} / 2) \cdot 288 \cdot 1}{1,47 \cdot 1000 / 5} = 0,85.$$

МТЗ стороны ВН нечувствительна к КЗ на стороне НН автотрансформатора. Определим коэффициент чувствительности защиты при одностороннем питании точки КЗ, т. е. при отключенном состоянии стороны СН АТ1. В этом случае коэффициент чувствительности будет

$$k_q = \frac{I_{\text{КЗ.МИН}} k_{\text{СХ}}}{I_{\text{УСТ.МТЗ ВН}} K_{\text{ТТ}}} = \frac{(\sqrt{3}/2) \cdot 671 \cdot 1}{1,47 \cdot 1000 / 5} = 1,98,$$

т. е. при каскадном отключении КЗ (сначала со стороны СН, а затем со стороны ВН) МТЗ будет иметь удовлетворительную чувствительность ($k_q > 1,5$).

Расчет напряжения срабатывания минимальных реле напряжения

Напряжение срабатывания минимального реле напряжения определяется по выражениям (2.14) и (2.15) со с. 132 с учетом того, что пусковой орган подключен к сторонам ВН и НН.

Вторичное напряжение срабатывания минимального реле напряжения принимается меньшим исходя из следующих условий:

- обеспечения возврата реле после отключения внешнего КЗ —

— для реле напряжения, подключенного к ТН стороны ВН,

$$U_{\text{СР.МТЗ ВН}} \leq \frac{U_{\text{МИН.ВН}}}{k_{\text{ОТС}} k_{\text{В}} K_{\text{ТН}}} = \frac{0,9 \cdot 220 \cdot 1000}{1,2 \cdot 1,1 \cdot 220000 / 100} = 68,28 \text{ В};$$

— для реле напряжения, подключенного к ТН стороны НН,

$$U_{\text{СР.МТЗ НН}} \leq \frac{U_{\text{МИН.НН}}}{k_{\text{ОТС}} k_{\text{В}} K_{\text{ТН}}} = \frac{0,9 \cdot 10,5 \cdot 1000}{1,2 \cdot 1,1 \cdot 10000 / 100} = 71,59 \text{ В};$$

- отстройки от напряжения самозапуска электродвигателей при включении от АПВ или АВР заторможенных двигателей нагрузки —

- для реле напряжения, подключенного к ТН стороны ВН,

$$U_{\text{ср.мтз вн}} \leq \frac{U_{\text{сзп.вн}}}{k_{\text{отс}} K_{\text{тн}}} = \frac{0,7 \cdot 220 \cdot 1000}{1,2 \cdot 220\,000 / 100} = 58,3 \text{ В};$$

- для реле напряжения, подключенного к ТН стороны НН,

$$U_{\text{ср.мтз нн}} \leq \frac{U_{\text{сзп}}}{k_{\text{отс}} K_{\text{тн}}} = \frac{0,7 \cdot 10,5 \cdot 1000}{1,2 \cdot 10\,000 / 100} = 61,25 \text{ В}.$$

Принимаем напряжение срабатывания:

- для реле, подключенного к ТН стороны ВН, $U_{\text{уст. мтз вн}} = 58,3 \text{ В};$
- для реле, подключенного к ТН стороны НН, $U_{\text{уст. мтз нн}} = 61,25 \text{ В}.$

Расчет напряжения срабатывания реле напряжения обратной последовательности

Напряжение срабатывания реле напряжения обратной последовательности для отстройки от напряжения небаланса, обусловленного несимметрией фазных напряжений в нормальном рабочем режиме, согласно выражению (2.17) рекомендуется принимать

$$U_{2 \text{ ср.мтз вн}} = \frac{0,06 U_{\text{ном.вн}}}{K_{\text{тн}}} = \frac{0,06 \cdot 220 \cdot 1000}{220\,000 / 100} = 6 \text{ В}.$$

Принимаем $U_{2 \text{ уст. мтз вн}} = 6 \text{ В}.$

Определение выдержек времени МТЗ

Выдержка времени выбирается по условию согласования с последними, наиболее чувствительными ступенями защит от междуфазных КЗ (МТЗ стороны НН автотрансформатора или дистанционными защитами линий сети ВН или СН) по выражению (2.19).

Примем наименьшее время срабатывания МТЗ из условий согласования с временем действия II ступени МТЗ стороны НН

$$t_{\text{СЗ.МТЗ ВН}}^{\text{I}} = t_{\text{СЗ.МТЗ НН}}^{\text{II}} + \Delta t = 1,6 + 0,3 = 1,9 \text{ с.}$$

Вторая и третья выдержки времени МТЗ НН будут соответственно на ступень селективности ($\Delta t = 0,3 \text{ с}$) и на две ступени селективности больше, т. е. 2,2 с и 2,5 с.

Расчет тока срабатывания максимального реле тока ТО

Ток срабатывания максимального реле тока ТО определяем из условия отстройки от максимального тока внешнего КЗ по выражению (2.26) со с. 138. Принимая $k_{\text{ОТС}} = 1,2$, $K_{\text{ТТ}} = 1000/5$ и $I_{\text{КЗ. МАКС}} = 1965 \text{ А}$, получим

$$I_{\text{СР.ТО ВН}} \geq \frac{k_{\text{ОТС}} k_{\text{СХ}}}{K_{\text{ТТ}}} I_{\text{КЗ. МАКС}}^{(3)} = \frac{1,2 \cdot 1965}{1000/5} = 11,79 \text{ А},$$

где $I_{\text{КЗ. МАКС}}^{(3)}$ — максимальное значение периодической составляющей тока в месте установки защиты при внешнем трехфазном КЗ на шинах СН АТ1 (точка К4), $I_{\text{КЗ. МАКС}}^{(3)} = 1965 \text{ А}$.

Принимаем $I_{\text{УСТ.ТО ВН}} = 11,8 \text{ А}$.

Определение коэффициента чувствительности ТО производится по выражению (2.13)

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ.МИН}} k_{\text{СХ}}}{I_{\text{УСТ.ТО ВН}} K_{\text{ТТ}}} = \frac{(\sqrt{3}/2) \cdot 18\,108 \cdot 1}{11,8 \cdot 1000/5} = 6,6,$$

где $I_{\text{КЗ. МИН}}$ — ток двухфазного КЗ, проходящий через защиту при замыкании на выводах ВН в минимальном режиме работы системы.

Значение коэффициента чувствительности удовлетворяет требованию ПУЭ.

МТЗ и ТО стороны 110 кВ АТ1

Расчет тока срабатывания максимального реле тока МТЗ

Ток срабатывания реле МТЗ с пуском по напряжению определяется по выражению (2.12)

$$I_{\text{ср.МТЗ СН}} \geq \frac{k_{\text{отс}} k_{\text{сх}}}{k_{\text{в}} K_{\text{тТ}}} I_{\text{раб.СН}} = \frac{1,2 \cdot 1}{0,9 \cdot 1000 / 5} \cdot 0,7 \cdot 597 = 2,786 \text{ А},$$

где $I_{\text{раб.СН}}$ — рабочий ток, равный 70 % от номинального первичного тока стороны ВН АТ, $I_{\text{раб.СН}} = 0,7 \cdot 597 \text{ А}$.

Принимаем $I_{\text{уст.МТЗ СН}} = 2,8 \text{ А}$.

Проверка чувствительности защиты производится согласно выражению (2.13) при двухфазном КЗ на стороне НН АТ1 (точка К8 на рис. 1.5)

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз.мин}} k_{\text{сх}}}{I_{\text{уст.МТЗ СН}} K_{\text{тТ}}} = \frac{(\sqrt{3} / 2) \cdot 651 \cdot (230 / 115) \cdot 1}{2,8 \cdot 1000 / 5} = 2.$$

МТЗ стороны СН имеет достаточную чувствительность к КЗ на стороне НН АТ1 ($k_{\text{ч}} > 1,5$).

Расчет напряжения срабатывания минимальных реле напряжения

Напряжение срабатывания минимального реле напряжения определяется по выражениям (2.14) и (2.15) с учетом того, что пусковой орган подключен к сторонам СН и НН.

Вторичное напряжение срабатывания минимального реле напряжения, подключенного к ТН стороны СН, выбирают меньшим исходя из следующих условий:

- обеспечения возврата реле после отключения внешнего КЗ

$$U_{\text{ср.МТЗ СН}} \leq \frac{U_{\text{мин.СН}}}{k_{\text{отс}} k_{\text{в}} K_{\text{тТ}}} = \frac{0,9 \cdot 110 \cdot 1000}{1,2 \cdot 1,1 \cdot 110000 / 100} = 68,18 \text{ В};$$

- отстройки от напряжения самозапуска электродвигателей при включении от АПВ или АВР заторможенных двигателей нагрузки

$$U_{\text{ср.МТЗ СН}} \leq \frac{U_{\text{сзп.сн}}}{k_{\text{отс}} K_{\text{тн}}} = \frac{0,7 \cdot 110 \cdot 1000}{1,2 \cdot 110000 / 100} = 58,3 \text{ В.}$$

Принимаем $U_{\text{уст. МТЗ СН}} = 58,3 \text{ В.}$

Для действия МТЗ сторон ВН и СН используется одно минимальное реле напряжения, подключенное к ТН стороны НН. Расчет напряжения срабатывания этого реле был произведен при расчете параметров МТЗ стороны ВН.

Расчет напряжения срабатывания реле напряжения обратной последовательности

Напряжение срабатывания реле напряжения обратной последовательности для отстройки от напряжения небаланса, обусловленного несимметрией фазных напряжений в нормальном рабочем режиме, согласно выражению (2.17) рекомендуется принимать

$$U_{2 \text{ ср.МТЗ СН}} = \frac{0,06 U_{\text{ном.сн}}}{K_{\text{тн}}} = \frac{0,06 \cdot 110 \cdot 1000}{110000 / 100} = 6 \text{ В.}$$

Принимаем $U_{2 \text{ уст. МТЗ СН}} = 6 \text{ В.}$

Определение выдержек времени МТЗ

Выдержка времени выбирается по условию согласования с последними, наиболее чувствительными ступенями защит от междофазных КЗ (МТЗ стороны НН автотрансформатора или дистанционными защитами линий электрической сети ВН или СН) по выражению (2.19) (см. с. 132).

Примем наименьшее время срабатывания МТЗ из условий согласования с временем действия II ступени МТЗ стороны НН

$$t_{\text{СЗ.МТЗ СН}}^{\text{I}} = t_{\text{СЗ.МТЗ НН}}^{\text{II}} + \Delta t = 1,6 + 0,3 = 1,9 \text{ с.}$$

Вторая и третья выдержки времени МТЗ НН будут соответственно на ступень селективности ($\Delta t = 0,3 \text{ с}$) и на две ступени селективности больше, т. е. 2,2 с и 2,5 с.

Расчет тока срабатывания максимального реле тока ТО

Ток срабатывания максимального реле тока ТО определяем из условия отстройки от максимального тока внешнего КЗ по выражению (2.26). Принимая $k_{\text{ОТС}} = 1,2$, $k_{\text{СХ}} = 1$, $K_{\text{ТТ}} = 1000/5$ и $I_{\text{КЗ. МАКС}} = 1965 \text{ А}$, получим

$$I_{\text{СР.ТО СН}} \geq \frac{k_{\text{ОТС}} k_{\text{СХ}}}{K_{\text{ТТ}}} I_{\text{КЗ. МАКС}}^{(3)} = \frac{1,2 \cdot 1 \cdot 3552}{1000/5} = 21,3 \text{ А},$$

где $I_{\text{КЗ. МАКС}}^{(3)}$ — максимальное значение периодической составляющей тока в месте установки защиты при внешнем трехфазном КЗ на шинах ВН АТ1 (точка К1), $I_{\text{КЗ. МАКС}}^{(3)} = 3552 \text{ А}$.

Принимаем $I_{\text{УСТ.ТО СН}} = 21,3 \text{ А}$.

Определение коэффициента чувствительности ТО производится по выражению (2.13)

$$k_{\text{Ч}} = \frac{I_{\text{КЗ.МИН}} k_{\text{СХ}}}{I_{\text{УСТ.ТО СН}} K_{\text{ТТ}}} = \frac{(\sqrt{3}/2) \cdot 7459 \cdot 1}{21,3 \cdot 1000/5} = 1,52,$$

где $I_{\text{КЗ. МИН}}$ — ток двухфазного КЗ, проходящий через защиту при замыкании на выводах ВН в минимальном режиме работы системы СЗ.

Значение коэффициента чувствительности удовлетворяет требованию ПУЭ.

Уставки по току, напряжению и времени срабатывания МТЗ и ТО сторон ВН и СН АТ1 приведены ниже.

Наименование уставки	Значение уставки
<i>Для стороны ВН АТІ</i>	
Ток срабатывания РТ МТЗ, А, (0,10...30,00) $I_{2\text{НОМ.ТТ}}$, шаг 0,01	1,47
Напряжение срабатывания минимального реле напряжения, подключенного к ТН стороны ВН, В, 10,00—100,00, шаг 0,01	58,18
Напряжение срабатывания реле напряжения обратной последовательности, В, 6,0—24,00, шаг 0,01	6,00
Напряжение срабатывания минимального реле напряжения, подключенного к ТН стороны НН, В, 10,00—100,00, шаг 0,01	61,25
Задержка на срабатывание МТЗ, с, 0,00—15,00, шаг 0,01: $t_{\text{СЗ.1}}^{\text{II}}$ $t_{\text{СЗ.2}}^{\text{II}}$ $t_{\text{СЗ.3}}^{\text{II}}$	
	1,90
	2,20
	2,50
Ток срабатывания РТ ТО, А, (0,05...30,00) $I_{2\text{НОМ.ТТ}}$, шаг 0,01	11,80
Задержка на срабатывание ТО, с, 0,00—1,00, шаг 0,01	0,05
<i>Для стороны СН АТІ</i>	
Ток срабатывания РТ МТЗ, А, (0,10...30,00) $I_{2\text{НОМ.ТТ}}$, шаг 0,01	2,80
Напряжение срабатывания минимального реле напряжения, подключенного к ТН стороны СН, В, 10,00—100,00, шаг 0,01	58,3
Напряжение срабатывания реле напряжения обратной последовательности, В, 6,0—24,00, шаг 0,01	6,00
Напряжение срабатывания минимального реле напряжения, подключенного к ТН стороны НН, В, 10,00—100,00, шаг 0,01	61,25
Задержка на срабатывание МТЗ, с, 0,00—15,00, шаг 0,01: $t_{\text{СЗ.1}}^{\text{II}}$ $t_{\text{СЗ.2}}^{\text{II}}$ $t_{\text{СЗ.3}}^{\text{II}}$	
	1,90
	2,20
	2,50
Ток срабатывания РТ ТО, А, (0,05...30,00) $I_{2\text{НОМ.ТТ}}$, шаг 0,01	21,3
Задержка на срабатывание ТО, с, 0,00—1,00, шаг 0,01	0,05

3. Защита сборных шин подстанций напряжением 110–220 кВ

Согласно «Нормам технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ» [1] и ПУЭ [4] защита систем (секций) шин 110–220 кВ должна выполняться с использованием одного комплекта дифференциальной токовой защиты.

3.1. Дифференциальная защита сборных шин с торможением на базе шкафа типа ШЭ2607 061

3.1.1. Общая характеристика шкафа ШЭ2607 061

Шкаф дифференциальной токовой защиты типа ШЭ2607 061 предназначен для защиты шин напряжением 110–220 кВ с фиксированным присоединением элементов и числом присоединений не более восемнадцати.

Шкаф защиты шин типа ШЭ2607 061 выполнен с использованием трех терминалов БЭ2704V061, каждый из которых обеспечивает защиту одной фазы сборных шин (СШ). Терминал БЭ2704V061 содержит:

- реле дифференциальной защиты шин (ДЗШ) с торможением от всех видов КЗ в пофазном исполнении, состоя-

щее из пускового органа (ПО) и избирательных органов первой (ИО1) и второй систем шин (ИО2);

- реле чувствительного токового органа (ЧТО);
- реле минимального напряжения и реле максимального напряжения обратной последовательности;
- реле контроля исправности дифференциальных токовых цепей пускового органа, избирательных органов первой и второй систем шин;
- три комплекта УРОВ для шиносоединительного выключателя (ШСВ) и двух секционных выключателей (СВ1 и СВ2);
- логику «очувствления» ДЗШ, опробования СШ, пуска УРОВ и запрета действия АПВ.

Кроме функций защиты и автоматики, программное обеспечение терминала реализует ряд дополнительных функций, характерных для всех терминалов серии БЭ2704.

В терминале предусмотрена местная сигнализация о действии защит и устройств, выполненная на светодиодных индикаторах.

На рис. 3.1 показаны сборные шины подстанции, выполненные по схеме «Две рабочие секционированные системы шин с обходной» и имеющие максимальное по числу входов терминалов БЭ2704V061 количество присоединений.

Схема содержит шиносоединительный выключатель $Q1$, два секционных выключателя $Q3$ и $Q4$, обходной выключатель (ОВ) $Q5$, а также тринадцать присоединений с выключателями $Q6–Q18$.

Присоединения с выключателями $Q6–Q16$ могут быть зафиксированы за первой или второй СШ, а присоединения с выключателями $Q5$, $Q17$ и $Q18$ имеют возможность перефиксации с первой на вторую СШ и вывода из работы с помощью оперативных переключателей.

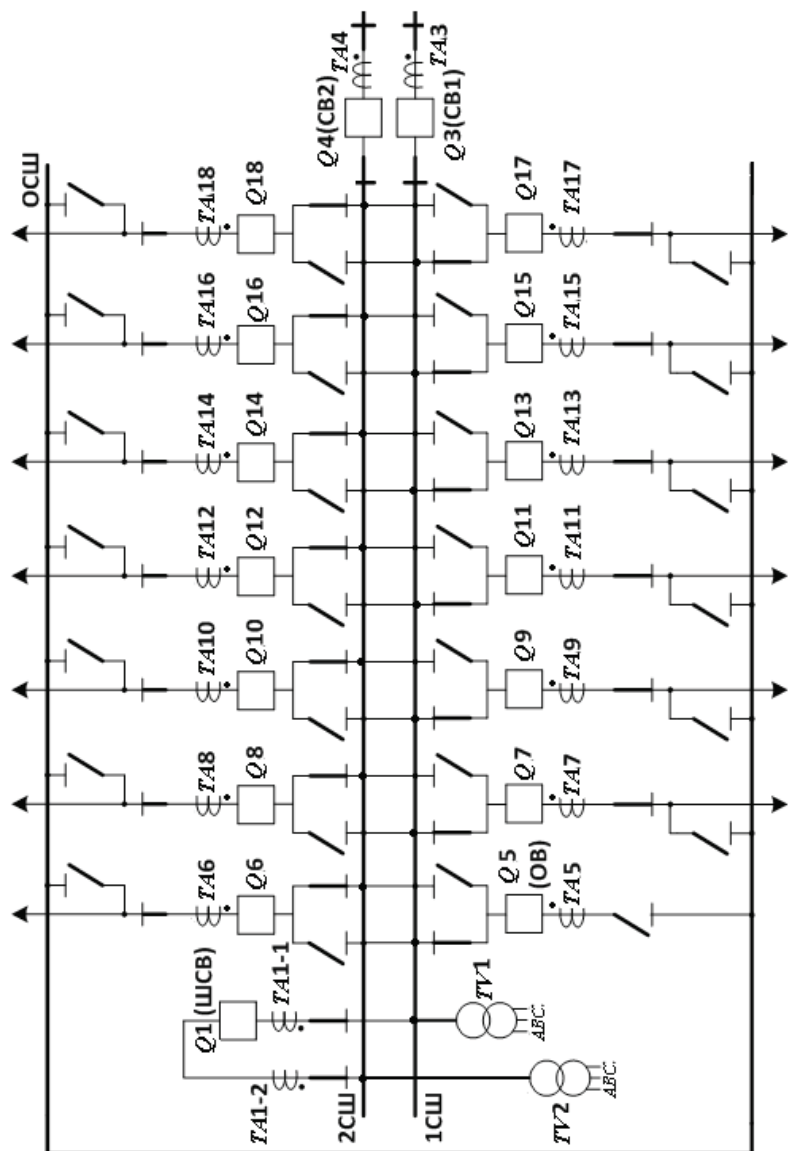


Рис. 3.1. Расположение ТТ для выполнения дифференциальной защиты сборных шин

3.1.2. Устройство и работа дифференциальной защиты шин шкафа ШЭ2607 061

Подключение шкафа ШЭ2607 061 к измерительным ТТ и ТН защищаемой системы сборных шин

Схема подключения шкафа ШЭ2607 061 к измерительным ТТ и ТН защищаемой системы сборных шин приведена на рис. 3.2.

Терминал БЭ2704V061 имеет 18 аналоговых входов для подключения цепей переменного тока и 6 аналоговых входов для подключения цепей переменного напряжения через промежуточные выравнивающие трансформаторы тока $TIA1$ – $TIA18$ и трансформаторы напряжения $TLV1$ – $TLV4$.

На токовые входы терминала подаются фазные токи всех присоединений СШ, которые используются для реализации алгоритмов реле ДЗШ-ПО, ДЗШ-ИО1 и ДЗШ-ИО2, реле ЧТО, реле тока УРОВ ШСВ, СВ1 и СВ2, реле контроля исправности токовых цепей пускового и избирательных органов, реле тока РТ1–РТ3.

От трансформаторов напряжения $TV1$ и $TV2$, установленных на первой и второй системах СШ соответственно, к терминалу подводятся два междуфазных напряжения U_{AB} и U_{BC} (от каждой системы шин). Данные напряжения используются для реализации алгоритмов реле напряжения $U_{\text{мф}} < \text{и } U_2 >$.

Первые два входа рассчитаны на подключение к цепям трансформаторов тока ШСв. Они попадают в зону действия только избирательных органов.

Третий и четвертый входы рассчитаны на подключение к ТТ секционных выключателей и попадают в зону действия ПО и соответствующего ИО.

Пятый вход терминала каждой фазы ДЗШ рассчитан на подключение к ТТ обходного выключателя. В зависимости от положения оперативного переключателя он может быть подключен к ИО1, ИО2 или выведен.

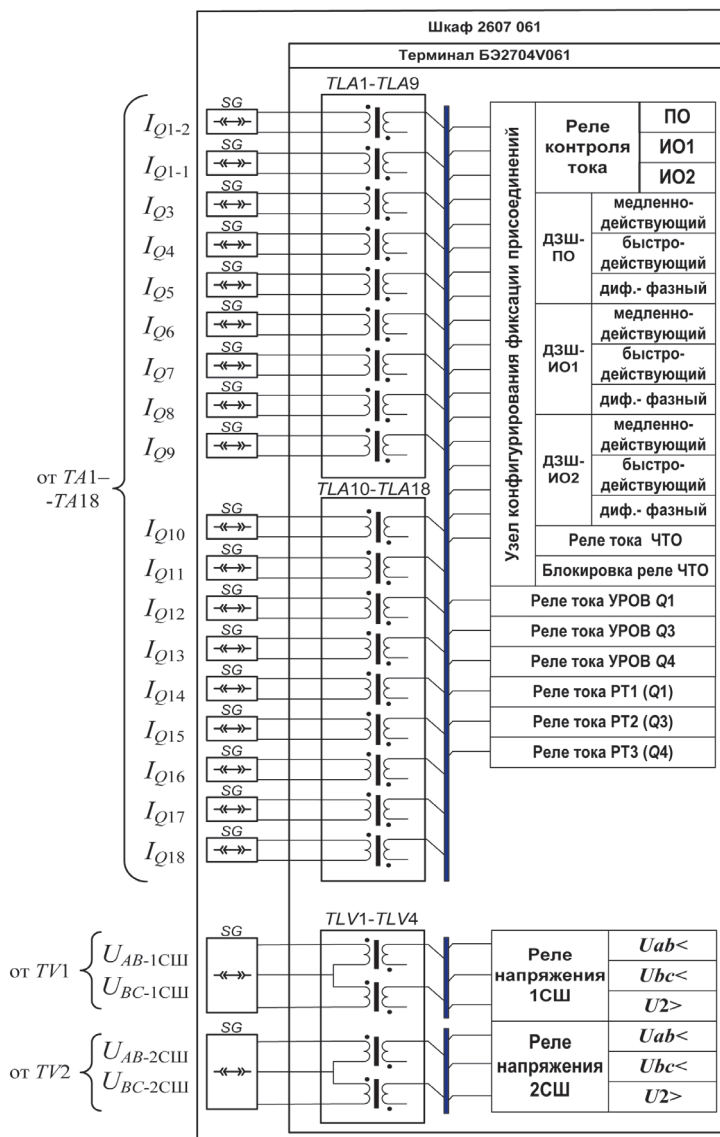


Рис. 3.2. Подключение терминала БЭ2704V061 к цепям ТТ и ТН СШ

Входы с шестого по восемнадцатый рассчитаны на подключение к ТТ выключателей присоединений какой-либо системы СШ и попадают в зону действия ПО и соответствующего ИО.

Принцип выполнения и работа ДЗШ шкафа ШЗ2607 061

Защита выполнена пофазной и содержит пусковые органы, действующие при КЗ на любой из систем шин, а также избирательные органы первой и второй систем шин, определяющие поврежденную систему шин. Сигнал на отключение поврежденной системы шин появляется только при срабатывании пускового и избирательного органов поврежденной фазы или нескольких фаз.

Пусковые органы через промежуточные трансформаторы тока подключены к основным трансформаторам тока всех присоединений обеих систем шин, за исключением трансформаторов тока ШСв. Избирательные органы первой и второй систем шин с помощью тех же промежуточных трансформаторов тока подключены к основным трансформаторам тока присоединений соответственно первой и второй систем шин, включая трансформаторы тока ШСв.

При срабатывании ПО и ИО1 или ИО2 сигналы отключения действуют на выходные реле, формирующие команды на отключение выключателей присоединений первой или второй систем шин соответственно.

Для действия на отключение при неуспешном АПВ систем шин в защите используется чувствительный токовый орган, имеющий более высокую чувствительность, чем пусковой орган.

В шкафу защиты предусмотрены пофазные реле контроля исправности цепей переменного тока ДЗШ, контролирующие фазные дифференциальные токи избирательных и пускового органов. Реле контроля с выдержкой времени действуют на сигнал и на блокировку ДЗШ с самоудерживанием и ручным возвратом.

Реле дифференциальной защиты шин состоит из следующих узлов:

- формирователя дифференциального и тормозного сигналов;
- быстродействующего пускового органа;
- медленнодействующего пускового органа;
- дифференциально-фазного пускового органа;
- чувствительного токового органа.

Дифференциальный ток $I_{\text{д}}$ формируется как модуль геометрической суммы всех токов, поступающих на вход реле ДЗШ. Тормозной ток $I_{\text{т}}$ определяется как полусумма модулей всех токов, поступающих на вход реле ДЗШ.

Характеристика срабатывания ДЗШ приведена на рис. 3.3.

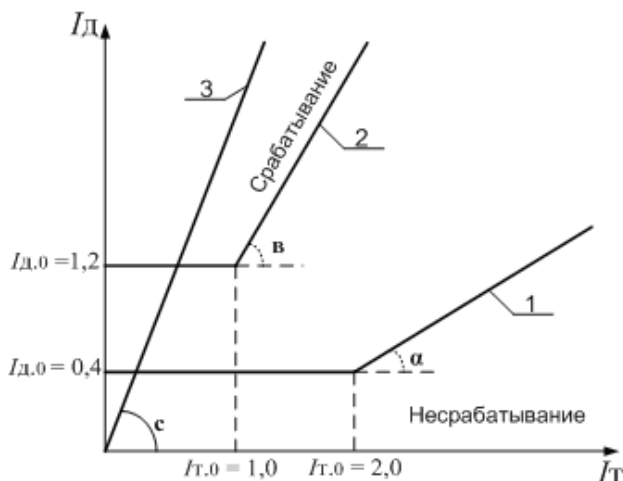


Рис. 3.3. Характеристика срабатывания ДЗШ

Для задания характеристики срабатывания ДЗШ вводится горизонтальный участок, соответствующий току начала торможения $I_{\text{т}0}$, и коэффициент торможения $k_{\text{т}}$, равный тангенсу угла наклона характеристики срабатывания ДЗШ к оси $I_{\text{т}}$.

Характеристики соответствуют следующим параметрам:

1 — $I_{Д.0} = 0,4$, $I_{Т.0} = 2,0$, $k_T = 0,6$;

2 — $I_{Д.0} = 1,2$, $I_{Т.0} = 1,0$, $k_T = 1,2$;

3 — $I_{Д.0} = 0$, $I_{Т.0} = 0$, $k_T = 2,0$,

где $I_{Д.0}$ — начальный ток срабатывания ДЗШ; $I_{Т.0}$ — ток начала торможения ДЗШ; k_T — коэффициент торможения ДЗШ.

Условия срабатывания защиты определяются по следующим выражениям:

- для горизонтального участка характеристики $I_D \geq I_{Д.0}$;
- для наклонного участка характеристики $I_D \geq k_T (I_T - I_{Т.0}) + I_{Д.0}$, где I_D — дифференциальный ток; $I_{Д.0}$ — начальный ток срабатывания защиты; k_T — коэффициент торможения; I_T — тормозной ток; $I_{Т.0}$ — ток начала торможения.

В табл. 3.1 перечислены программные накладки с указанием их положения, а в табл. 3.2 приведены наименования и назначения элементов задержки в схеме логической части узла контроля обрыва цепей тока, ДЗШ и ЧТО.

Таблица 3.1

Наименование и назначение программных накладок узла контроля обрыва

Наименование	Назначение	Положение	Значение по умолчанию
XB19	Блокировка при обрыве цепей тока ИО1	0 — не предусмотрена	Не предусмотрена
		1 — предусмотрена	
XB20	Блокировка при обрыве цепей тока ИО2	0 — не предусмотрена	Не предусмотрена
		0 — предусмотрена	

Таблица 3.2

Наименование и назначение элементов задержек узла контроля, ДЗШ и ЧТО

Наименование	Назначение	Диапазон, с
DT05	Задержка на срабатывание ПО ДЗШ	0,0–0,5
DT14	Время срабатывания контроля обрыва цепей тока ПО	0,05–27

Окончание табл. 3.2

Наименование	Назначение	Диапазон, с
DT15	Время срабатывания контроля обрыва цепей тока ИО1	0,05–27
DT16	Время срабатывания контроля обрыва цепей тока ИО2	0,05–27
DT21	Задержка на срабатывание реле ЧТО	0,02
DT50	Запоминание сигнала вывода блокировки ДЗШ при обрыве цепей тока	1,5

На рис. 3.4 приведена функциональная схема логической части ДЗШ, ЧТО и узла контроля обрыва цепей тока.

Работа логической части ДЗШ

При возникновении короткого замыкания на любой системе шин срабатывают реле ДЗШ ПО, в результате чего сигнал с выхода логического элемента ИЛИ (9) через элементы И (10), ЗАПРЕТ (11) (при отсутствии сигнала на его инверсном входе от узла контроля обрыва цепей тока) и элемент задержки DT05 поступает на первые входы элементов ЗАПРЕТ (21) и (23).

Если КЗ произошло на первой СШ, то срабатывают реле ДЗШ ИО1 и сигнал с выхода логического элемента ИЛИ (12) через элементы И (13) и ИЛИ (14) подается на второй вход элемента ЗАПРЕТ (21). При отсутствии сигнала на инверсном входе последнего сигнал с его выхода вызывает срабатывание выходных реле первой СШ, осуществляющих отключение всех выключателей присоединений, подключенных к первой системе шин, пуск УРОВ и запрет АПВ СВ1, ШСВ, ОВ (если ОВ подключен к первой СШ).



Если КЗ произошло на второй СШ, то срабатывают реле ДЗШ ИО2 и сигнал с выхода логического элемента ИЛИ (15) через элементы И (16) и ИЛИ (17) подается на второй вход элемента ЗАПРЕТ (23). При отсутствии сигнала на инверсном входе последнего сигнал с его выхода вызывает срабатывание выходных реле второй СШ, осуществляющих отключение всех выключателей присоединений, подключенных ко второй системе шин, пуск УРОВ и запрет АПВ СВ1, ШСВ, ОВ (если ОВ подключен ко второй СШ). Одновременно обеспечивается сигнализация о срабатывании ДЗШ на отключение соответствующей системы СШ.

Действие ДЗШ на отключение блокируется путем подачи сигнала «Запрет ДЗШ при опробовании» на инверсные входы элементов:

- ЗАПРЕТ (21) через логический элемент ИЛИ (20) при опробовании первой системы шин;
- ЗАПРЕТ (23) через логический элемент ИЛИ (22) при опробовании второй системы шин.

При нарушении фиксации присоединений (переключении какого-либо присоединения с одной СШ на другую) ключ «Нарушение фиксации» на двери шкафа защиты устанавливается в положение «Работа». В результате этого сигналы единичного уровня через логические элементы ИЛИ (14) и ИЛИ (17) постоянно подаются на вторые входы элементов ЗАПРЕТ (21) и (23), шунтируя цепи действия избирательных реле ДЗШ ИО1 и ДЗШ ИО2.

Если в режиме нарушения фиксации произойдет КЗ на какой-либо системе СШ, то при срабатывании реле ДЗШ ПО, независимо от состояния избирательных реле, будет производиться отключение обеих систем шин.

При опробовании СШ в режиме нарушения фиксации действие ДЗШ на отключение дополнительно блокируется путем подачи сигналов «Запрет ДЗШ при опробовании» на инверсные входы элементов ЗАПРЕТ (21) и ЗАПРЕТ (23) через логи-

ческие элементы ИЛИ (18), И (19) и вторые входы элементов ИЛИ (20) и ИЛИ (22) соответственно.

Для повышения чувствительности защиты в режиме АПВ сборных шин используется режим «Очувствление ДЗШ». Для его выполнения в логической схеме узла отключения с помощью элементов выдержки времени на возврат фиксируются сигналы о срабатывании ДЗШ на отключение. Если КЗ на шинах оказывается устойчивым, то после действия устройства АПВ срабатывает реле ЧТО, имеющее большую чувствительность по сравнению с пусковыми и избирательными реле ДЗШ. В результате этого защита надежно действует на отключение того присоединения системы СШ, от которого производилось ее опробование.

Действие реле тока ЧТО осуществляется через элемент задержки *DT21* и элемент ЗАПРЕТ (24). Оно может быть заблокировано путем подачи сигнала «Блокировка реле ЧТО» на инверсный вход ЗАПРЕТ (24).

Фиксация сигналов о работе ДЗШ на отключение в логической схеме узла отключения снимается после возврата реле ЧТО (при неуспешном АПВ шин) или по истечении времени их запоминания (при успешном АПВ шин).

Работа узла контроля обрыва цепей тока

Для выявления неисправностей в цепях тока ДЗШ предусмотрены три реле контроля исправности токовых цепей, представляющие собой чувствительные токовые реле, включенные в цепи дифференциального тока соответствующей фазы ПО, ИО1, ИО2.

При появлении сигнала на выходе любого из реле контроля тока ИО1 или ИО2 через элементы задержки *DT15* или *DT16*, элементы ЗАПРЕТ (4) или ЗАПРЕТ (6) подаются сигналы обрыва цепей тока «Ток небаланса 1 с. ш.» или «Ток небаланса 2 с. ш.» соответственно.

При срабатывании реле контроля тока ПО, включенного в дифференциальные цепи пускового органа, осуществляется блокировка работы ДЗШ подачей сигнала на инверсный вход элемента ЗАПРЕТ (11) через логический элемент ИЛИ (2), элемент задержки *DT14*, элемент ЗАПРЕТ (3) и элемент ИЛИ (1).

Срабатывание реле контроля тока ПО фиксируется путем подачи сигнала с выхода элемента ЗАПРЕТ (3) на вход ЗАПРЕТ (1). Для снятия фиксации необходимо подать сигнал «Возврат блокировки ДЗШ при обрыве цепей тока» на инверсный вход элемента ЗАПРЕТ (11).

При срабатывании реле контроля тока ПО одновременно с блокированием действия ДЗШ на отключение подается сигнал «Обрыв цепей тока».

При необходимости блокирующее действие от реле контроля тока ПО может быть исключено установкой ключа «Блокировка ДЗШ при обрыве цепей тока» в положение «Вывод». При этом сигнал «Вывод блокировки ДЗШ» через элемент задержки *DT50* подается на инверсный вход элемента ЗАПРЕТ (3).

В схеме узла контроля обрыва цепей тока предусмотрена возможность действия на блокировку работы ДЗШ от реле контроля тока ИО1 и ИО2 путем установки программных накладок *XB19* и *XB20*.

3.1.3. Расчет параметров дифференциальной защиты с торможением сборных шин напряжением 110–220 кВ

Расчет базисных токов и выравнивание токов присоединений

Для выравнивания вторичных токов от ТТ различных присоединений СШ производится расчет базисных токов присоединений. Для этого:

- главные ТТ присоединений располагаются в порядке уменьшения их коэффициентов трансформации;

- базисный ток ТТ с наибольшим коэффициентом трансформации ($K_{\text{ТТ1}}$) принимается $I_{\text{БАЗ.1}} = 1,001$, если $I_{2\text{НОМ.ТТ}} = 1$ А, или $I_{\text{БАЗ.1}} = 5,000$, если $I_{2\text{НОМ.ТТ}} = 5$ А;
- базисные токи присоединений с меньшими коэффициентами трансформации ($K_{\text{ТТ2}}$) определяются с помощью выражения

$$I_{\text{БАЗ.2}} = I_{\text{БАЗ.1}} \frac{K_{\text{ТТ1}}}{K_{\text{ТТ2}}}, \quad (3.1)$$

где $I_{\text{БАЗ.2}}$ — базисный ток присоединения с меньшим коэффициентом трансформации ТТ ($K_{\text{ТТ2}}$); $I_{\text{БАЗ.1}}$ — базисный ток ТТ с наибольшим коэффициентом трансформации ТТ ($K_{\text{ТТ1}}$).

Значения базисных токов по присоединениям СШ задаются в меню «Общая логика».

Для терминала БЭ2704V061 диапазон базисных токов составляет 1,000–25,000 с шагом 0,001 А, а входные ТТ имеют число витков первичной обмотки $W1 = 16$ с отводами от первого и четвертого витка для выравнивания токов.

По значениям базисных токов ТТ присоединений производится выбор числа витков первичных обмоток входных ТТ терминала.

Методика расчета параметров дифференциальной защиты с торможением сборных шин напряжением 110–220 кВ

Расчет параметров срабатывания ПО, ИО1 и ИО2 ДЗШ с торможением сводится к определению [7]:

- тока начала торможения $I_{\text{Т.0}}$;
- начального тока срабатывания $I_{\text{Д.0}}$;
- коэффициента торможения $k_{\text{Т}}$.

Выбор тока начала торможения

Ток начала торможения $I_{\text{Т.0}}$ задается в относительных единицах и регулируется в диапазоне 1,00–2,00 (в долях от базисного

тока) с точностью до 0,01. Рекомендуется начинать расчет параметров срабатывания защиты с принятия $I_{Т.0} = 1,0$. Если чувствительность защиты при этом получается неудовлетворительной, то необходимо увеличить $I_{Т.0}$ до необходимого значения.

Расчет начального тока срабатывания

Начальный ток срабатывания дифференциальной защиты выбирается из следующих условий:

- по отстройке от максимального тока в защите при разрыве ее вторичных цепей в рабочем нагрузочном режиме

$$I_{Д.0} \geq \frac{k_{ОТС} I_{РАБ.МАКС}}{K_{ТТ} I_{БАЗ}}, \quad (3.2)$$

где $k_{ОТС}$ — коэффициент отстройки, $k_{ОТС} = 1,2$; $I_{РАБ.МАКС}$ — первичный ток нагрузки наиболее нагруженного присоединения; $K_{ТТ}$ — коэффициент трансформации ТТ наиболее нагруженного присоединения; $I_{БАЗ}$ — базисный ток наиболее нагруженного присоединения;

- по отстройке от расчетного первичного тока небаланса в режиме, соответствующем началу торможения,

$$I_{Д.0} \geq k_{ОТС} I_{НБ.ТОРМ.НАЧ}, \quad (3.3)$$

где $k_{ОТС}$ — коэффициент отстройки, $k_{ОТС} = 1,5$; $I_{НБ.ТОРМ.НАЧ}$ — составляющая тока небаланса, обусловленная погрешностью ТТ в режиме, соответствующем началу торможения,

$$I_{НБ.ТОРМ.НАЧ} = (k_{ОДН} k_{ПЕР} \varepsilon + \Delta f_{ВЫР} + \Delta f_{ПТТ}) I_{Т.0}. \quad (3.4)$$

Здесь $k_{ОДН}$ — коэффициент одностипности, $k_{ОДН} = 1,0$; $k_{ПЕР}$ — коэффициент, учитывающий переходный режим: $k_{ПЕР} = 1,3$ при $I_{Т.0} = 1,0$, $k_{ПЕР} = 1,5 \dots 2,0$ при $I_{Т.0} = 2,0$; ε — полная относительная погрешность основных ТТ, $\varepsilon = 0,1$; $\Delta f_{ВЫР}$ — полная относительная погрешность выравнивания, $\Delta f_{ВЫР} = 0,02$;

$\Delta f_{\text{ПТТ}}$ — полная относительная погрешность промежуточных ТТ (устанавливаются, если значение $I_{\text{БАЗ}}$ выходит из допустимого диапазона), $\Delta f_{\text{ПТТ}} = 0,05$; $I_{\text{Т.0}}$ — принятое значение тока начала торможения.

Выбирается наибольшее значение из рассчитанных по выражениям (3.2) и (3.3). Минимально возможное значение начального тока срабатывания $I_{\text{Д.0}} = 0,4$.

Расчет коэффициента торможения

Коэффициент торможения дифференциальной защиты выбирается из следующих условий:

- по отстройке от тока небаланса в переходном режиме внешнего КЗ

$$k_{\text{Т}} \geq \frac{\Delta I_{\text{Д}}}{\Delta I_{\text{Т}}} = \frac{k_{\text{ОТС}} I_{\text{НБ.РАСЧ.КЗ}} - I_{\text{Д.0}}}{I_{\text{ТОРМ.РАСЧ.КЗ}} - I_{\text{Т.0}}}, \quad (3.5)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{ОТС}} = 1,5$; $I_{\text{НБ.РАСЧ.КЗ}}$ — относительное значение максимального расчетного тока небаланса, протекающего через защиту при расчетном внешнем КЗ, от которого защита должна быть отстроена выбором $k_{\text{Т}}$,

$$I_{\text{НБ.РАСЧ.КЗ}} = (k_{\text{ОДН}} k_{\text{ПЕР}} \varepsilon + \Delta f_{\text{ВЫР}} + \Delta f_{\text{ПТТ}}) I_{\text{КЗ.МАКС}}. \quad (3.6)$$

Здесь $I_{\text{КЗ.МАКС}}$ — относительное максимальное значение тока внешнего металлического КЗ, приведенное к базисному току по выражению

$$I_{\text{КЗ.МАКС}} = \frac{I_{\text{КЗ.МАКС.П}}}{K_{\text{ТТ}} I_{\text{БАЗ}}}, \quad (3.7)$$

где $I_{\text{КЗ.МАКС.П}}$ — максимальное первичное значение тока внешнего металлического короткого замыкания; $I_{\text{Д.0}}$ — принятое значение начального тока срабатывания дифференциальной защиты.

$I_{\text{ТОРМ.РАСЧ.КЗ}}$ — относительное значение расчетного тормозного тока в защите при расчетном внешнем КЗ

$$I_{\text{ТОРМ.РАСЧ.КЗ}} = \left[(1 - 0,5(k_{\text{ОДН}}k_{\text{ПЕР}}\varepsilon + \Delta f_{\text{ВЫР}} + \Delta f_{\text{ПТТ}})) \right] I_{\text{КЗ.МАКС}} + I_{\text{НАГР}}. \quad (3.8)$$

Здесь $I_{\text{НАГР}}$ — относительное значение тока в нагрузочном режиме, приведенное к базисному току и определяемое как арифметическая сумма токов, протекающих через защиту, по выражению

$$I_{\text{НАГР}} = \sum_{j=1}^N \frac{I_{\text{НАГР.}j}}{K_{\text{ТТ.}j} I_{\text{БАЗ.}j}}, \quad (3.9)$$

где $I_{\text{НАГР.}j}$ — первичное значение тока в нагрузочном режиме, протекающего по j -й ветви присоединения.

$I_{\text{Т.0}}$ — принятое значение тока начала торможения.

Остальные коэффициенты в выражениях (3.6) и (3.8) принимаются равными аналогичным коэффициентам в формуле (3.4);

- по отстройке от тока небаланса в режиме качаний

$$k_{\text{Т}} \geq \frac{k_{\text{ОТС}} I_{\text{НБ.РАСЧ.КАЧ}} - I_{\text{Д.0}}}{I_{\text{ТОРМ.РАСЧ.КАЧ}} - I_{\text{Т.0}}}, \quad (3.10)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{ОТС}} = 1,5$; $I_{\text{НБ.РАСЧ.КАЧ}}$ — относительное значение максимального расчетного тока небаланса при качаниях, протекающего через защиту, от которого защита должна быть отстроена путем выбора $k_{\text{Т}}$,

$$I_{\text{НБ.РАСЧ.КАЧ}} = (k_{\text{ОДН}}k_{\text{ПЕР}}\varepsilon + \Delta f_{\text{ВЫР}} + \Delta f_{\text{ПТТ}}) I_{\text{КАЧ}}. \quad (3.11)$$

Здесь $k_{\text{ПЕР}}$ — коэффициент, учитывающий переходный режим, $k_{\text{ПЕР}} = 1,0$; $I_{\text{КАЧ}}$ — относительное максимальное значение тока в режиме качаний, приведенное к базисному току по выражению

$$I_{\text{КАЧ}} = \frac{I_{\text{КАЧ.П}}}{K_{\text{ТТ}} I_{\text{БАЗ}}}, \quad (3.12)$$

где $I_{\text{КАЧ.П}}$ — максимальное первичное значение тока в режиме качаний.

$I_{\text{ТОРМ.РАСЧ.КАЧ}}$ — относительное значение расчетного тормозного тока в защите при качаниях

$$I_{\text{ТОРМ.РАСЧ.КАЧ}} = \left[(1 - 0,5(k_{\text{ОДН}}k_{\text{ПЕР}}\varepsilon + \Delta f_{\text{ВЫР}} + \Delta f_{\text{ПТТ}})) \right] I_{\text{КАЧ}} + I_{\text{НАГР}}. \quad (3.13)$$

Здесь $I_{\text{НАГР}}$ — относительное значение тока в нагрузочном режиме, приведенное к базисному току и определяемое как арифметическая сумма токов, протекающих через защиту, по выражению (3.9).

Остальные коэффициенты в выражениях (3.11) и (3.13) принимаются равными аналогичным коэффициентам в формуле (3.5).

Принимается наибольшее из двух рассчитанных значений коэффициента торможения с округлением в сторону увеличения от полученного значения (с учетом дискретности задания k_T равной 0,1), но не менее 0,6.

Проверка чувствительности ДЗШ

Определение коэффициента чувствительности ДЗШ должно производиться при расчетном виде КЗ на шинах в расчетных по чувствительности режимах работы подстанции и питающей системы по выражению

$$k_{\text{Ч}} = \frac{I_{\text{КЗ.МИН}}}{I_{\text{Д.0}} + k_T(I_{\text{ТОРМ.РАСЧ}} - I_{\text{Т.0}})}, \quad (3.14)$$

где $I_{\text{КЗ.МИН}}$ — относительное минимальное значение периодической составляющей полного фазного тока рассматриваемого вида КЗ на шинах, приведенное к базисному току по выражению

$$I_{\text{КЗ.МИН}} = \frac{I_{\text{КЗ.МИН.П}}}{K_{\text{ТТ}} I_{\text{БАЗ}}}. \quad (3.15)$$

Здесь $I_{\text{КЗ.МИН.П}}$ — минимальное первичное значение периодической составляющей полного фазного тока рассматриваемого вида КЗ на шинах.

$I_{Д.0}$ — принятое значение начального тока срабатывания дифференциальной защиты; k_T — принятое значение коэффициента торможения; $I_{ТОРМ. РАСЧ}$ — тормозной ток, подводимый к защите при расчетном КЗ с учетом нагрузки и вычисляемый по выражению

$$I_{ТОРМ.РАСЧ} = I_{КЗ.МИН} + I_{НАГР}. \quad (3.16)$$

Здесь $I_{НАГР}$ — относительное значение арифметической суммы токов, протекающих через защиту в нагрузочном режиме, рассчитываемое аналогично выражению (3.9).

$I_{Т.0}$ — принятое значение тока начала торможения.

Выражение (3.14) справедливо при $I_{ТОРМ. РАСЧ} > I_{Т.0}$.

Значение коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$ должно быть не менее 2.

Если значение коэффициента чувствительности окажется меньше 2, то оценка чувствительности защиты произведется традиционным для защит с торможением способом. При этом под коэффициентом чувствительности понимается отношение тока КЗ, при которой защита находится на грани срабатывания, к току срабатывания защиты.

На характеристику срабатывания ДЗШ (рис. 3.5) наносится точка В с координатами $I_{\text{Д}} = I_{\text{КЗ.МИН}}$ и $I_{\text{Т}} = I_{\text{КЗ.МИН}} - I_{\text{НАГР}}$.

Проводится прямая, соединяющая точку В с точкой на оси абсцисс, координата которой равна току $I_{\text{НАГР}}$. Точка А пересечения прямой с характеристикой срабатывания ДЗШ является точкой, где защита находится на грани срабатывания.

В первом случае, когда рассматриваемая прямая пересекает характеристику срабатывания в горизонтальной части (рис. 3.5, а), коэффициент чувствительности определяется по выражению

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ.МИН}}}{I_{\text{Д.0}}},$$

где $I_{\text{Д.0}}$ — принятое значение начального тока срабатывания.

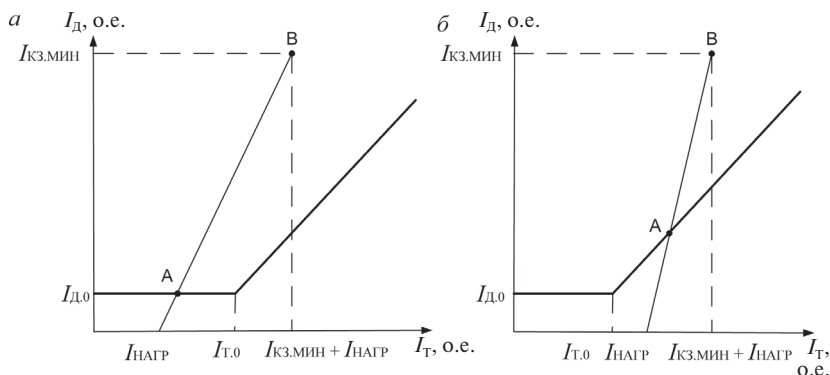


Рис. 3.5. Определение чувствительности ДЗШ:

a — в первом случае; *б* — во втором случае

Во втором случае, когда рассматриваемая прямая пересекает характеристику срабатывания в наклонной части (как показано на рис. 3.5, *б*), коэффициент чувствительности определяется по выражению

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз.мин}}(1 - k_{\text{т}})}{I_{\text{д.0}} - k_{\text{т}}(I_{\text{т.0}} - I_{\text{нагр}})}.$$

Если полученное значение $k_{\text{ч}} < 2$, то необходимо увеличить значение $I_{\text{т.0}}$ и повторить расчет коэффициента чувствительности.

Расчет тока срабатывания реле чувствительного токового органа

Ток срабатывания реле ЧТО должен быть отстроен от тока небаланса при самозапуске электродвигателей нагрузки по выражению

$$I_{\text{сз.что}} \geq \frac{k_{\text{отс}} k_{\text{сзп}} \varepsilon I_{\text{неоткл.присоед}}}{k_{\text{в}} K_{\text{тт}} I_{\text{баз}}}, \quad (3.17)$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{отс}} = 1,2$; $k_{\text{сзп}}$ — коэффициент, учитывающий увеличение тока в условиях самозапуска

заторможенных двигателей нагрузки. В предварительных расчетах, а также в случае отсутствия соответствующей информации значение данного коэффициента может быть принято из диапазона 1,5–2,5 [7]; ε — полная относительная погрешность основных ТТ, $\varepsilon = 0,1$; $I_{\text{неоткл. присоед}}$ — первичный максимальный ток неотключенного присоединения; k_B — коэффициент возврата, $k_B = 0,9$; $K_{\text{ТТ}}$ — коэффициент трансформации ТТ неотключенного присоединения; $I_{\text{БАЗ}}$ — базисный ток неотключенного присоединения.

Определение коэффициента чувствительности реле ЧТО должно производиться при расчетном виде КЗ на шинах в режиме опробования СШ

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{ОПР.ПРИСОЕД}}}{I_{\text{СЗ.ЧТО}}}. \quad (3.18)$$

Здесь $I_{\text{ОПР.ПРИСОЕД}}$ — относительное значение минимального тока, протекающего через шины при опробовании,

$$I_{\text{ОПР.ПРИСОЕД}} = \frac{I_{\text{КЗ.МИН.П}}}{K_{\text{ТТ}} I_{\text{БАЗ}}}, \quad (3.19)$$

где $I_{\text{КЗ.МИН.П}}$ — минимальное первичное значение тока КЗ на шинах в режиме опробования.

$I_{\text{СЗ.ЧТО}}$ — принятое значение параметра срабатывания ЧТО.

Значение коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$ должно быть не менее 2.

Расчет тока срабатывания реле контроля исправности цепей тока

Ток срабатывания реле контроля обрыва цепей переменного тока определяется по условию отстройки от тока небаланса максимального рабочего (нагрузочного) режима с учетом полной погрешности трансформаторов тока и неточности выравнивания коэффициентов трансформации ТТ защиты

$$I_{\text{ср.конт}} \geq \frac{k_{\text{отс}}(k_{\text{нб}} + \Delta f_{\text{выр}})I_{\text{нагр.макс}}}{K_{\text{тт}}I_{\text{баз}}}, \quad (3.20)$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, принимается равным 1,2; $k_{\text{нб}}$ — коэффициент небаланса, принимается равным 0,02; $\Delta f_{\text{выр}}$ — полная относительная погрешность выравнивания, принимается 0,02; $I_{\text{нагр.макс}}$ — первичный ток нагрузки наиболее мощного присоединения СШ; $K_{\text{тт}}$ — коэффициент трансформации трансформатора наиболее мощного присоединения сборных шин; $I_{\text{баз}}$ — базисный ток присоединения.

Определение времени запоминания срабатывания ДЗШ и времени ввода «очувствления»

В шкафу защиты шин ШЭ2607 061 предусмотрено автоматическое повышение чувствительности ДЗШ при АПВ шин. Повышение чувствительности производится путем вывода из действия пускового органа, при этом отключение поврежденной системы шин при АПВ выполняет реле ЧТО, которое имеет бóльшую чувствительность, чем пусковой орган. Указанное действие обеспечивается в течение заданного времени запоминания срабатывания ДЗШ.

Время запоминания срабатывания ДЗШ определяется по выражению

$$t_{\text{зс.дзш}} = t_{\text{апв}} + t_{\text{откл.в}} + t_{\text{зап}}, \quad (3.21)$$

где $t_{\text{апв}}$ — время цикла АПВ шин; $t_{\text{откл.в}}$ — время отключения выключателя того присоединения, для которого рассматривается цикл АПВ; $t_{\text{зап}}$ — время запаса, принимаемое равным 0,1 с.

Время ввода «очувствления» ($t_{\text{оч.дзш}}$) ДЗШ должно перекрывать время автоматической сборки доаварийной схемы сборных шин с учетом времени срабатывания ДЗШ, времени отключения выключателей и времени запаса. Оно определяется по выражению (3.21), в котором $t_{\text{зап}}$ принимается равным 0,5 с.

Пример расчета параметров дифференциальной защиты с торможением сборных шин напряжением 220 кВ

В примере выполнен расчет защиты сборных шин распределительного устройства (РУ) напряжением 220 кВ ПС 1, расположенной в сети, схема которой приведена на рис. 1.5 (см. с. 36).

Упрощенная схема распределительного устройства (РУ) на напряжении 220 кВ подстанции ПС 1 500/220/110 кВ показана на рис. 3.6.

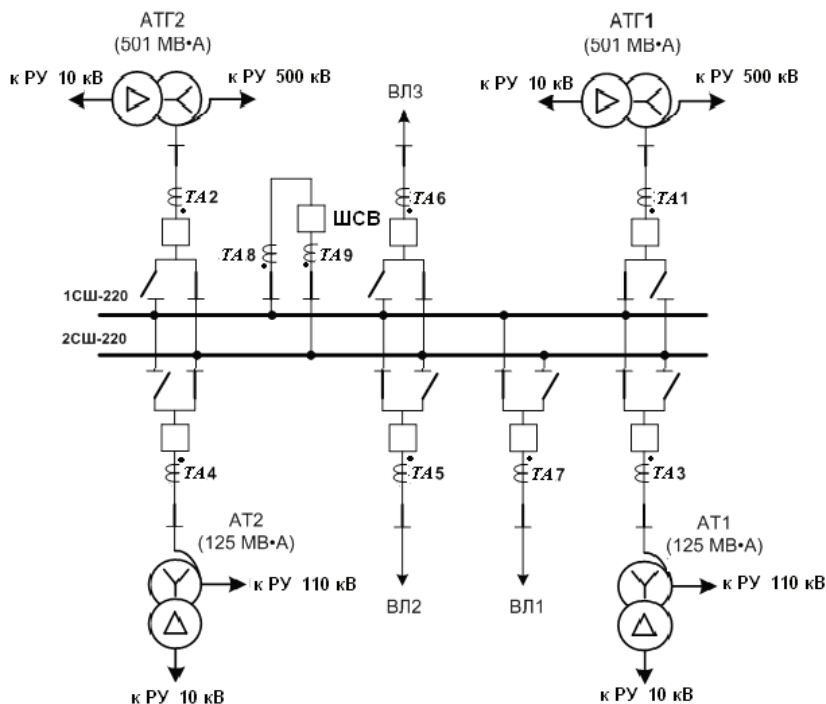


Рис. 3.6. Упрощенная схема РУ 220 кВ подстанции ПС 1

К сборным шинам 220 кВ подстанции подключены:

- две автотрансформаторные группы АТГ1 и АТГ2 напряжением 500/220 кВ и мощностью по 501 МВ·А каждая;
- два трехфазных автотрансформатора АТ1 и АТ2 напряжением 220/110 кВ и мощностью по 125 МВ·А каждый;
- три транзитные воздушные линии ВЛ1, ВЛ2 и ВЛ3 напряжением 220 кВ.

На всех присоединениях сборных шин напряжением 220 кВ установлены элегазовые выключатели с временем отключения 0,05 с.

Первичные рабочие токи нагрузки и коэффициенты трансформации ТТ присоединений сборных шин 220 кВ приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Рабочие токи нагрузки и $K_{ТТ}$ присоединений сборных шин 220 кВ

Параметр	Рабочие токи нагрузки и $K_{ТТ}$ присоединений сборных шин						
	АТГ1	АТГ2	АТ1	АТ2	ВЛ1	ВЛ 2	ВЛ 3
$I_{РАБ. НАГР}, А$	1214	1214	314	314	600	600	600
$K_{ТТ}$	1200/5	1200/5	1000/5	1000/5	600/5	600/5	600/5

Токи КЗ в различных режимах работы оборудования в РУ-220 ПС 1 приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Ток при КЗ на шинах

Параметр	АТГ1	АТГ2	АТ1	АТ2	ВЛ1	ВЛ2	ВЛ3
Все элементы схемы в работе							
$I^{(3)}, кА$	5,65	5,65	1,24	1,24	1,93	2,45	2,45
$I^{(1)}, кА$	6,51	6,51	0,94	0,94	2,03	2,7	2,7
В ремонтном режиме (отключена АТГ1)							
$I^{(3)}, кА$	—	7,62	1,24	1,24	1,91	2,47	2,47
$I^{(1)}, кА$	—	8,79	1,16	1,16	2,01	2,45	2,45
В режиме опробования							
$I^{(3)}, кА$	7,5	7,5	1,03	1,03	0,895	4,3	4,3

Суммарный ток при КЗ на шинах $I^{(3)} = 20,61$ кА, $I^{(1)} = 22,33$ кА.

Суммарный ток при КЗ на шинах $I^{(3)} = 16,95$ кА, $I^{(1)} = 18,02$ кА.

Защита СШ выполнена с помощью шкафа ШЭ2607 061 в виде дифференциальной защиты шин с торможением с числом присоединений, равным девяти.

Параметрирование терминала

Расчет базисных токов присоединений СШ производится в следующей последовательности:

- ТТ присоединений СШ, показанных на рис. 3.6, располагаем в порядке уменьшения их коэффициентов трансформации — ТА1 (АТГ1), ТА2 (АТГ2), ТА3 (АТ1), ТА4 (АТ2), ТА5 (ВЛ2), ТА6 (ВЛ3), ТА7 (ВЛ1);
- при $I_{2\text{НОМ}} = 5$ А базисные токи присоединений с наибольшими коэффициентами трансформации ТТ принимаем равными 5 А, $I_{\text{БАЗ.ТА1}} = I_{\text{БАЗ.ТА2}} = 5$ А;
- базисные токи присоединений с меньшими коэффициентами трансформации ТТ определяем с помощью выражения (3.1)

$$I_{\text{БАЗ.ТА3}} = I_{\text{БАЗ.ТА4}} = I_{\text{БАЗ.ТА1}} \frac{K_{\text{ТА1}}}{K_{\text{ТА3}}} = 5 \cdot \frac{1200/5}{1000/5} = 6 \text{ А};$$

$$I_{\text{БАЗ.ТА5}} = I_{\text{БАЗ.ТА6}} = I_{\text{БАЗ.ТА7}} = I_{\text{БАЗ.ТА1}} \frac{K_{\text{ТА1}}}{K_{\text{ТА5}}} = 5 \cdot \frac{1200/5}{600/5} = 10 \text{ А}.$$

Рассчитанные значения базисных токов принадлежат диапазону изменения базисных токов, который составляет для пятиамперного исполнения ТТ 5,000–25,000 А.

Установки промежуточных ТТ не требуется.

Рассчитанные значения базисных токов присоединений сборных шин напряжением 220 кВ на ПС А приведены в табл. 3.5 «Общая логика».

Таблица 3.5

Меню «Общая логика»

Наименование величины	Обозначение величины	Диапазон изменения, А	Значение величины, А
Базисный ток ТТ АТГ1	$I_{\text{БАЗ.ТА1}}$	5,000–25,000	5
Базисный ток ТТ АТГ2	$I_{\text{БАЗ.ТА2}}$		5
Базисный ток ТТ АТ1	$I_{\text{БАЗ.ТА3}}$		6
Базисный ток ТТ АТ2	$I_{\text{БАЗ.ТА4}}$		6
Базисный ток ТТ ВЛ2	$I_{\text{БАЗ.ТА5}}$		10
Базисный ток ТТ ВЛ3	$I_{\text{БАЗ.ТА6}}$		10
Базисный ток ТТ ВЛ1	$I_{\text{БАЗ.ТА7}}$		10

Выбор и расчет параметров ДЗШ с торможением

Выбор тока начала торможения

Принимаем ток начала торможения $I_{\text{Т.0}} = 1,2$.

Расчет начального тока срабатывания

Начальный ток срабатывания дифференциальной защиты выбирается из двух условий:

- по отстройке от максимального тока в защите при разрыве ее вторичных цепей в рабочем режиме по выражению (3.2)

$$I_{\text{Д.0}} \geq \frac{k_{\text{ОТС}} I_{\text{РАБ.МАКС}}}{K_{\text{ТТ}} I_{\text{БАЗ}}} = \frac{1,2 \cdot 1214}{1200 / 5 \cdot 5} = 1,22,$$

где $I_{\text{РАБ.МАКС}}$ — первичный ток нагрузки наиболее нагруженного присоединения, $I_{\text{РАБ.МАКС}} = 1214$ А, а $I_{\text{БАЗ}} = I_{\text{БАЗ.1}} = 5$ А;

- по отстройке от расчетного первичного тока небаланса в режиме, соответствующем началу торможения, по выражениям (3.3) и (3.4):

$$I_{\text{д.о}} \geq k_{\text{отс}} I_{\text{нб.торм.нач}} = 1,5 \cdot 0,18 = 0,27.$$

$$I_{\text{нб.торм.нач}} = (k_{\text{одн}} k_{\text{пер}} \varepsilon + \Delta f_{\text{выр}} + \Delta f_{\text{птт}}) I_{\text{т.о}} = \\ = (1,0 \cdot 1,3 \cdot 0,1 + 0,02 + 0) \cdot 1,2 = 0,15 \cdot 1,2 = 0,18,$$

где $k_{\text{пер}}$ — коэффициент, учитывающий переходный режим (при $I_{\text{т.о}} = 1,2$), $k_{\text{пер}} = 1,3$; $\Delta f_{\text{птт}}$ — полная относительная погрешность промежуточных ТТ, принимается равной 0, так как они не установлены.

Выбирается наибольшее значение из рассчитанных, $I_{\text{д.о}} = 1,3$ о.е.

Расчет коэффициента торможения

Определяется относительное значение максимального расчетного тока небаланса в режиме внешнего КЗ, от которого защита должна быть отстроена выбором $k_{\text{т}}$, по выражению (3.6)

$$I_{\text{нб.расч.кз}} = (k_{\text{одн}} k_{\text{пер}} \varepsilon + \Delta f_{\text{выр}} + \Delta f_{\text{птт}}) I_{\text{кз.макс}} = 0,15 \cdot 17,8 = 2,67,$$

где $I_{\text{кз.макс}}$ — относительное максимальное значение тока внешнего однофазного КЗ, приведенное к базисному току по выражению (3.7), $I_{\text{кз.макс}} = \frac{I_{\text{кз.макс.}\Sigma} - I_{\text{кз.ат1}}}{K_{\text{тт}} I_{\text{баз}}} = \frac{22330 - 940}{(1200/5) \cdot 5} = 17,8$,

а $I_{\text{кз.макс.}\Sigma}$ — максимальное значение тока однофазного КЗ на шинах, $I_{\text{кз.макс.}\Sigma} = 22330$ А и $I_{\text{кз.ат1}}$ — ток КЗ, притекающий к шинам от АТ1, $I_{\text{кз.ат1}} = 940$ А.

Определяется относительное значение расчетного тормозного тока по выражению (3.8)

$$I_{\text{торм.расч.кз}} = \left[1 - 0,5 (k_{\text{одн}} k_{\text{пер}} \varepsilon + \Delta f_{\text{выр}} + \Delta f_{\text{птт}}) \right] I_{\text{кз.макс}} + I_{\text{нагр}} = \\ = (1 - 0,5 \cdot 0,15) \cdot 17,8 + 4,05 = 20,5,$$

где $I_{\text{НАГР}}$ — относительное значение тока в нагрузочном режиме, приведенное к базисному току по выражению (3.9),

$$I_{\text{НАГР}} = \sum_{j=1}^N \frac{I_{\text{НАГР},j}}{K_{\text{ТТ},j} I_{\text{БАЗ},j}} = \frac{1214 \cdot 2 + 314 \cdot 2 + 600 \cdot 3}{(1200/5) \cdot 5} = 4,05.$$

Определяется относительное значение максимального расчетного тока небаланса при качаниях, от которого защита должна быть отстроена путем выбора $k_{\text{Т}}$, по выражению (3.11)

$$I_{\text{НБ.РАСЧ.КАЧ}} = (k_{\text{ОДН}} k_{\text{ПЕР}} \varepsilon + \Delta f_{\text{ВЫР}} + \Delta f_{\text{ПТТ}}) I_{\text{КАЧ}} = 0,15 \cdot 16,14 = 2,42,$$

где $I_{\text{КАЧ}}$ — относительное максимальное значение тока в режиме качаний, приведенное к базисному току по выражения (3.12),

$$I_{\text{КАЧ}} = \frac{I_{\text{КАЧ.П}}}{K_{\text{ТТ}} I_{\text{БАЗ}}} = \frac{I_{\text{КЗ.МАКС}}^{(3)} - I_{\text{КЗ.АТ1}}^{(3)}}{K_{\text{ТТ}} I_{\text{БАЗ}}} = \frac{20610 - 1240}{(1200/5) \cdot 5} = 16,14$$

($I_{\text{КЗ.МАКС}}^{(3)}$ — первичное максимальное значение тока внешнего трехфазного КЗ на шинах, $I_{\text{КЗ.МАКС}}^{(3)} = 20610$ А, и $I_{\text{КЗ.АТ1}}^{(3)}$ — ток КЗ, притекающий к шинам от АТ1).

Определяется относительное значение расчетного тормозного тока в защите при качаниях по выражению (3.13)

$$\begin{aligned} I_{\text{ТОРМ.РАСЧ}} &= (1 - 0,5(k_{\text{ОДН}} k_{\text{ПЕР}} \varepsilon + \Delta f_{\text{ВЫР}} + \Delta f_{\text{ПТТ}})) I_{\text{КАЧ}} + I_{\text{НАГР}} = \\ &= (1 - 0,5 \cdot 0,15) \cdot 16,14 + 4,05 = 18,98, \end{aligned}$$

где $I_{\text{НАГР}}$ — относительное значение тока в нагрузочном режиме, приведенное к базисному току, $I_{\text{НАГР}} = 4,05$.

Коэффициент торможения дифференциальной защиты выбирается из следующих условий:

- по отстройке от тока небаланса в переходном режиме при внешнем КЗ производится по выражению (3.5). Приняв значения $k_{\text{ОТС}} = 1,5$, $I_{\text{НБ.РАСЧ.КЗ}} = 2,67$, $I_{\text{Д.0}} = 1,3$, $I_{\text{ТОРМ.РАСЧ.КЗ}} = 20,5$ и $I_{\text{Т.0}} = 1,2$, получим

$$k_{\text{Т}} \geq \frac{\Delta I_{\text{Д}}}{\Delta I_{\text{Т}}} = \frac{k_{\text{ОТС}} I_{\text{НБ.РАСЧ.КЗ}} - I_{\text{Д.0}}}{I_{\text{ТОРМ.РАСЧ.КЗ}} - I_{\text{Т.0}}} = \frac{1,5 \cdot 2,67 - 1,3}{20,5 - 1,2} = 0,14;$$

- по отстройке от тока небаланса в режиме качаний определяется по выражению (3.10). Приняв значения $k_{\text{отс}} = 1,5$, $I_{\text{НБ. РАСЧ. КАЧ}} = 2,42$, $I_{\text{Д.0}} = 1,3$, $I_{\text{ТОРМ. РАСЧ. КАЧ}} = 18,98$ и $I_{\text{Т.0}} = 1,2$, получим

$$k_{\text{Т}} \geq \frac{k_{\text{отс}} I_{\text{НБ. РАСЧ. КАЧ}} - I_{\text{Д.0}}}{I_{\text{ТОРМ. РАСЧ. КАЧ}} - I_{\text{Т.0}}} = \frac{1,5 \cdot 2,42 - 1,3}{18,98 - 1,2} = 0,13.$$

Принимается наибольшее из двух рассчитанных значений коэффициента торможения $k_{\text{Т}}$ с округлением в сторону увеличения от расчетного значения (с учетом дискретности задания коэффициента торможения равной 0,1), но не менее 0,6.

Принимаем $k_{\text{Т}} = 0,6$.

Проверка чувствительности ДЗШ

Проверка чувствительности ДЗШ должна производиться при расчетном виде КЗ на шинах в расчетных по чувствительности режимах работы подстанции и питающей системы с учетом нагрузки по выражению (3.14)

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ.МИН}}}{I_{\text{Д.0}} + k_{\text{Т}} (I_{\text{ТОРМ. РАСЧ}} - I_{\text{Т.0}})} = \frac{12,23}{1,3 + 0,6 \cdot (8,13 - 1,2)} = 2,2 > 2,0,$$

где $I_{\text{КЗ.МИН}}$ — относительное минимальное значение периодической составляющей полного фазного тока рассматриваемого вида КЗ на шинах, приведенное к базисному току по выражению (3.15),

$$I_{\text{КЗ.МИН}} = \frac{I_{\text{КЗ.МИН.П}}}{K_{\text{ТТ}} I_{\text{БАЗ}}} = \frac{(\sqrt{3} / 2) \cdot 16950}{(1200 / 5) \cdot 5} = 12,23.$$

Здесь $I_{\text{КЗ.МИН.П}}$ — первичное минимальное значение периодической составляющей полного фазного тока при двухфазном КЗ на шинах в ремонтном режиме.

$I_{\text{Д.0}}$ — принятое значение начального тока срабатывания дифференциальной защиты, $I_{\text{Д.0}} = 1,3$; $k_{\text{Т}}$ — принятое значение ко-

эffициента торможения, $k_T = 0,6$; $I_{\text{ТОРМ.РАСЧ}}$ — относительное значение тормозного тока, подводимого к защите при расчетном КЗ с учетом нагрузки, определенный по выражению (3.16), $I_{\text{ТОРМ.РАСЧ}} = 0,5(I_{\text{КЗ.МИН}} + I_{\text{НАГР}}) = 0,5 \cdot (12,22 + 4,05) = 8,13$; $I_{T.0}$ — принятое значение тока начала торможения, $I_{T.0} = 1,2$.

Значение коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$ должно быть не менее 2, тогда условие чувствительности выполняется.

Расчет тока срабатывания и определение коэффициента чувствительности реле чувствительного токового органа

Ток срабатывания реле ЧТО должен быть отстроен от тока небаланса при самозапуске электродвигателей нагрузки по выражению (3.17). Приняв значения $k_{\text{СЗП}} = 1,5$, $I_{\text{НЕОТКЛ.ПРИСОЕД}} = 1214 \text{ А}$, $K_{\text{ТТ}} = 1200/5$ и $I_{\text{БАЗ}} = 5 \text{ А}$, получим

$$I_{\text{СЗ.ЧТО}} \geq \frac{k_{\text{ОТС}} k_{\text{СЗП}} \mu I_{\text{НЕОТКЛ.ПРИСОЕД}}}{k_B K_{\text{ТТ}} I_{\text{БАЗ}}} = \frac{1,2 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 1214}{0,9 \cdot (1200/5) \cdot 5} = 0,2.$$

Принимаем минимальному значению уставки $I_{\text{СЗ.ЧТО}} = 0,2$.

Проверка чувствительности реле ЧТО производится при расчетном виде КЗ на шинах в режиме опробования по выражению (3.18). Определив по формуле (3.19) относительное значение минимального тока, протекающего через шины при опробовании их включением ВЛ1,

$$I_{\text{ОПР.ПРИСОЕД}} = \frac{I_{\text{КЗ.МИН}}}{K_{\text{ТТ}} I_{\text{БАЗ}}} = \frac{(\sqrt{3}/2) \cdot 895}{(1200/5) \cdot 5} = 0,64,$$

получим

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{ОПР.ПРИСОЕД}}}{I_{\text{СЗ.ЧТО}}} = \frac{0,64}{0,2} = 3,2.$$

Значение коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$ должно быть не менее 2, тогда условие чувствительности выполняется.

Расчет тока срабатывания реле контроля исправности цепей тока

Ток срабатывания реле контроля обрыва цепей переменного тока выбирается по условию отстройки от тока небаланса максимального рабочего (нагрузочного) режима по выражению (3.20)

$$I_{\text{ср.конт}} \geq \frac{k_{\text{отс}}(k_{\text{нб}} + \Delta f_{\text{выр}})I_{\text{нагр.макс}}}{K_{\text{тТ}} I_{\text{баз}}} = \\ = \frac{1,2 \cdot (0,02 + 0,02) \cdot 1274,7}{(1200 / 5) \cdot 5} = 0,05,$$

где $k_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{отс}} = 1,2$; $k_{\text{нб}}$ — коэффициент небаланса, $k_{\text{нб}} = 0,02$; $\Delta f_{\text{выр}}$ — полная относительная погрешность выравнивания, $\Delta f_{\text{выр}} = 0,02$; $I_{\text{нагр.макс}}$ — максимальный первичный ток нагрузки наиболее мощного присоединения АТГ1, $I_{\text{нагр.макс}} = 1214 \cdot 1,05 = 1274,7$ А; $K_{\text{тТ}}$ — коэффициент трансформации ТТ, $K_{\text{тТ}} = 1200/5$; $I_{\text{баз}}$ — базисный ток, $I_{\text{баз}} = 5$ А.

Определение времени запоминания срабатывания ДЗШ и времени ввода «очувствления»

Время запоминания срабатывания ДЗШ и время ввода «очувствления» определяются по выражению (3.21).

Время запоминания срабатывания ДЗШ

$$t_{\text{ЗС,ДЗШ}} = t_{\text{АПВ}} + t_{\text{ОТКЛ.В}} + t_{\text{ЗАП}} = 1,0 + 0,05 + 0,1 = 1,15 \text{ с},$$

где $t_{\text{АПВ}}$ — время цикла АПВ шин, $t_{\text{АПВ}} = 1$ с; $t_{\text{ОТКЛ.В}}$ — время отключения выключателя того присоединения, для которого рассматривается цикл АПВ, $t_{\text{ОТКЛ.В}} = 0,05$ с; $t_{\text{ЗАП}}$ — время запаса, $t_{\text{ЗАП}} = 0,1$ с.

Время ввода «очувствления»

$$t_{\text{ОЧ,ДЗШ}} = t_{\text{АПВ}} + t_{\text{ОТКЛ.В}} + t_{\text{ЗАП}} = 1,5 + 0,05 + 0,5 = 2,05 \text{ с},$$

где $t_{\text{ЗАП}}$ — время запаса, принимаемое равным 0,5 с.

Рассчитанные значения уставок защиты сборных шин 220 кВ на ПС А приведены ниже.

Наименование величин	Значения величин
Ток срабатывания ПО, о.е. (0,40–1,20 с шагом 0,01)	1,3
Ток начала торможения ПО, о.е. (1,00–2,00 с шагом 0,01)	1,2
Коэффициент торможения ПО (0,6–1,2 с шагом 0,1)	0,6
Ток срабатывания ИО1, о.е. (0,40–1,20 с шагом 0,01)	1,3
Ток начала торможения ИО1, о.е. (1,00–2,00 с шагом 0,01)	1,2
Коэффициент торможения ИО1 (0,6–1,2 с шагом 0,1)	0,6
Ток срабатывания ИО2, о.е. (0,40–1,20 с шагом 0,01)	1,3
Ток начала торможения ИО2, о.е. (1,00–2,00 с шагом 0,01)	1,2
Коэффициент торможения ИО2 (0,6–1,2 с шагом 0,1)	0,6
Ток срабатывания реле ЧТО, о.е. (0,20–1,00 с шагом 0,01)	0,2
Ток срабатывания реле контроля обрыва цепей тока ПО, о.е. (0,04–0,20 с шагом 0,01)	0,05
Ток срабатывания реле контроля обрыва цепей тока ИО1, о.е. (0,04–0,20 с шагом 0,01)	0,05
Ток срабатывания реле контроля обрыва цепей тока ИО2, о.е. (0,04–0,20 с шагом 0,01)	0,05
Время запоминания срабатывания ДЗШ, с, (0,05–27,0 с шагом 0,01)	1,15
Время ввода «очувствления» ДЗШ, с, (0,05–27,00 с шагом 0,01)	2,05
Блокировка ДЗШ при обрыве ИО1 (не предусмотрена/предусмотрена) <i>XB19</i>	Предусмотрена
Блокировка ДЗШ при обрыве ИО2 (не предусмотрена/предусмотрена) <i>XB20</i>	Предусмотрена

3.2. Дифференциальная защита сборных шин без торможения на базе шкафа типа ШЭ2607 062

3.2.1. Общая характеристика шкафа ШЭ2607 062

Шкаф дифференциальной токовой защиты типа ШЭ2607 062 предназначен для защиты шин напряжением 110—220 кВ с фиксированным присоединением элементов. При этом число защищаемых присоединений не должно быть более тринадцати.

Шкаф типа ШЭ2607 062 выполнен с использованием одного терминала типа БЭ2704V062. Терминал БЭ2704V062 содержит:

- реле дифференциальной защиты шин (ДЗШ) без торможения от всех видов КЗ в трехфазном исполнении, состоящее из пускового органа (ПО), избирательных органов первой (ИО1) и второй (ИО2) систем шин;
- трехфазное реле чувствительного токового органа (ЧТО);
- реле минимального напряжения и реле максимального напряжения, реагирующих на напряжения обратной последовательности;
- трехфазное реле контроля исправности токовых цепей пускового органа;
- логику опробования СШ, пуска УРОВ и запрета АПВ.

Кроме функций защиты и автоматики, программное обеспечение терминала реализует ряд дополнительных функций, характерных для всех терминалов серии БЭ2704.

В терминале предусмотрена местная сигнализация о действии защит и устройств, выполненная на светодиодных индикаторах.

На рис. 3.7 показаны сборные шины подстанции, выполненные по схеме «Две рабочие секционированные системы шин с обходной», имеющие максимальное по числу входов терминалов БЭ2704V062 количество присоединений. Схема содер-

жит шиносоединительный выключатель $Q1$, два секционных выключателя $Q3$ и $Q4$, обходной выключатель $Q5$, а также восемь присоединений с выключателями $Q6-Q13$.

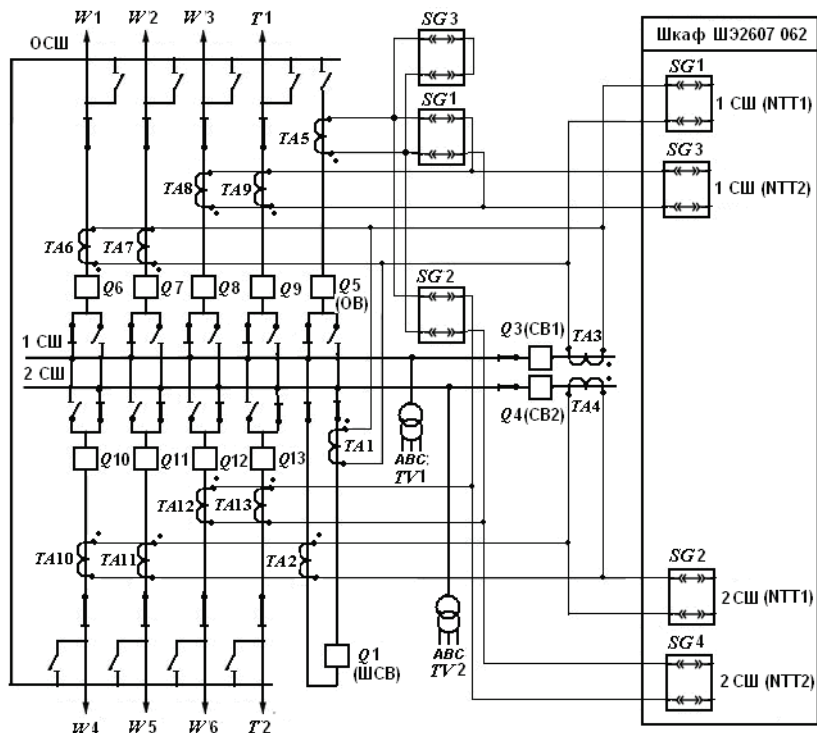


Рис. 3.7. Расположение ТТ для дифференциальной защиты сборных шин и их подключение к испытательным блокам шкафа ШЭ2607 062

Фиксация соединений сборных шин произведена следующим образом:

- линии $W1, W2, W3$ и трансформатор $T1$ зафиксированы за 1 СШ;
- линии $W4, W5, W6$ и трансформатор $T2$ зафиксированы за 2 СШ.

ДЗШ имеет четыре входа для подключения к четырем трехфазным группам трансформаторов тока. В шкафу защиты предусмотрено выравнивание различий коэффициентов трансформации ТТ присоединений. Выравнивание производится для следующих рядов коэффициентов трансформации высоковольтных трансформаторов тока на номинальные вторичные токи 1 и 5 А соответственно:

4000/1, 3000/1, 2000/1, 1500/1, 1200/1, 1000/1, 750/1, 600/1, 500/1;
2000/5, 1500/5, 1200/5, 1000/5, 750/5, 600/5, 500/5, 400/5.

3.2.2. Устройство и работа дифференциальной защиты шин шкафа ШЭ2607 062

Подключение шкафа ШЭ2607 062 к измерительным ТТ и ТН защищаемой системы сборных шин

Шкаф ШЭ2607 062 имеет возможность подключения к двум группам главных ТТ с разными коэффициентами трансформации для каждой системы шин.

Показанная на рис. 3.7 привязка присоединений по системам шин и коэффициентам трансформации ТТ выполнена условно и соответствует:

1 СШ ($K_{ТТ1}$) — Q1, Q3, Q6, Q7; 1 СШ ($K_{ТТ2}$) — Q5, Q8, Q9;

2 СШ ($K_{ТТ1}$) — Q1, Q4, Q10, Q11; 2 СШ ($K_{ТТ2}$) — Q5, Q12, Q13.

Трансформатор тока ОВ подключается через испытательный блок SG1 к группе трансформаторов тока 1 СШ при фиксации ОВ за 1 СШ, через испытательный блок SG2 — при фиксации ОВ за 2 СШ, через блок SG3 — при выводе ОВ.

Схема подключения шкафа ШЭ2607 062 к измерительным ТТ и ТН защищаемой системы сборных шин приведена на рис. 3.8.

Терминал БЭ2704V062 имеет 13 аналоговых входов для подключения цепей переменного тока и 6 аналоговых входов для подключения цепей переменного напряжения через промежу-

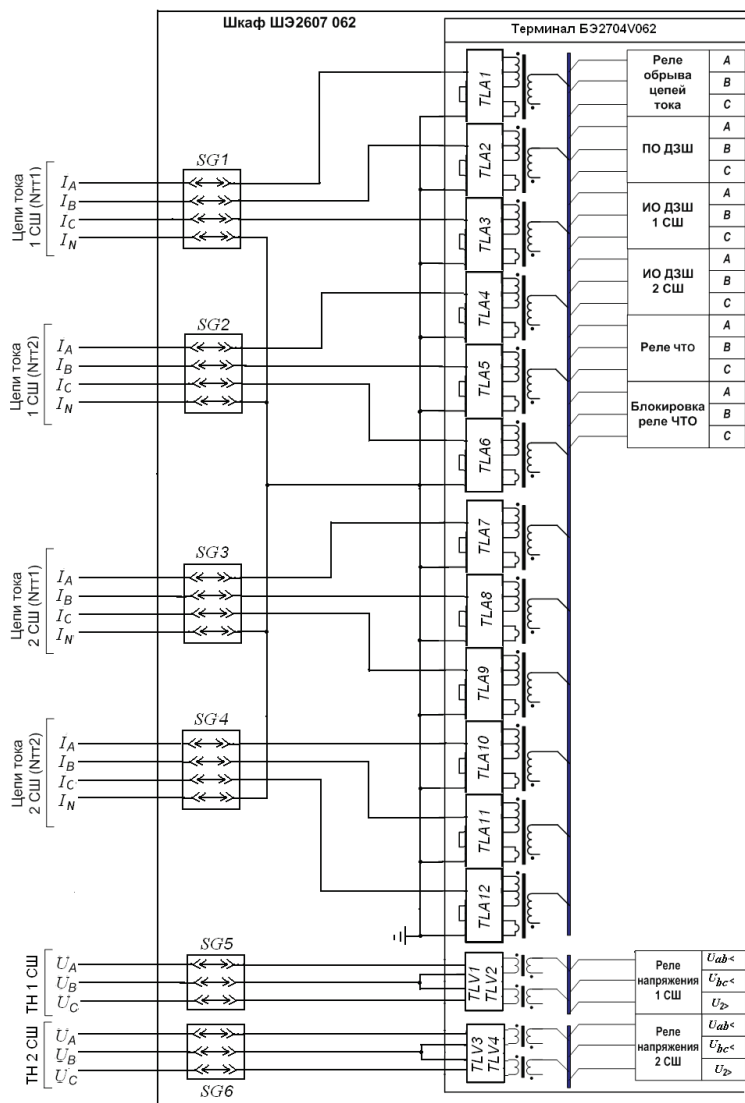


Рис. 3.8. Схема подключения шкафа ШЭ2607 062 к измерительным ТТ и ТН

точные трансформаторы тока $TLA1-TLA13$ и трансформаторов напряжения $TLV1-TLV4$.

На токовые входы терминала подаются фазные токи всех присоединений защищаемых шин. Через испытательный блок $SG1$ заводятся фазные токи I_A, I_B, I_C от главных ТТ 1 СШ с коэффициентом трансформации $K_{ТТ1}$, через блок $SG3$ — от главных ТТ 2 СШ с коэффициентом трансформации $K_{ТТ2}$, через блок $SG2$ — от главных ТТ 1 СШ с коэффициентом трансформации $K_{ТТ1}$, через блок $SG4$ — от главных ТТ 2 СШ с коэффициентом трансформации $K_{ТТ2}$.

Фазные токи используются для реализации алгоритма реле ДЗШ-ПО, ДЗШ-ИО1 и ДЗШ-ИО2, реле ЧТО, реле контроля исправности токовых цепей пускового и избирательных органов.

От трансформаторов напряжения $TV1$ и $TV2$, установленных на первой и второй системах СШ соответственно, через испытательные блоки $SG5, SG6$ к терминалу подводятся два междофазных напряжения U_{AB} и U_{BC} (от каждой системы шин). Данные напряжения используются для реализации алгоритмов реле напряжения $U_{МФ} < U_2$ и $U_2 >$.

Принцип выполнения и работа ДЗШ шкафа ШЗ2607 062

Защита содержит пусковые органы, действующие при КЗ на любой из систем шин, а также избирательные органы первой и второй систем шин, определяющие поврежденную систему шин. Сигнал на отключение поврежденной системы шин появляется только при срабатывании пускового и избирательного органов поврежденной фазы или нескольких фаз.

Пусковые органы подключены к группам основных ТТ всех присоединений обеих систем шин, за исключением ШСв.

Избирательные органы первой и второй систем шин с помощью промежуточных ТТ подключены к группам основных ТТ присоединений соответственно первой и второй систем шин (включая трансформаторы тока ШСв).

ДЗШ состоит из реле тока, включенного на дифференциальный ток и блокирующего реле, которые включены по логической схеме «И». Реле тока задает уставку по току срабатывания, а блокирующее реле обеспечивает отстройку от токов небаланса, возникающих при внешних КЗ.

Для надежного отключения выключателей при неуспешном АПВ систем шин в защите предусмотрен чувствительный токовый орган, включенный на дифференциальный ток пускового органа и имеющий большую чувствительность по сравнению с пусковыми и избирательными реле ДЗШ. Он состоит из реле тока ЧТО, включенного на дифференциальный ток пускового органа, и блокирующего реле, которые включены по логической схеме «И». Реле ЧТО задает уставку по току срабатывания, а блокирующее реле обеспечивает отстройку от токов небаланса при бросках тока намагничивания, которые возникают при включении силовых трансформаторов, подключенных к шинам.

Шкаф защиты содержит реле контроля исправности цепей переменного тока ДЗШ, контролирующие фазные дифференциальные токи пускового органа. Реле контроля с выдержкой времени действуют на сигнал и на блокировку ДЗШ с самодерживанием и ручным возвратом.

В табл. 3.6 приведены наименования и назначения элементов задержки в функциональной схеме логической части ДЗШ.

Таблица 3.6

Наименование и назначение элементов задержки ДЗШ и ЧТО

Наименование	Назначение	Диапазон, с
DT3	Время ввода «очувствления» 1 СШ	1,0–27,0
DT4	Время ввода «очувствления» 2 СШ	1,0–27,0
DT15	Задержка на срабатывание реле ЧТО фазы А	0,02
DT16	Задержка на срабатывание реле ЧТО фазы В	0,02
DT17	Задержка на срабатывание реле ЧТО фазы С	0,02

На рис. 3.9 показана функциональная схема логической части ДЗШ без торможения, на рис. 3.10 — логической части ЧТО и узла контроля обрыва цепей тока.

Работа логической части ДЗШ

При возникновении короткого замыкания на первой системе шин срабатывают реле ДЗШ ПО и реле ДЗШ ИО1 поврежденных фаз. Сигналы с выходов элементов ИЛИ (1) и ИЛИ (4) подаются на входы элемента И (6), при отсутствии сигналов на запрещающем входе элемента ЗАПРЕТ (2) — от устройства контроля исправности токовых цепей и на запрещающем входе элемента ЗАПРЕТ (3) — от узла опробования. Сигнал с выхода элемента И (6) через элементы ИЛИ (8) и ИЛИ (12) вызывает срабатывание выходных реле 1 СШ, осуществляющих отключение выключателей присоединений, подключенных к первой системе шин, а также пуск УРОВ и запрет АПВ СВ1, ШСВ и ОВ (если ОВ подключен к 1 СШ). Одновременно через логические элементы И (16), (17) и (18) обеспечивается пофазная сигнализация о срабатывании ДЗШ на отключение присоединений 1 СШ.

Аналогично описанному выше при возникновении короткого замыкания на второй системе шин в результате срабатывания реле ДЗШ ПО и реле ДЗШ ИО2 поврежденных фаз через элементы И (7), ИЛИ (9) и ИЛИ (13) осуществляется отключение выключателей присоединений, подключенных ко второй системе шин, а также пуск УРОВ и запрет АПВ СВ2, ШСВ и ОВ (если ОВ подключен ко 2 СШ). Одновременно с этим через логические элементы И (19), (20) и (21) обеспечивается сигнализация о срабатывании ДЗШ на отключение присоединений 2 СШ.

При нарушении фиксации присоединений (переключении какого-либо присоединения с одной СШ на другую) ключ «Нарушение фиксации» на двери шкафа защиты устанавливается

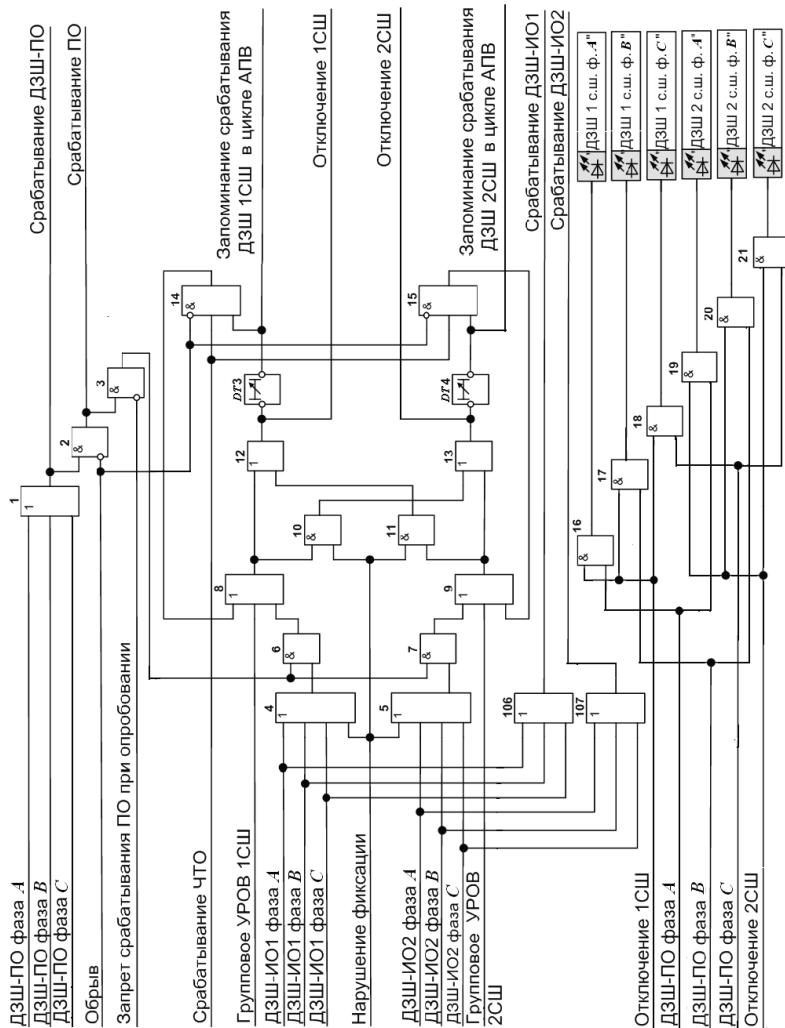


Рис. 3.9. Функциональная схема логической части ДЗШ без торможения

в положение «Работа». В результате этого сигналы единичного уровня через логические элементы ИЛИ (4) и ИЛИ (5) постоянно подаются на вторые входы элементов И (6) и И (7), шунтируя цепи действия избирательных реле ДЗШ ИО1 и ДЗШ ИО2.

Если в режиме нарушения фиксации произойдет КЗ на какой-либо системе СШ, то при срабатывании реле ДЗШ ПО, независимо от состояния избирательных реле, через элементы ИЛИ (12) и ИЛИ (13) будет производиться отключение выключателей присоединений обеих систем шин.

Действие ДЗШ на отключение при опробывании любой системы СШ блокируется путем подачи сигнала «Запрет срабатывания ПО при опробывании» на инверсный вход элемента ЗАПРЕТ (3).

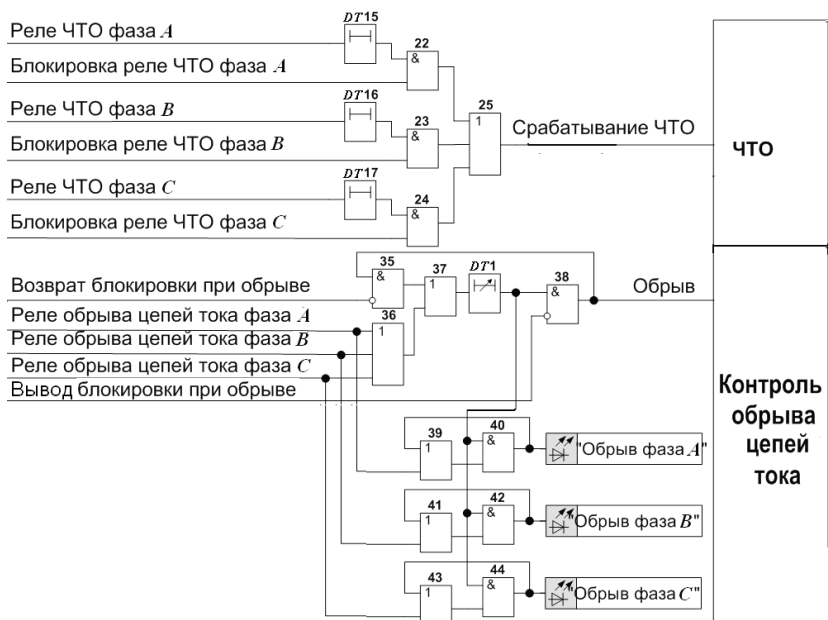


Рис. 3.10. Функциональная схема логической части ЧТО и узла контроля обрыва цепей тока ДЗШ

Для повышения чувствительности защиты в режиме АПВ сборных шин благодаря срабатыванию реле ЧТО используется режим «Очувствление ДЗШ». Для его выполнения в логической схеме ДЗШ с помощью элементов выдержки на возврат *DT3* или *DT4* фиксируется срабатывание защиты на отключение.

Сигнал с выхода элемента *DT3* (*DT4*) поступает на вход элемента ЗАПРЕТ (14), выходной сигнал которого при сработавшем состоянии реле ЧТО шунтирует сигнал ПО и ИО1 (ИО2) на элементе ИЛИ (8). Далее через элемент ИЛИ (12) и выходные реле 1 СШ защита действует на отключение выключателей присоединений, подключенных к первой системе шин.

Сигнал с выхода элемента *DT4* поступает на вход элемента ЗАПРЕТ (15), выходной сигнал которого при сработавшем состоянии реле ЧТО шунтирует сигнал ПО и ИО2 на элементе ИЛИ (9). Далее через элемент ИЛИ (13) и выходные реле 2 СШ защита действует на отключение выключателей присоединений, подключенных ко второй системе шин.

После возврата реле ЧТО, цепи обратной связи с выходов элементов ЗАПРЕТ (14) и ЗАПРЕТ (15) на входы элементов ИЛИ (8) и ИЛИ (9) соответственно разбираются. В результате этого защита надежно действует на отключение того присоединения системы СШ, от которого производилось ее опробование.

Фиксация сигналов о работе ДЗШ на отключение при успешном АПВ шин снимается после истечения времени их запоминания.

Действие реле ЧТО (см. рис. 3.10) осуществляется пофазно через элементы задержки *DT15*, *DT16*, *DT17* и элементы ЗАПРЕТ (22), ЗАПРЕТ (23), ЗАПРЕТ (24) соответственно и элемент ИЛИ (25). Оно может быть заблокировано путем подачи сигнала «Блокировка реле ЧТО» на инверсные входы элементов ЗАПРЕТ (22), ЗАПРЕТ (23) и ЗАПРЕТ (24).

Работа узла контроля обрыва цепей тока

Для выявления неисправностей в цепях тока ДЗШ предусмотрено трехфазное реле контроля исправности токовых цепей, представляющее собой чувствительное токовое реле, включенное в цепи дифференциального тока ПО (см. рис. 3.10).

При появлении сигнала на выходе реле контроля исправности токовых цепей какой-либо фазы через логические элементы ИЛИ (36) и ИЛИ (37), сигнал поступает на вход элемента задержки $DT1$. После набора выдержки времени $DT1$ и при отсутствии сигнала «Вывод блокировки при обрыве» на инверсном входе элемента ЗАПРЕТ (38) сигнал с выхода последнего подается на инверсный вход элемента ЗАПРЕТ (2) (см. рис. 3.9) для осуществления блокировки работы ДЗШ при обрыве. Одновременно производится самоудерживание команды обрыва путем подачи сигнала с выхода элемента ЗАПРЕТ (38) по цепи обратной связи на вход элемента ЗАПРЕТ (35).

Возврат схемы блокировка ДЗШ при обрыве осуществляется подачей сигнала «Возврат блокировки при обрыве» на инверсный вход элемента ЗАПРЕТ (35). При необходимости блокирующее действие может быть исключено установкой ключа «Блокировка ДЗШ при обрыве цепей тока» в положение «Вывод». В этом случае единичный сигнал поступает на инверсный вход элемента ЗАПРЕТ (38), в результате чего блокировка зашита при обрыве цепей тока выводится из работы.

В схеме узла контроль обрыва цепей тока предусмотрена пофазная светодиодная сигнализация о срабатывании реле контроля обрыва цепей тока «Обрыв фаза А», «Обрыв фаза В», «Обрыв фаза С». Для этого сигналы с выходов реле контроля исправности токовых цепей соответствующих фаз через логические элементы ИЛИ (39), ИЛИ (41), ИЛИ (43) и логические элементы И (40), И (42), И (44) при наличии сигнала на выходе элемента задержки $DT1$ подаются на входы устройств светодиодной сигнализации.

3.2.3. Расчет параметров дифференциальной защиты без торможения сборных шин напряжением 110–220 кВ

Расчет базисных токов и выравнивание токов групп присоединений

Для выравнивания вторичных токов от ТТ различных групп присоединений СШ рассчитываются базисные токи терминала БЭ2704V062 аналогично тому, как это делается для терминала БЭ2704V061.

Значения базисных токов по группам присоединений СШ задаются в меню «Общая логика».

Для терминала БЭ2704V062 диапазон базисных токов составляет 1,000–16,000 с шагом 0,001 А. Входные ТТ имеют число витков первичной обмотки $W_1 = 16$ с отводами от первого и четвертого витка для выравнивания токов.

По значениям базисных токов групп ТТ производится выбор числа витков первичных обмоток входных ТТ терминала.

Методика расчета параметров дифференциальной защиты без торможения сборных шин напряжением 110–220 кВ

Ток срабатывания ПО ДЗШ

Ток срабатывания ПО ДЗШ выбирается из следующих условий:

- по отстройке от максимального тока в защите при разрыве ее вторичных цепей в рабочем нагрузочном режиме по выражению (3.2);
- по отстройке от максимального тока небаланса при переходном режиме внешнего КЗ

$$I_{\text{Д.О}} \geq k_{\text{ОТС}} I_{\text{НБ.РАСЧ}}, \quad (3.22)$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{ОТС}} = 1,5$; $I_{\text{НБ.РАСЧ}}$ — тока небаланса в переходном режиме внешнего КЗ

$$I_{\text{НБ.РАСЧ}} = (k_{\text{ОДН}} k_{\text{ПЕР}} \varepsilon + \Delta f_{\text{ВЫР}} + \Delta f_{\text{ПТТ}}) \frac{I_{\text{КЗ ВНЕШ.МАКС}}}{K_{\text{ТТ}} I_{\text{БАЗ}}}. \quad (3.23)$$

Здесь $k_{\text{ОДН}}$ — коэффициент однотипности, $k_{\text{ОДН}} = 1,0$; $k_{\text{ПЕР}}$ — коэффициент, учитывающий переходный режим, $k_{\text{ПЕР}} = 2,0$; ε — полная относительная погрешность основных ТТ, $\varepsilon = 0,1$; $\Delta f_{\text{ВЫР}}$ — полная относительная погрешность выравнивания, $\Delta f_{\text{ВЫР}} = 0,02$; $\Delta f_{\text{ПТТ}}$ — полная относительная погрешность промежуточных ТТ, которые устанавливаются, если значение $I_{\text{БАЗ}}$ выходит из допустимого диапазона: $\Delta f_{\text{ПТТ}} = 0,05$ при наличии ПТТ и $\Delta f_{\text{ПТТ}} = 0$ при их отсутствии; $I_{\text{КЗ ВНЕШ.МАКС}}$ — максимальное значение тока в переходном режиме внешнего КЗ; $K_{\text{ТТ}}$ и $I_{\text{БАЗ}}$ — коэффициент трансформации ТТ и базисный ток группы ТТ с наибольшим коэффициентом трансформации.

Выбирается наибольшее значение из двух рассчитанных по выражениям (3.2) и (3.22).

Ток срабатывания ИО1 (ИО2) ДЗШ

Ток срабатывания ИО1 (ИО2) должен быть больше максимального тока небаланса при переходном режиме внешнего КЗ на другой системе шин и может быть определен так же, как для ПО ДЗШ. При этом значение $I_{\text{КЗ ВНЕШ.МАКС}}$ — максимальное значение периодической составляющей тока КЗ, проходящего по ТТ, установленному в цепи ШСВ при повреждении на другой системе шин.

Рекомендуется значение уставки «Ток срабатывания ИО1 (ИО2)» рассчитывать по выражению

$$I_{\text{СР.ИО}} = 0,7 I_{\text{СР.ПО}}. \quad (3.24)$$

Проверка чувствительности ДЗШ

Определение коэффициента чувствительности ДЗШ производится при расчетном виде КЗ на шинах в расчетных по чувствительности режимах работы подстанции и питающей системы по выражению

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ.мин}}}{I_{\text{ПО}}}, \quad (3.25)$$

где $I_{\text{КЗ.мин}}$ — относительное минимальное значение периодической составляющей полного фазного тока рассматриваемого вида КЗ на шинах, приведенное к базисному току по выражению

$$I_{\text{КЗ.мин}} = \frac{I_{\text{КЗ.мин.п}}}{K_{\text{ТТ}} I_{\text{БАЗ}}}. \quad (3.26)$$

Здесь $I_{\text{КЗ.мин.п}}$ — минимальное первичное значение периодической составляющей полного фазного тока КЗ на шинах; $K_{\text{ТТ}}$ — принятое значение коэффициента трансформации группы ТТ с наибольшим коэффициентом трансформации; $I_{\text{ПО}}$ — принятое значение тока срабатывания ПО ДЗШ.

Значение коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$ должно быть не менее 2.

Расчет тока срабатывания реле чувствительного токового органа

Ток срабатывания реле ЧТО определяется по выражению (3.17), а значение коэффициента чувствительности должно определяться при расчетном виде КЗ на шинах в режиме их опробования по выражениям (3.18) и (3.19).

Значение коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$ должно быть не менее 2.

Расчет тока срабатывания реле контроля исправности цепей тока

Ток срабатывания реле контроля обрыва цепей переменного тока определяется по выражению (3.20).

Определение времени запоминания срабатывания ДЗШ и времени ввода «очувствления»

В шкафу защиты шин ШЭ2607 062 предусмотрено автоматическое повышение чувствительности ДЗШ при АПВ шин аналогично тому, как это делается для терминала ШЭ2607V062. При этом время запоминания срабатывания ($t_{зс. дзш}$) и время ввода «очувствления» ($t_{оч. дзш}$) ДЗШ определяются по выражению (3.21).

Пример расчета параметров дифференциальной защиты без торможения сборных шин напряжением 110 кВ

В примере выполнен расчет защиты сборных шин РУ напряжением 110 кВ ПС 1, расположенной в сети, схема которой приведена на рис. 1.5 (см. с. 36).

Упрощенная схема распределительного устройства напряжением 110 кВ подстанции ПС 1 500/220/110 кВ показана на рис. 3.11. Сборные шины выполненные по схеме «Две рабочие системы шин».

К сборным шинам 110 кВ подстанции подключены:

- два трехфазных автотрансформатора АТ1 и АТ2 напряжением 220/110 кВ и мощностью по 125 МВ·А каждый;
- четыре транзитные воздушные линии ВЛ1, ВЛ2, ВЛ3 и ВЛ4 напряжением 110 кВ.

Фиксация присоединений сборных шин произведена следующим образом:

- автотрансформатор АТ1, линии ВЛ1 и ВЛ3 зафиксированы за 1 СШ;

- автотрансформатор АТ2, линии ВЛ2 и ВЛ4 зафиксированы за 2 СШ.

На всех присоединениях сборных шин напряжением 110 кВ установлены элегазовые выключатели с временем отключения 0,05 с.

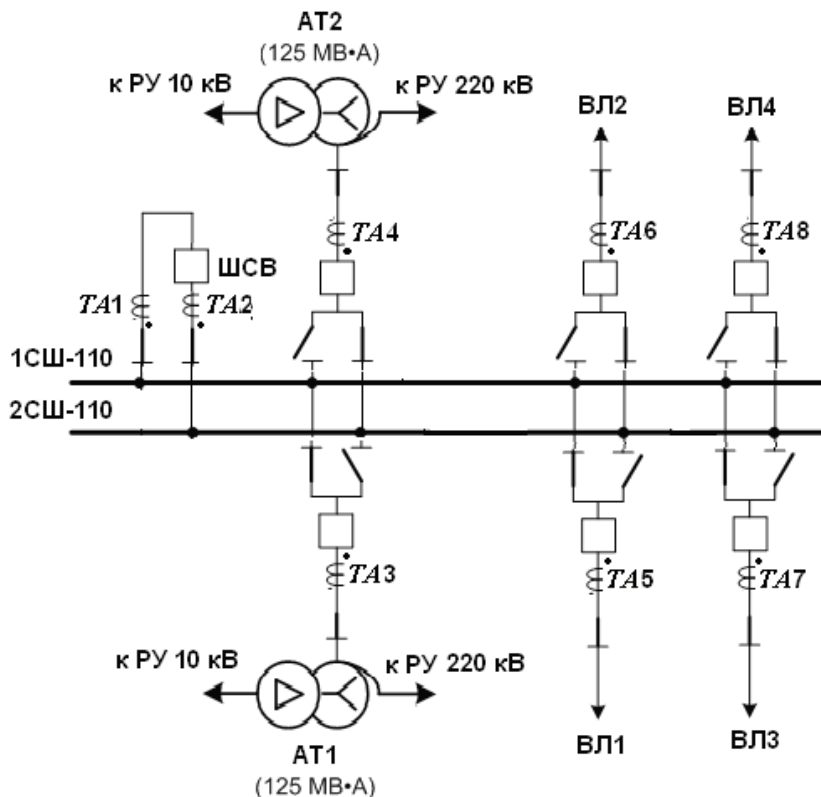


Рис. 3.11. Упрощенная схема РУ 110 кВ подстанции ПС 1

Первичные рабочие токи нагрузки и коэффициенты трансформации трансформаторов тока присоединений сборных шин напряжением 220 кВ приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Рабочие токи нагрузки и $K_{\text{ТТ}}$ присоединений сборных шин 110 кВ

Параметр	АТ1	АТ22	ВЛ1	ВЛ2	ВЛ3	ВЛ 4
$I_{\text{РАБ. НАГР}}, \text{А}$	600	600	250	250	350	350
$K_{\text{ТТ}}$	1000/5	1000/5	600/5	600/5	600/5	600/5

Токи трехфазных КЗ в различных режимах работы оборудования в РУ-110 ПС 1 приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Токи трехфазных КЗ в различных режимах работы на шинах 110 кВ

Режим	Токи трехфазных КЗ ($I^{(3)}$) на шинах 110 кВ, А					
	АТ1	АТ22	ВЛ1	ВЛ2	ВЛ3	ВЛ 4
Все включено	1236	1236	787	787	395	395
Отключен АТ2	1370	—	788	788	395	395
Режим опробования	798	798	938	938	487	487

Суммарный ток при КЗ на шинах в максимальном режиме $I^{(3)} = 4836 \text{ А}$.

Суммарный ток при КЗ на шинах в минимальном режиме $I^{(3)} = 3736 \text{ А}$.

Защита СШ выполнена с помощью шкафа ШЭ2607 062 в виде дифференциальной защиты шин без торможения с числом присоединений равным 8.

Параметрирование терминала

Разбивка ТТ и присоединений на группы выполнена следующим образом:

- первая система шин —
 - первая группа (ТТ11) ТА1 (ШСВ) и ТА3 (АТ1) с $K_{\text{ТТ}11} = 1000/5$;
 - вторая группа (ТТ12) ТА5 (ВЛ1) и ТА7 (ВЛ3) с $K_{\text{ТТ}12} = 600/5$;

- вторая система шин —
 - первая группа (ТТ21) ТА2 (ШСВ) и ТА4 (АТ2) с $K_{ТТ21} = 1000/5$;
 - вторая группа (ТТ22) ТА6 (ВЛ2) и ТА8 (ВЛ4) с $K_{ТТ22} = 600/5$.

Расчет базисных токов групп присоединений производится в следующей последовательности:

- группы главных ТТ присоединений СШ, показанных на рис. 3.11, располагаем в порядке уменьшения их коэффициентов трансформации — ТТ11 ($K_{ТТ11}$), ТТ21 ($K_{ТТ21}$), ТТ21 ($K_{ТТ12}$), ТТ22 ($K_{ТТ22}$);
- при $I_{2\text{НОМ}} = 5$ А базисные токи присоединений с наибольшими коэффициентами трансформации ТТ принимаем равными 5 А, $I_{\text{БАЗ.ТТ11}} = I_{\text{БАЗ.ТТ21}} = 5$ А;
- базисные токи присоединений с меньшими коэффициентами трансформации ТТ определяем с помощью выражения (3.1).

$$I_{\text{БАЗ.ТТ12}} = I_{\text{БАЗ.ТТ22}} = I_{\text{БАЗ.ТТ11}} \frac{K_{ТТ11}}{K_{ТТ12}} = 5 \cdot \frac{1000/5}{600/5} = 8,333 \text{ А.}$$

Рассчитанные значения базисных токов принадлежат диапазону изменения базисных токов, который составляет для пятиамперного исполнения ТТ 1,000–16,000 А.

Установки промежуточных ТТ не требуется.

Рассчитанные значения базисных токов присоединений сборных шин напряжением 220 кВ на ПС 1 приведены в табл. 3.9 «Общая логика».

Таблица 3.9

Меню «Общая логика»

Наименование величины	Обозначение величины	Диапазон изменения, А	Значение величины, А
Базисный ток группы ТТ11 I СШ с $K_{ТТ1}$	$I_{\text{БАЗ.ТТ11}}$	1,000–16,000	5
Базисный ток группы ТТ12 I СШ с $K_{ТТ2}$	$I_{\text{БАЗ.ТТ12}}$	1,000–16,000	8,333

Окончание табл. 3.9

Наименование величины	Обозначение величины	Диапазон изменения, А	Значение величины, А
Базисный ток группы ТТ21 2 СШ с $K_{ТТ1}$	$I_{БАЗ.ТТ21}$	1,000–16,000	5
Базисный ток группы ТТ22 2 СШ с $K_{ТТ2}$	$I_{БАЗ.ТТ22}$	1,000–16,000	8,333

Выбор и расчет параметров ДЗШ без торможения

Ток срабатывания ПО ДЗШ

Ток срабатывания ПО ДЗШ выбирается из двух условий:

- по отстройке от максимального тока в защите при разрыве ее вторичных цепей в рабочем режиме производится по выражению (3.2)

$$I_{Д.0} \geq \frac{k_{ОТС} I_{РАБ.МАКС}}{K_{ТТ} I_{БАЗ}} = \frac{1,3 \cdot 600}{(1200/5) \cdot 5,0} = 0,65,$$

где $I_{РАБ.МАКС}$ — первичный ток нагрузки наиболее нагруженного присоединения (АТ1 или АТ2), $I_{РАБ.МАКС} = 600$ А;

- по отстройке от расчетного первичного тока небаланса в режиме, соответствующем началу торможения, производится по выражениям (3.22) и (3.23)

$$I_{Д.0} \geq k_{ОТС} I_{НБ.ТОРМ.НАЧ} = 1,5 \cdot 0,977 = 1,47;$$

$$I_{НБ.РАСЧ} = (k_{ОДН} k_{ПЕР} \varepsilon + \Delta f_{ВЫР} + \Delta f_{ПТТ}) \frac{I_{КЗ.ВНЕШ.МАКС}}{K_{ТТ} I_{БАЗ}} =$$

$$= (1,0 \cdot 2,0 \cdot 0,1 + 0,02 + 0) \cdot \frac{4441}{1000/5 \cdot 5} = 0,977,$$

где $k_{ПЕР}$ — коэффициент, учитывающий переходный режим КЗ, $k_{ПЕР} = 1,5$; $I_{КЗ.ВНЕШ.МАКС} = I_{КЗ.МАКС.Σ} - I_{КЗ.ВЛЗ} = 4836 - 395 = 4441$ А.

Принимаем ток срабатывания ПО $I_{Д.0} = 1,47$ о.е.

Ток срабатывания ИО1 (ИО2) ДЗШ

Ток срабатывания ИО1 (ИО2), рассчитанный по выражению (3.24),

$$I_{\text{ср.ио}} = 0,7 I_{\text{ср.по}} = 0,7 \cdot 1,47 = 1,03.$$

Проверка чувствительности ДЗШ

Проверка чувствительности ДЗШ производится при расчетном виде КЗ на шинах в расчетных по чувствительности режимах работы подстанции и питающей системы по выражению (3.25)

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз.мин}}}{I_{\text{д.0}}} = \frac{3,23}{1,47} = 2,19,$$

где $I_{\text{кз.мин}}$ — относительное минимальное значение периодической составляющей полного фазного тока рассматриваемого вида КЗ на шинах, приведенное к базисному току по выражению (3.26),

$$I_{\text{кз.мин}} = \frac{I_{\text{кз.мин.п}}}{K_{\text{тТ}} I_{\text{баз}}} = \frac{(\sqrt{3}/2) \cdot 3736}{(1000/5) \cdot 5} = 3,23.$$

Здесь $I_{\text{кз.мин.п}}$ — первичное минимальное значение периодической составляющей полного фазного тока при двухфазном КЗ на шинах в ремонтном режиме.

$K_{\text{тТ}}$ — коэффициент трансформации ТТ, $K_{\text{тТ}} = 1000/5$; $I_{\text{баз}}$ — базисный ток, $I_{\text{баз}} = 5$ А.

$I_{\text{д.0}}$ — принятое значение тока срабатывания ПО дифференциальной защиты, $I_{\text{д.0}} = 1,47$.

Значение коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$ должно быть не менее 2, в таком случае условие чувствительности выполняется.

Расчет тока срабатывания и определение коэффициента чувствительности реле чувствительного токового органа

Ток срабатывания реле ЧТО, отстроенный от тока небаланса при самозапуске электродвигателей нагрузки по выражению (3.17),

$$I_{\text{сз.что}} \geq \frac{k_{\text{отс}} k_{\text{сзп}} \varepsilon I_{\text{неоткл.присоед}}}{k_{\text{б}} K_{\text{тт}} I_{\text{баз}}} = \frac{1,2 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 500}{0,9 \cdot 600 / 5} = 0,16,$$

где $k_{\text{сзп}}$ — коэффициент самозапуска электродвигателей, $k_{\text{сзп}} = 1,5$; $I_{\text{неоткл.присоед}}$ — первичный максимальный ток неотключенных присоединений, равный 500 А для ВЛ1 и ВЛ2; $K_{\text{тт}}$ — коэффициент трансформации ТТ неотключенного присоединения, $K_{\text{тт}} = 600/5$; $I_{\text{баз}}$ — базисный ток неотключенного присоединения, $I_{\text{баз}} = 5$ А.

Принимаем минимальное значение уставки $I_{\text{сз.что}} = 0,2$.

Проверка чувствительности реле ЧТО должна производиться при расчетном виде КЗ на шинах в режиме опробования по выражению (3.18)

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{опроб.присоед}}}{I_{\text{сз.что}}} = \frac{0,69}{0,2} = 3,4,$$

где $I_{\text{опроб.присоед}}$ — относительное значение минимального тока, протекающего через шины при опробовании их включением АТ1, определяемое по выражению (3.19),

$$I_{\text{опроб.присоед}} = \frac{I_{\text{кз.мин}}}{K_{\text{тт}} I_{\text{баз}}} = \frac{(\sqrt{3}/2) \cdot 798}{(1000/5) \cdot 5} = 0,69.$$

Здесь $I_{\text{кз.мин}}$ — минимальное значение тока двухфазного КЗ на шинах при опробовании их включением; $I_{\text{сз.что}}$ — принятое значение параметра срабатывания ЧТО.

Значение коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$ должно быть не менее 2, тогда условие чувствительности выполняется.

Расчет тока срабатывания реле контроля исправности цепей тока

Ток срабатывания реле контроля обрыва цепей переменного тока, определенный по выражению (3.20),

$$I_{\text{СР.КОНТ}} \geq \frac{k_{\text{ОТС}}(k_{\text{НБ}} + \Delta f_{\text{ВЫР}})I_{\text{НАГР.МАКС}}}{K_{\text{ТТ}}I_{\text{БАЗ}}} =$$

$$= \frac{1,2 \cdot (0,02 + 0,02) \cdot 630}{(1000/5) \cdot 5} = 0,03,$$

где $k_{\text{ОТС}}$ — коэффициент отстройки, $k_{\text{ОТС}} = 1,2$; $k_{\text{НБ}}$ — коэффициент небаланса, $k_{\text{НБ}} = 0,02$; $\Delta f_{\text{ВЫР}}$ — полная относительная погрешность выравнивания, $\Delta f_{\text{ВЫР}} = 0,02$; $I_{\text{НАГР.МАКС}}$ — максимальный первичный ток нагрузки наиболее мощного присоединения АТ1, $I_{\text{НАГР.МАКС}} = 600 \cdot 1,05 = 630$ А; $K_{\text{ТТ}}$ — коэффициент трансформации ТТ, $K_{\text{ТТ}} = 1000/5$; $I_{\text{БАЗ}}$ — базисный ток, $I_{\text{БАЗ}} = 5$ А.

Принимаем наименьшее значение $I_{\text{СР.КОНТ}} = 0,04$.

Определение времени запоминания срабатывания ДЗШ и времени ввода «очувствления»

Время запоминания срабатывания ДЗШ и время ввода «очувствления» определяются по выражению (3.21).

Время запоминания срабатывания ДЗШ

$$t_{\text{ЗС.ДЗШ}} = t_{\text{АПВ}} + t_{\text{ОТКЛ.В}} + t_{\text{ЗАП}} = 1,0 + 0,05 + 0,1 = 1,15 \text{ с},$$

где $t_{\text{АПВ}}$ — время цикла АПВ шин, $t_{\text{АПВ}} = 1$ с; $t_{\text{ОТКЛ.В}}$ — время отключения выключателя того присоединения, для которого рассматривается цикл АПВ, $t_{\text{ОТКЛ.В}} = 0,05$ с; $t_{\text{ЗАП}}$ — время запаса, $t_{\text{ЗАП}} = 0,1$ с.

Время ввода «очувствления»

$$t_{\text{ОЧ.ДЗШ}} = t_{\text{АПВ}} + t_{\text{ОТКЛ.В}} + t_{\text{ЗАП}} = 1,5 + 0,05 + 0,5 = 2,05 \text{ с},$$

где $t_{\text{ЗАП}}$ — время запаса, принимаемое равным 0,5 с.

Рассчитанные значения уставок защиты сборных шин 220 кВ на ПС А приведены ниже. Уставки ДЗШ без торможения:

Наименование величин	Значения величин
Ток срабатывания ПО, о. е. (0,4–20,00 с шагом 0,01)	1,47
Ток срабатывания ИО1, о. е. (0,4–20,00 с шагом 0,01)	1,03
Ток срабатывания ИО2, о. е. (0,4–20,00 с шагом 0,01)	1,03
Ток срабатывания реле ЧТО, о. е. (0,20–1,00 с шагом 0,01)	0,2
Ток срабатывания реле контроля обрыва цепей тока ПО, о. е. (0,04–0,20 с шагом 0,01)	0,04
Ток срабатывания реле контроля обрыва цепей тока ИО1, о. е. (0,04–0,20 с шагом 0,01)	0,04
Ток срабатывания реле контроля обрыва цепей тока ИО2, о. е. (0,04–0,20 с шагом 0,01)	0,04
Время запоминания срабатывания ДЗШ, с (0,05–27,00 с шагом 0,01)	1,15
Время ввода «очувствления» ДЗШ, с (0,05–27,00 с шагом 0,01)	2,05

Использованный библиографический список

1. СТО 56947007-29.240.10.028—2009. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35—750 кВ. Москва : ФСК ЕЭС, 2009. 96 с.
2. СТО 56947007-29.120.70.032—2009. Методические указания по выбору параметров срабатывания дифференциально-фазной и высокочастотной микропроцессорных защит сетей 220 кВ и выше, устройств АПВ сетей 330 кВ и выше производства НПП «ЭКРА». Москва : ФСК ЕЭС, 2009. 85 с.
3. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 7. Дистанционная защита линий 35—330 кВ. Москва : Энергия, 1966. 172 с.
4. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 октября 2010 г. Москва : КНОРУС, 2010. 488 с.
5. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 12. Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110—500 кВ: расчеты. Москва : Энергия, 1980. 88 с.
6. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13 Б. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110—500 кВ: расчеты. Москва : Энергоатомиздат, 1985. 96 с.
7. СТО 56947007-29.120.70.099—2011. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования производства НПП «ЭКРА». Москва : ФСК ЕЭС, 2011. 216 с.

Оглавление

Введение	3
1. Защиты линий электропередачи напряжением 110—220 кВ.....	5
1.1. Типы и назначение защит, применяемых на линиях 110—220 кВ	5
1.2. Дифференциально-фазная высокочастотная защита на базе шкафа ШЭ2607 081	6
1.2.1. Общая характеристика шкафа ШЭ2607 081	6
1.2.2. Устройство и работа ДФЗ шкафа ШЭ2607 081	7
1.2.3. Расчет параметров дифференциально- фазной защиты ЛЭП	23
1.3. Резервные защиты ЛЭП на базе шкафа ШЭ2607 016	49
1.3.1. Общая характеристика шкафа ШЭ2607 016	49
1.3.2. Устройство и работа дистанционной защиты шкафа ШЭ2607 016	52
1.3.3. Расчет параметров дистанционной защиты ЛЭП.....	65
1.3.4. Устройство и работа токовых защит шкафа ШЭ2607 016	83
1.3.5. Расчет параметров токовой направленной защиты нулевой последовательности и трехфазной токовой отсечки	91

2. Защиты автотрансформатора напряжением 220/110/10 кВ	109
2.1. Типы и назначение защит, применяемых на автотрансформаторах напряжением 220/110/10 кВ	109
2.2. Защиты автотрансформатора напряжением 220/110/10 кВ и стороны низшего напряжения на базе шкафа ШЭ2607 042	110
2.2.1. Общая характеристика шкафа ШЭ2607 042	110
2.2.2. Устройство и работа защит автотрансформатора на базе шкафа ШЭ2607 042	113
2.2.3. Расчет параметров защит автотрансформатора напряжением 220/110/10 кВ шкафа ШЭ2607 042	123
2.3. Резервные защиты автотрансформатора на базе шкафа ШЭ2607 071	149
2.3.1. Общая характеристика шкафа ШЭ2607 071	149
2.3.2. Устройство и работа дистанционной защиты шкафа ШЭ2607 071	152
2.3.3. Расчет параметров дистанционной защиты АТ	165
2.3.4. Устройство и работа токовых защит шкафа ШЭ2607 071	177
2.3.4. Расчет параметров токовых защит АТ шкафа ШЭ2607 071	186
3. Защита сборных шин подстанций напряжением 110–220 кВ.....	209
3.1. Дифференциальная защита сборных шин с торможением на базе шкафа типа ШЭ2607 061	209

3.1.1. Общая характеристика шкафа ШЭ2607 061	209
3.1.2. Устройство и работа дифференциальной защиты шин шкафа ШЭ2607 061	212
3.1.3. Расчет параметров дифференциальной защиты с торможением сборных шин напряжением 110—220 кВ.....	221
3.2. Дифференциальная защита сборных шин без торможения на базе шкафа типа ШЭ2607 062	241
3.2.1. Общая характеристика шкафа ШЭ2607 062	241
3.2.2. Устройство и работа дифференциальной защиты шин шкафа ШЭ2607 062	243
3.2.3. Расчет параметров дифференциальной защиты без торможения сборных шин напряжением 110—220 кВ.....	252
Использованный библиографический список	264

Учебное издание

Федотов Владимир Павлович
Старосельников Сергей Сергеевич
Федотова Лидия Адамовна

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ЗАЩИТ
ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ
НАПЯЖЕНИЕМ 110–220 кВ**

Редактор И. В. Меркурьева
Верстка О. П. Игнатьевой

Подписано в печать 26.10.2017. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 15,6.
Уч.-изд. л. 10,5. Тираж 50 экз. Заказ 8

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>

