

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО  
«Сибирский федеральный университет»

институт

«Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

А.С. Торопов

подпись      инициалы, фамилия

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код – наименование направления

Расчет комплекса релейной защиты воздушной линии электропередачи  
ВЛ-110кВ С-405-0,3 питающей ПС 110/6,6/6,3 кВ ООО УК «Межегейуголь»

тема

Руководитель

доцент каф. ЭМиАТ, к.э.н. Н. В. Дулесова

подпись, дата      должность, ученая степень      инициалы, фамилия

Выпускник

Г. В. Гузов

подпись, дата

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

И.А. Кычакова

подпись, дата

инициалы, фамилия

Абакан 2023

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО  
«Сибирский федеральный университет»

институт

«Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ А.С. Торопов \_\_\_\_\_

подпись      инициалы, фамилия

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**в форме бакалаврской работы**

Студенту Гузову Григорию Владимировичу

(фамилия, имя, отчество)

Группа з-18 (ЗХЭн 18-01) Направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

(код)

(наименование)

Тема выпускной квалификационной работы Расчет комплекса релейной защиты воздушной линии электропередачи ВЛ-110 кВ С-405-0,3 питающей ПС 110/6,6/6,3 кВ ООО УК «Межегейуголь»

Утверждена приказом по институту № 287 от 17.05.2023 г.

Руководитель ВКР Н.В. Дулесова, доцент кафедры «ЭМиАТ»

(инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы)

Исходные данные для ВКР Нагрузки линии, однолинейные схемы, сведения об источниках питания.

Перечень разделов выпускной квалификационной работы:

Введение

1 Теоретическая часть

1.1 Общая характеристика подстанции 110/6,6/6,3кВ «Межегей»

1.2 Характеристика воздушной линии 110 кВ С-405-03

2 Аналитическая часть

2.1 Общие требования к релейной защите

2.2 Обзор типов устройств РЗА для защиты воздушной линии 110 кВ

2.3 Обзор конструкций трансформаторов тока 110 кВ

2.4 Обзор конструкций трансформаторов напряжения 110 кВ

3 Практическая часть

3.1 Выбор защит воздушной линии

3.2 Расчет токов КЗ

3.3 Расчет параметров срабатывания устройств РЗА ВЛ 110 кВ

3.4 Расчет параметров АПВ

3.5 Расчет параметров защиты минимального напряжения

3.6 Расчет параметров защиты максимального напряжения

Заключение

Перечень обязательных листов графической части:

1. Однолинейная схема ПС 110/6,6/6,3кВ «Межегей».

2. Схема присоединений ТТ и ТН к комплексу релейной защиты.

3. Принципиальная схема комплекса релейной защиты.

Руководитель ВКР

Н. В. Дулесова

(подпись, инициалы и фамилия)

Задание принял к исполнению

Г. В. Гузов

(подпись, инициалы и фамилия студента)

« \_\_\_ » марта 2023 г.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Расчет комплекса релейной защиты воздушной линии электропередачи ВЛ-110 кВ С-405-0,3, питающей ПС 110/6,6/6,3 кВ ООО УК «Межегейуголь»» содержит 66 страниц текстового документа, 30 использованных источников, 3 листа графического материала, приложений нет.

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, ВОЗДУШНАЯ ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, ПОДСТАНЦИЯ, СИЛОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР, ТРАНСФОРМАТОР ТОКА, ТРАНСФОРМАТОР НАПРЯЖЕНИЯ, ТОК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ, АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ.

Объект исследования – воздушная линия электропередачи ВЛ-110 кВ С-405-03, питающей ПС 110/6,6/6,3кВ «Межегей».

Предмет исследования – релейная защита воздушной линии 110 кВ.

Целью бакалаврской работы является расчет комплекса релейной защиты воздушной линии электропередачи ВЛ-110кВ С-405-03, питающей ПС 110/6,6/6,3кВ «Межегей».

В теоретической части работы дана общая характеристика подстанции 110/6,6/6,3кВ «Межегей» и питающей ее воздушной линии 110 кВ С-405-03.

В аналитической части освещены общие требования к релейной защите. Кроме этого дан развернутый обзор типов устройств РЗА для защиты воздушной линии 110 кВ, конструкций трансформаторов тока и напряжения 110 кВ.

В практической части ВКР произведен выбор защит воздушной линии, расчет токов короткого замыкания в начале линии, в конце линии, а также за силовым трансформатором подстанции. Произведен расчет параметров срабатывания устройств РЗА, АПВ, защиты минимального напряжения, защиты максимального напряжения ВЛ 110 кВ.

Практическая значимость исследований обусловлена тем, что предложенные технические решения по релейной защите воздушной линии напряжением 110 кВ могут быть использованы для реконструкции и проектирования подобных комплексов релейной защиты ЛЭП.

## THE ABSTRACT

Final qualifying work on the topic "Calculation of the complex of relay protection of the overhead transmission line VL-110kV S-405-0,3, feeding the substation 110 / 6.6 / 6.3 kV OOO UK "Mezhegeyugol"" contains 66 pages of a text document, 30 sources used, 3 sheet of graphic material, no attachments.

RELAY PROTECTION, OVERHEAD POWER LINE, SUBSTATION, POWER TRANSFORMER, CURRENT TRANSFORMER, VOLTAGE TRANSFORMER, SHORT CIRCUIT CURRENT, AUTOMATIC RECLOSING.

The object of the study is the overhead power line VL-110 kV S-405-03, which supplies the substation 110 / 6.6 / 6.3 kV "Mezhegey".

The subject of research is the relay protection of a 110 kV overhead line.

The purpose of the bachelor's work is to calculate the complex of relay protection of the overhead transmission line VL-110kV S-405-03, which feeds the substation 110/6.6/6.3kV "Mezhegey".

In the theoretical part of the work, a general description of the substation 110 / 6.6 / 6.3 kV "Mezhegey" and its overhead line 110 kV S-405-03 is given.

The analytical part highlights the general requirements for relay protection. In addition, a detailed review of the types of RPA devices for the protection of an overhead line 110 kV, the designs of current and voltage transformers 110 kV is given.

In the practical part of the WRC, a choice of overhead line protections was made, the calculation of short-circuit currents at the beginning of the line, at the end of the line, as well as behind the power transformer of the substation. The calculation of the operation parameters of RZiA, AR, undervoltage protection, overvoltage protection of 110 kV overhead lines was made.

The practical significance of the research is due to the fact that the proposed technical solutions for the relay protection of an overhead line with a voltage of 110 kV can be used for the reconstruction and design of similar relay protection complexes for power transmission lines.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 Теоретическая часть.....	8
1.1 Общая характеристика подстанции 110/6,6/6,3кВ «Межегей» .....	8
1.2 Характеристика воздушной линии 110 кВ С-405-03.....	11
2 Аналитическая часть.....	13
2.1 Общие требования к релейной защите .....	13
2.2 Обзор типов устройств РЗиА для защиты воздушной линии 110 кВ....	17
2.3 Обзор конструкций трансформаторов тока 110 кВ .....	22
2.4 Обзор конструкций трансформаторов напряжения 110 кВ.....	26
3 Практическая часть .....	31
3.1 Выбор защит воздушной линии.....	31
3.2 Расчет токов КЗ .....	31
3.3 Расчет параметров срабатывания устройств РЗиА ВЛ 110 кВ.....	40
3.3.1 Расчет уставок срабатывания высокочастотной дифференциально- фазной защиты.....	41
3.3.2 Токовая защита нулевой последовательности .....	46
3.3.3 Расчет параметров срабатывания токовой отсечки.....	50
3.3.4 Расчет параметров срабатывания дистанционной защиты от междуфазных повреждений .....	53
3.4 Расчет параметров АПВ .....	58
3.5 Расчет параметров защиты минимального напряжения .....	59
3.6 Расчет параметров защиты максимального напряжения.....	60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	61
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	62
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Нормальное функционирование электроэнергетических систем невозможно без соответствующих устройств релейной защиты и автоматики, обеспечивающих эффективную защиту и автоматизацию отдельных элементов этих систем. Релейная защита и автоматика производит отключение поврежденного элемента от неповрежденной части электросети и не дает распространиться аварии в энергосистеме. Кроме того, релейная защита способна выявлять ненормальные режимы работы такой системы и с достаточной эффективностью восстанавливать нормальную работу или питание потребителей.

В данной бакалаврской работе рассматривается расчет комплекса релейной защиты воздушной линии электропередачи ВЛ-110кВ С-405-03, питающей ПС 110/6,6/6,3кВ «Межегей».

Для этого были выполнены следующие задачи:

Дать общую характеристику подстанции 110/6,6/6,3кВ «Межегей» и характеристику питающей ее воздушной линии 110 кВ С-405-03;

Изучить общие требования к релейной защите;

Дать обзор типов устройств РЗА для защиты воздушной линии 110 кВ, конструкций трансформаторов тока и напряжения 110 кВ;

Осуществить выбор защит воздушной линии;

Произвести расчет токов короткого замыкания;

Рассчитать параметры срабатывания устройств РЗА ВЛ 110 кВ, АПВ, защиты минимального напряжения, защиты максимального напряжения.

Правильная настройка и проектирование релейной защиты и автоматики являются критически важными для безопасности и надежности работы электроэнергетических систем. Они должны быть спроектированы и настроены с учетом конкретных требований и характеристик каждой системы, чтобы гарантировать безопасность и эффективность работы системы.

# 1 Теоретическая часть

## 1.1 Общая характеристика подстанции 110/6,6/6,3кВ «Межегей»

ПС 110/6,6/6,3кВ «Межегей» является двух трансформаторной подстанцией, которая снабжает электроэнергией целое предприятие – ООО «Угольная Компания «Межегейуголь». Питание ПС осуществляется от узла отпайки С-405-03 (ЛПП ЛР) ПС «Городская» посредством ВЛ-110кВ С-405-03.

ПС 110/6,6/6,3кВ «Межегей» включает в себя следующие основные элементы: силовые трансформаторы, провода питающих линий, шины, коммутационная аппаратура высокого напряжения, трансформаторы тока и напряжения.

Трансформатор с диспетчерским наименованием 1Т типа ТДТНШ-16000/110/6 запитывает секции шин №3 и №4, а трансформатор с диспетчерским наименованием 2Т типа ТДТНШ-16000/110/6 запитывает секции шин №1 и №2.

ТДТНШ-16000/110 (рисунок 1.1) – трансформатор силовой масляный с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН) в обмотке ВН предназначен для работы в системах электроснабжения угольных шахт с отдельным питанием подземных и наземных токоприемников при частоте питающей сети 50 Гц. Основные технические характеристики трансформатора типа ТДТНШ-16000/110 представлены в таблице 1.1. РПН имеет возможность регулирования на  $\pm 16\%$  в верхнюю и нижнюю сторону от номинального напряжения [18].



Рисунок 1.1 – Внешний вид трансформатора типа ТДТНШ-16000/110

Таблица 1.1 – Основные технические характеристики трансформатора типа ТДТНШ-16000/110

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВ·А	16000
Напряжение обмоток, кВ	115/6,6/6,3
Схема и группа соединения обмоток	Ун/Д/Д-11-11
Напряжение короткого замыкания, %:	
ВН-СН	10,5
ВН-НН	17,5
СН-НН	6,5
Потери холостого хода, кВт	12
Потери короткого замыкания, кВт	100
Ток холостого хода, %	0,8

Каждая расщепленная обмотка трансформатора подстанции подключены к системе из четырех секций шин напряжением 6 кВ (распределительных устройств РУ-6 кВ) посредством гибких линий связи, в качестве которых выступают сталеалюминиевые провода марки АС-240/39. Для оперативных переключений, а также в случае ненормальных или аварийных режимах работы подстанции, между секциями установлены секционные выключатели и разъединители.

Для контроля электрических параметров на подстанции со стороны 6 кВ в ячейках распределительного устройства установлены трансформаторы напряжения и трансформаторы тока, к которым подключаются не только электроизмерительные приборы, но и различные устройства релейной защиты, в том числе защиты шин и отходящих присоединений.

С помощью кабельных линий типа ПвВнг (А)-LS-10 2(3×50) от каждой секции подстанции запитаны установки компенсации реактивной мощности (УКРМ): БСК-1 – БСК-4. Единичная мощность одного компенсирующего устройства составляет 1800 кВар, с возможностью переключения секций и изменения компенсирующей реактивной мощности.

Отходящие линии от подстанции (фидерные присоединения) представляют собой кабельные линии различных типов: ВБбШв, КГЭПхл, ВВГнг-LS-6, КмВЭБбШв, ПвВнг(А)-LS-10, в зависимости от специфики подсоединяемого оборудования угольной промышленности. Эти кабельные линии далее запитывают различные распределительные устройства (РУ 6 кВ) предприятия и трансформаторные подстанции напряжением 6/0,4 кВ. Кроме того, отдаленные от ПС распределительные пункты (РУ 6 кВ) запитаны с помощью сталеалюминиевых проводов марки АС и СИП-3 различного сечения.

Все вышеописанное иллюстрирует схема, представленная в Приложении.

## 1.2 Характеристика воздушной линии 110 кВ С-405-03

Питание ПС 110/6,6/6,3кВ «Межегей» осуществляется от узла отпайки С-405-03 (ЛПП ЛР) ПС «Городская» посредством ВЛ-110кВ С-405-03 с сечением сталеалюминиевых проводов марки АС-240/56 длиной 27,102 км (двухцепная линия). Внешний вид применяемых проводов ЛЭП линии напряжением 110 кВ представлен на рисунке 1.2. Это неизолированный сталеалюминиевый провод, сердечник которого выполнен из стальных проволок, а остальная часть — из алюминиевых проволок [13].

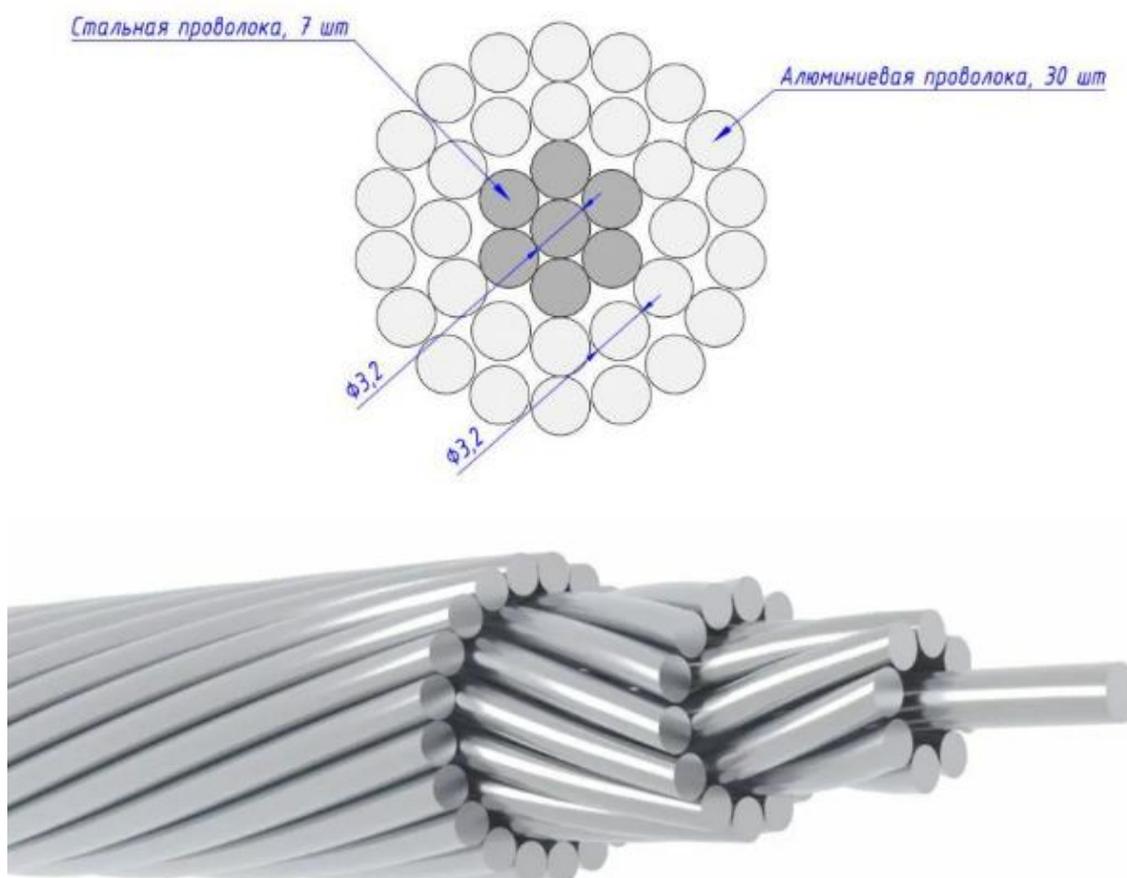
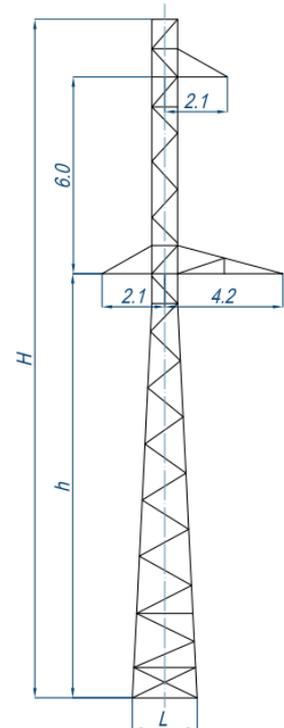


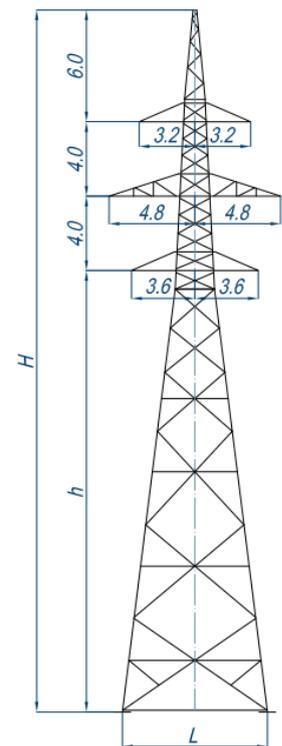
Рисунок 1.2 – Внешний вид применяемых проводов ЛЭП марки АС-240/56

Общие виды промежуточных, угловых и других опор ЛЭП ВЛ-110кВ С-405-03 представлены на рисунке 1.3.

Наименование изделия	ПС110-5В
Район по гололеду	III-IV
Ветровой район	III
Марка провода	AC-95; AC-150; ACO-240
Размер в осях фундамента L, м	2,4
Высота опоры H, м	24,0
Высота до нижней траверсы h, м	15,0
Масса опоры с цинком, кг	2292
Номер типового проекта	ДО 22-0106-00 (11520тм)



Наименование изделия	1У110-4	1У110-4+5	1У110-4+10	1У110-4+15
Район по гололеду	I-IV	I-IV	I-IV	I-IV
Ветровой район	III	III	III	III
Марка провода	AC-240/32			
Размер в осях фундамента L, м	4,08	5,33	6,58	7,83
Высота опоры H, м	22,6	27,6	32,6	37,6
Высота до нижней траверсы h, м	8,6	13,6	18,6	23,6
Масса опоры с цинком, кг	5992	8097	9950	12722
	с распорками	с распорками	с распорками	с распорками
	5853	7834	9543	12063
	без распорок	без распорок	без распорок	без распорок
Номер типового проекта	3.407.2-170.3			



**Примечание** Молниеотвод к опорам поставляется по отдельному заказу.

Рисунок 1.3 – Общие виды промежуточных, угловых и других опор ЛЭП

ВЛ-110кВ С-405-03

## **2 Аналитическая часть**

### **2.1 Общие требования к релейной защите**

Электрические сети электроэнергетических систем образованы множеством электроустановок, в процессе эксплуатации которых по различным причинам могут возникать повреждения, грозящие аварией, расстройством сложного технологического процесса, причинением ущерба дорогостоящему оборудованию и материалам. Для предотвращения развития аварии и уменьшения размеров повреждения при коротких замыканиях(КЗ) необходимо быстро выявить и отключить поврежденный элемент электроэнергетической системы. Наиболее опасные и частые повреждения – КЗ между фазами электрической установки и КЗ фаз на землю в сетях с глухозаземленными нейтралью. Важной особенностью в отношении основной защиты определенного участка является резервирование защит смежных участков, в том числе взаимное[1, 2, 4].

Наряду с повреждениями могут иметь место ненормальные (анормальные) режимы работы : перегрузка, понижение частоты, падение напряжения, замыкание на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью и др. При этом преждевременное отключение может принести вовсе не пользу , а вред. Второе назначение релейной защиты состоит в восприятии нарушения нормальных режимов работы оборудования, давать предупредительный сигнал обслуживающему персоналу или производить отключение оборудования с выдержкой времени. В этой связи есть защиты, действующие на сигнал.

Безусловно, сама по себе релейная защита не может в полной мере справляться с эффективным обеспечением бесперебойности и надежности электроснабжения. Поэтому в электроэнергетических системах возникает необходимость в применении различных устройств автоматики. К основным из них можно отнести устройства автоматического включения резерва (УАВР), устройства автоматического включения (УАПВ) и устройства автоматической частотной разгрузки (УАЧР). Для восстановления нормального

режима иногда предусматривается противоаварийная автоматика.

Любые технические устройства неидеальны в отношении своей надежной работы, к ним также относится релейная защита и автоматика, т. к. по разным причинам защита может не справиться с поставленными перед ней задачами в условиях эксплуатации. Отказы и некорректное срабатывание защиты иллюстрируется рисунком 1.1 [7].

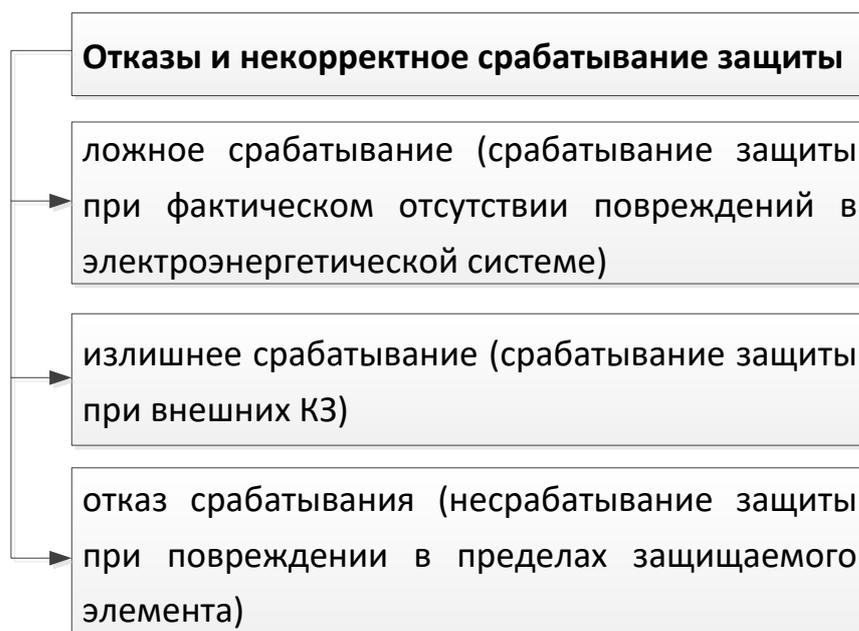


Рисунок 1.1 – Отказы и некорректное срабатывание защиты

Основными требованиями к устройствам РЗА являются: быстродействие, селективность, чувствительность и надежность.

Быстродействие защиты при КЗ с технической точки зрения обеспечивает действия, указанные на рисунке 1.2[7, 8].

При этом стоит отметить, что выключатель, в частности высоковольтный, срабатывает не сам по себе, а от действия на него устройств релейной защиты.

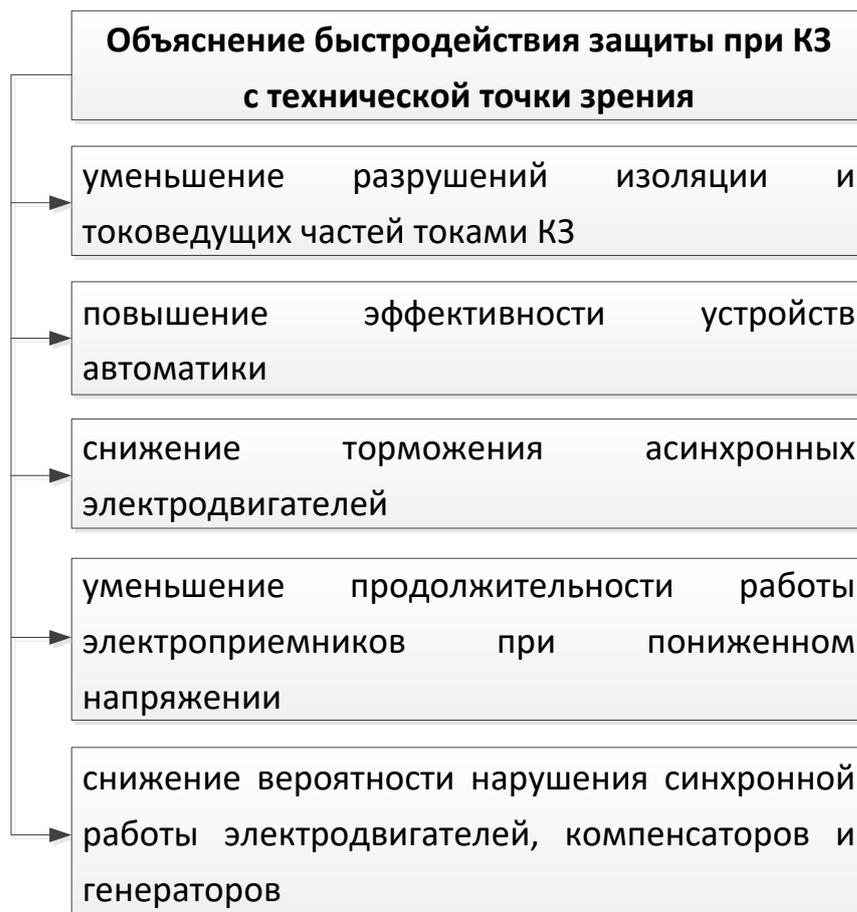


Рисунок 1.2 – Объяснение быстродействия защиты при КЗ  
с технической точки зрения

Селективность (избирательность) – важнейшее свойство защиты, действующей на отключение, определять поврежденный элемент и отключать только его. Если по какой-либо причине ближайший к месту повреждения участок не отключится, то должен отключиться следующий выключатель, расположенный ближе к источнику питания. В случае, когда релейная защита выполняет только функции оповещения персонала (действует на сигнал цветовыми или звуковыми устройствами сигнализации), то под селективностью будет пониматься способность однозначно указывать место возникновения ненормального режима и конкретный элемент (электроустановку) электроэнергетической системы.

Чувствительность предполагает свойство релейной защиты срабатывать в случае протекания минимальных потоков мощности по участкам элек-

троэнергетической системы.

В общем случае коэффициент чувствительности любой защиты есть отношение между значением воздействующей величины при металлическом КЗ в защищаемой зоне и установленным на защите значением параметра ее срабатывания. Это относится, в частности, к защите, реагирующей на электрические свойства, увеличивающиеся в течение короткого промежутка времени (защита по максимальному параметру). Для защит, реагирующих на напряжения, уменьшающиеся при повреждении (минимальные защиты), чувствительность к мощности имеет другое соотношение [9].

В общем случае надежность представляется собой свойство защиты выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях, т. е. надежными в эксплуатации должны быть не только реле и другие элементы защиты сами по себе, но и правильная их эксплуатация, качество их монтажа (исключение обрыва проводов, замыкания между ними, срабатывания реле от механических воздействий и других помех).

В последнее время бурно развивается автоматизация диагностирования. Это особенно важно в связи с использованием защитных устройств и электронных устройств в качестве основы интегральных схем и микропроцессорной техники. Такие инструменты снабжены встроенными методами тестирования и повышения производительности. Они позволяют обнаруживать неисправности, приводящие к сбоям в работе релейной защиты.

## 2.2 Обзор типов устройств РЗА для защиты воздушной линии 110 кВ

На линиях электропередачи применяются токовые, токовые направленные, дистанционные, дифференциальные защиты, а также максимальные и минимальные защиты напряжения, воздействующими величинами которых могут быть полные фазные токи и напряжения или их симметричные составляющие. На этих элементах предусматриваются соответствующие устройства автоматики, рассмотренные выше. Релейная защита и автоматика тесно связаны между собой, дополняют друг друга, взаимно влияют на выбор параметров на схемы, имеют общие цепи. Прежде всего, это характерно для релейной защиты и устройств АПВ и АВР.

Пример выполнения трехступенчатой защиты воздушной линии представлен на рисунке 2.1.

Применяются высокочастотные защиты трех видов:

- направленные с ВЧ блокировкой, основанные на сравнении направлений (знаков) мощности на концах защищаемой линии;
- дифференциально-фазные, основанные на сравнении фаз токов КЗ на концах линии;
- комбинированные направленные и дифференциально-фазные, сочетающие первые два принципа.

Высокочастотные защиты состоят из двух частей : релейной и высокочастотной. Высокочастотные РЗ получили широкое распространение как основные РЗ в сетях напряжением 110...1150 кВ. Они обеспечивают быстрое и селективное отключение участка, где произошло КЗ, при любой конфигурации сети и являются наиболее чувствительными. Принцип действия высокочастотных направленных и дифференциально-фазных РЗ надежен и прост. Эти РЗ являются единственными защитами, обеспечивающими мгновенное и двустороннее отключение участка, на котором произошло КЗ, в пределах всей линии.

В энергосистемах нашей страны применяются высокочастотные защиты: дифференциально-фазовая, предназначенная для линий напряжением 110 и 220 кВ в качестве основной быстродействующей РЗ от всех видов КЗ. Принцип действия ДФЗ основан на сравнении фаз токов прямой и обратной последовательности на концах защищаемой линии.

Общим недостатком всех высокочастотных РЗ являются высокая стоимость и сложность по сравнению с другими видами РЗ.

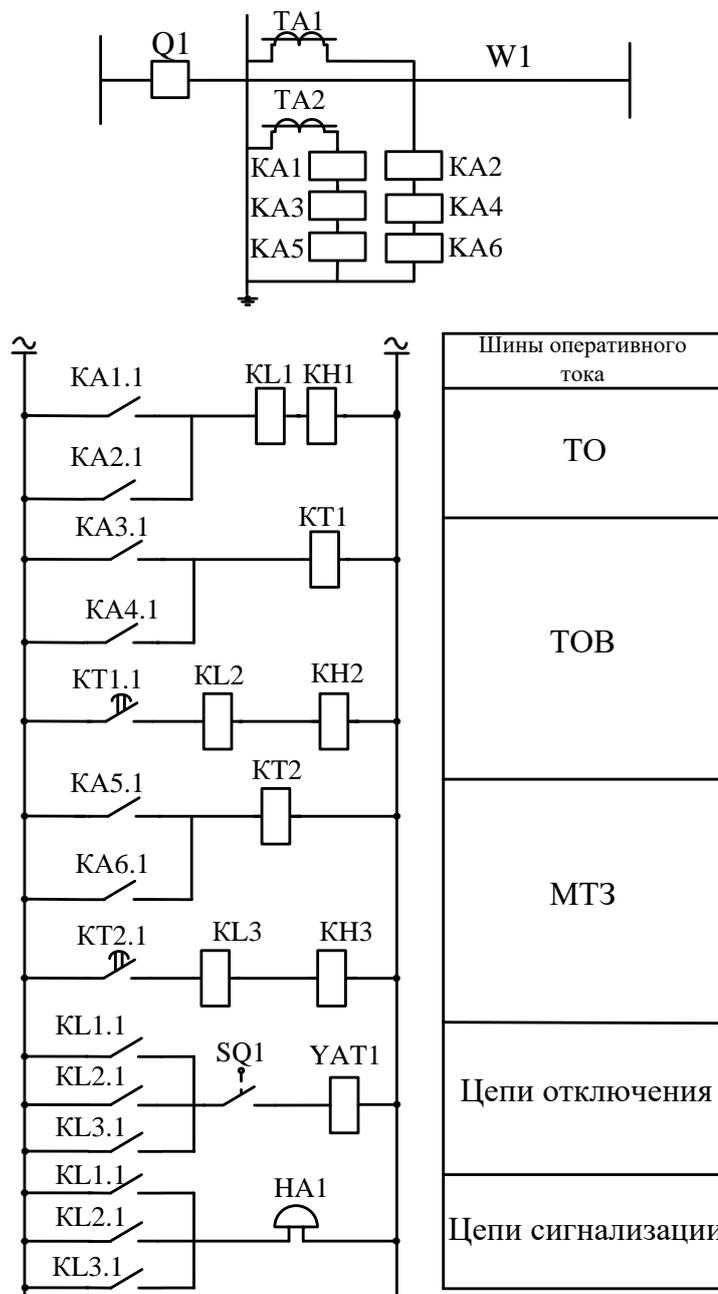


Рисунок 2.1 – Пример выполнения трехступенчатой защиты ВЛ

Устройство «Бреслер-0107.530» является терминалом продольной дифференциальной токовой защиты линии, в котором реализованы следующие функции [3]:

- продольная дифференциальная защита линии (ДЗЛ);
- логика отстройки от замыкания за ответвлением;
- логика устройства резервирования отказа выключателя;
- логика блокировки при неисправности цепей напряжения;
- логика блокировки при броске тока намагничивания; - логика контроля цепей тока (КЦТ).

Устройство «Бреслер-0117.532» является шкафом продольной дифференциальной токовой защиты линии и ступенчатых защит присоединения. Оно предназначено для обеспечения основной защиты с абсолютной селективностью линий электропередачи напряжением 110-220 кВ и содержит устройство «Бреслер-0107.532» [3].

При наличии ответвлений на защищаемой линии для обеспечения селективности необходимо отстраиваться от повреждений за трансформатором ответвления. Логика отстройки от замыканий за трансформатором отпайки вводится в работу с помощью соответствующей накладки.

Объём защит и автоматики на всех присоединениях подстанций, в том числе воздушных линиях, предусматривается согласно ПУЭ. Для линий в сетях 110 кВ с эффективно заземленной нейтралью должны быть предусмотрены устройства релейной защиты от многофазных замыканий и от замыканий на землю [12].

Для отходящих присоединений подстанций со средним напряжением 110 кВ, от которых, как правило, отходят воздушные линии, предусматриваются следующие защиты [4, 7, 12]:

- максимальная токовая защита;
- максимальная токовая защита нулевой последовательности (ТЗНП);
- дифференциальная продольная защита;

- автоматическое повторное включение (АПВ);
- устройство резервирования отказа выключателя (УРОВ);
- защита от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ);
- автоматический ввод резерва (АВР).

Последние две защиты соответственно используются преимущественно для кабельных линий отходящих присоединений (вероятность ОЗЗ на землю для воздушных линий мала) и на секционных перемычках подстанций со стороны низкого напряжения (в основном 6-35 кВ)[12].

Все указанные выше виды защит и функций автоматики могут быть реализованы микропроцессорными терминалами «Сириус», разработанными компанией «Радиус-Автоматика»[11]. Для защиты воздушной линии может быть использован терминал защиты «Сириус-21-Л» (рисунок 2.2). Он используется также как составная часть других микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики.



Рисунок 2.2 – Внешний вид устройства «Сириус-21-Л»

Наиболее предпочтительными являются шкафы серии ШЭЛТ. Они предназначены для выполнения функций релейной защиты и автоматики основного оборудования подстанций 35-500 кВ, которые показали себя с наилучшей стороны в плане надежности работы на различных подстанциях в разных регионах страны. Для воздушной линии 110 кВ со сталеалюминевыми проводами наиболее подходящими конфигурациями таких шкафов являются (рисунок 2.3)[28]:

– ШЭЛТ-ДФЗ – шкаф дифференциально-фазной защиты линии 110-220 кВ;

– ШЭЛТ-ДЗЛ – шкаф продольной дифференциальной защиты линии 110-220 кВ;

– ШЭЛТ-КСЗ – комплект ступенчатых дистанционной и токовой защиты, автоматика управления выключателем линии 110-220 кВ (шкаф может применяться в качестве основной защиты линий 110 кВ с односторонним питанием).

Например, в качестве основного функционального устройства предлагаются современные микропроцессорные терминалы ведущих отечественных и зарубежных производителей [30]:

- терминалы серии «Сириус» производства ЗАО «Радиус-Автоматика»;
- терминалы серии «БЭМП» производства ЗАО «ЧЭАЗ»;
- терминалы серии «БМРЗ» производства НТЦ «Механотроника»;
- терминалы серии «Micom» производства «Schneider Electric».

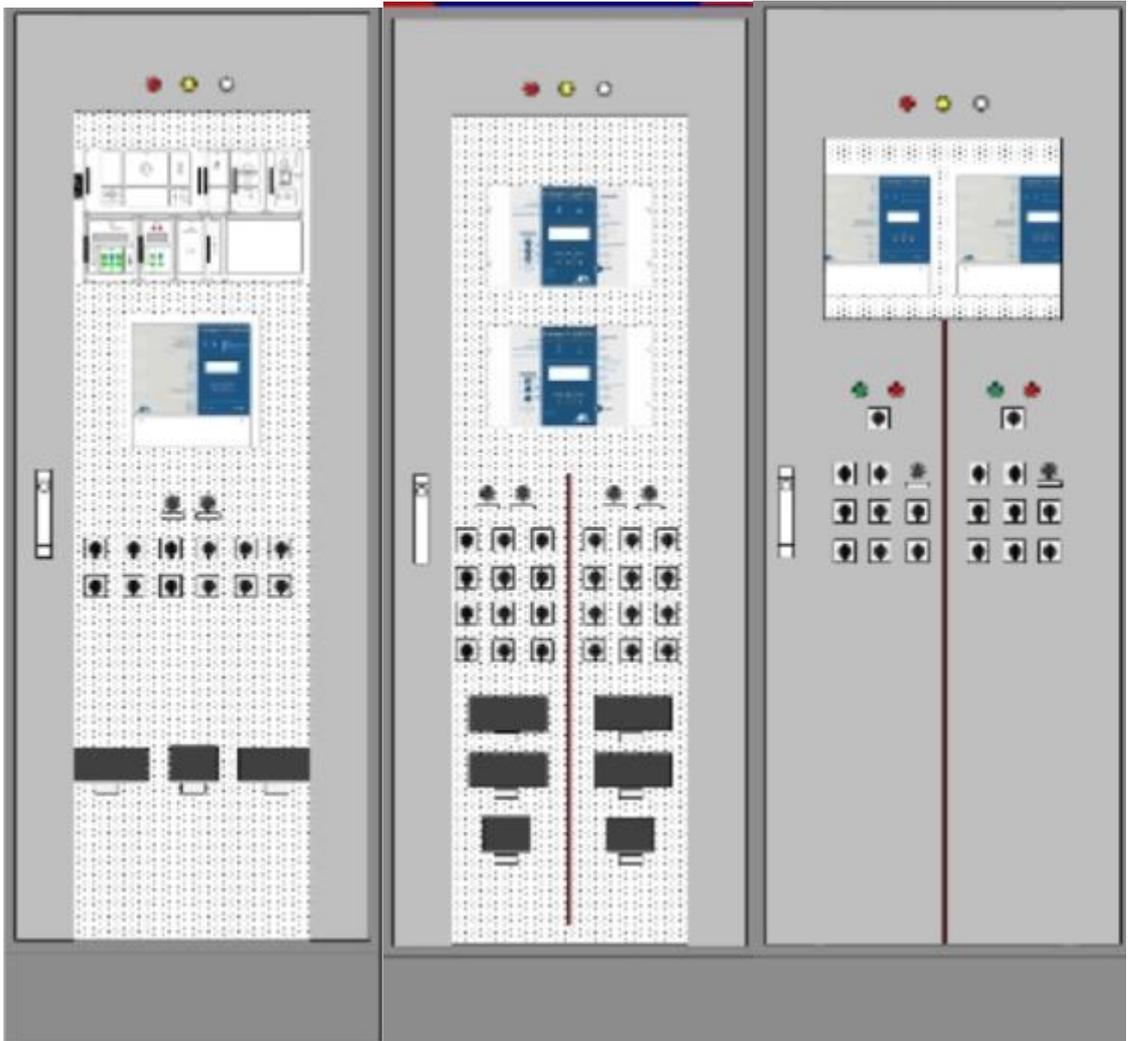


Рисунок 2.3 – Внешний вид шкафов серии ЩЭЛТ (слева направо) на базе терминалов «Сириус»: ЩЭЛТ-ДФЗ, ЩЭЛТ-ДЗЛ, ЩЭЛТ-КСЗ

### 2.3 Обзор конструкций трансформаторов тока 110 кВ

Про все измерительные трансформаторы можно сказать, что к ним не только можно подключать электроизмерительные приборы, счетчики электроэнергии, чтобы померить протекающие токи, мощность, частоту и т.д., но и устройства релейной защиты автоматики: отдельные реле, реагирующие органы микропроцессорных терминалов и др.

Прежде всего, возрастающие требования пожаробезопасного оборудования и запрет применения негорючих изоляционных жидкостей породили развитие элегазовых измерительных трансформаторов, применение которых в РФ началось сравнительно недавно [10, 16].

Трансформаторы тока ТРГ-УЭТМ 110 кВ (рисунок 2.4) предназначены для эксплуатации в открытых и закрытых распределительных устройствах (климатическое исполнение УХЛ), невзрывоопасной окружающей средой, не содержащей агрессивных газов и паров в концентрациях, разрушающих металлы и изоляцию. Для заполнения используется смесь - элегаз и тетрафторметан-14 или элегаз и азот [20].

У трансформатора тока ТРГ-УЭТМ 110 кВ очень хорошая термическая стойкость к токам к.з. (наибольший пик 102 кА, односекундный ток термической стойкости 40 кА).



Рисунок 2.4 – Трансформатор тока ТРГ УЭТМ напряжением 110 кВ

Преимущества ТРГ УЭТМ напряжением 110 кВ можно проиллюстрировать в виде схемы, представленной на рисунке 2.5[23].

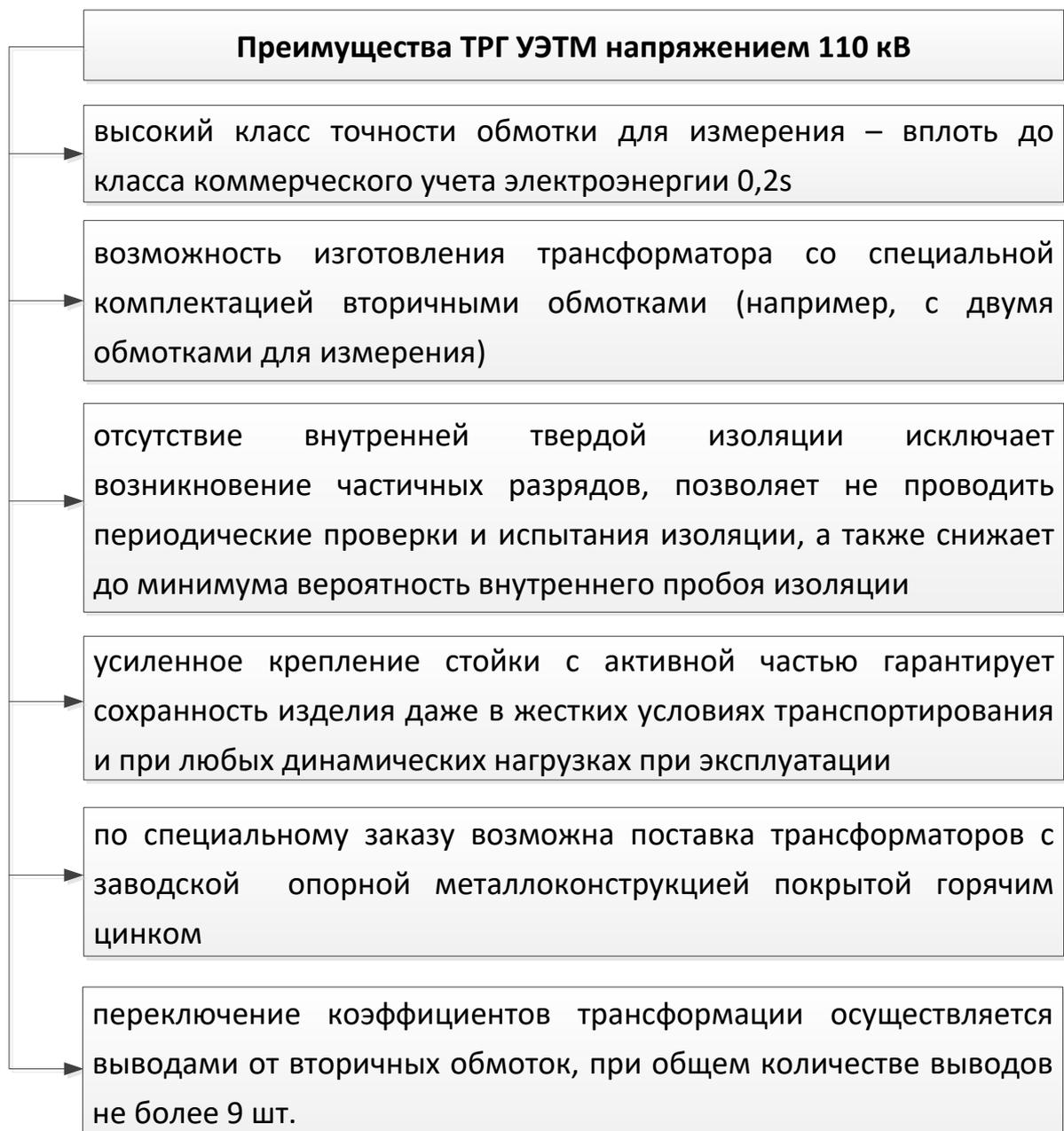


Рисунок 2.5 – Преимущества ТРГ УЭТМ напряжением 110 кВ

ТОГФ-110 (УХЛ1) – трансформаторы тока элегазовые с фарфоровой изоляцией (рисунок 2.6).

Трансформатор тока ТОГФ-110 с азотной изоляцией (точнее смесь элегаз + азот) – трансформатор тока практически без экологических проблем. Основными преимуществами азотного трансформатора тока 110 кВ являются – повышенный коэффициент пожаробезопасности, возможность использования аппарата при низких температурах и др. [19].



Рисунок 2.6 – Трансформатор тока ТОГФ-110

Особенности конструкции ТОГФ-110 можно проиллюстрировать в виде схемы, представленной на рисунке 2.7[24].

Классы точности вторичных обмоток для защиты: 5Р; 10Р. У трансформатора тока ТОГФ-110 очень хорошая термическая стойкость к токам к.з. (наибольший пик 102 кА, односекундный ток термической стойкости 40 кА).

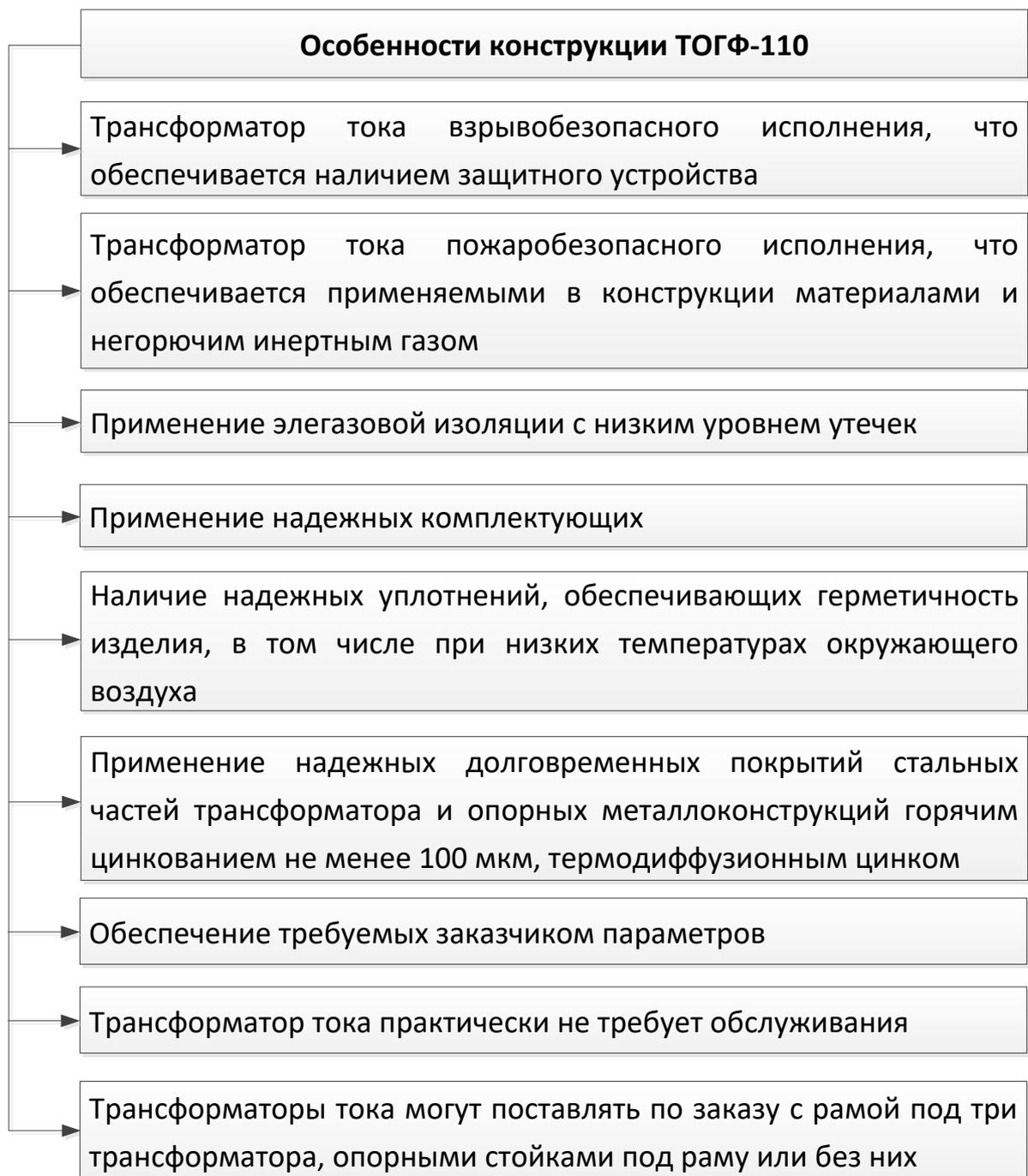


Рисунок 2.7 – Особенности конструкции ТОГФ-110

## 2.4 Обзор конструкций трансформаторов напряжения 110 кВ

Трансформаторы напряжения ЗНГ-УЭТМ-110 (рисунок 2.6) – индуктивные заземляемые антирезонансные элегазовые[21].

Особенности конструкции ЗНГ-УЭТМ-110 можно проиллюстрировать в виде схемы, представленной на рисунке 2.8[21].

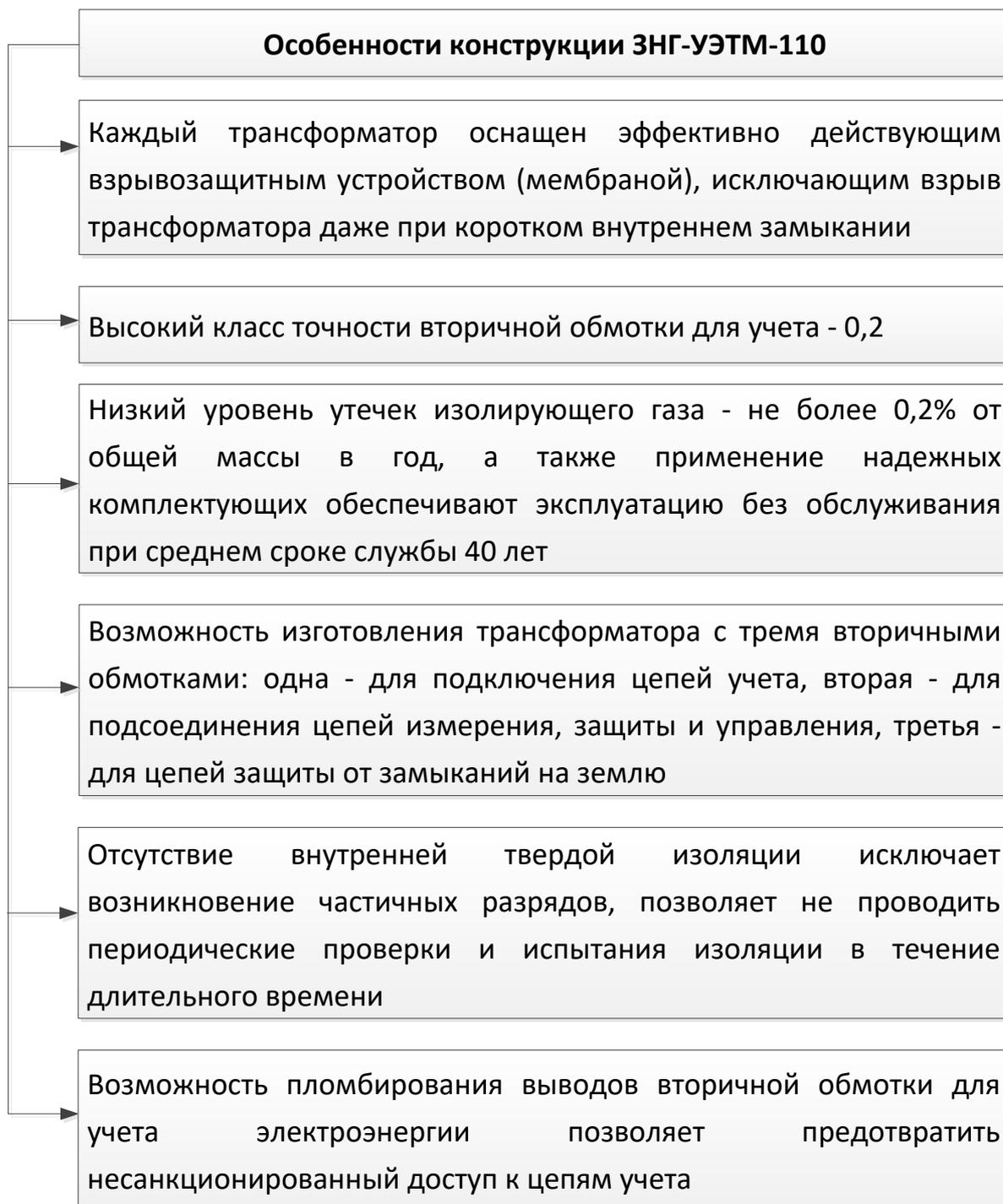


Рисунок 2.8 – Особенности конструкции ЗНГ-УЭТМ-110



Рисунок 2.6 – Трансформатор напряжения типа ЗНГ-УЭТМ-110

Классы точности вторичных обмоток ЗНГ-УЭТМ-110 для защиты при номинальном напряжении основных вторичных обмоток  $100/\sqrt{3}$  В: 3Р; 6Р. Предельная мощность трансформатора – до 2000 ВА.

Трансформаторы напряжения индуктивные газонаполненные (элегазовые) серии ЗНОГ-110(У1, УХЛ1) (рисунок 2.7) общего назначения, предназначенные для передачи сигнала измерительной информации измерительным приборам и устройствам защиты, сигнализации и управления в открытых и закрытых распределительных устройствах переменного тока частоты 50 Гц на номинальное напряжение  $110/\sqrt{3}$  кВ[17].



Рисунок 2.7 – Трансформатор напряжения типа ЗНОГ-110(У1, УХЛ1)

Особенности конструкции трансформатора типа ЗНОГ-110(У1, УХЛ1) представлены на рисунке 2.8.

Классы точности вторичных обмоток ЗНОГ-110 для защиты при номинальном напряжении основных вторичных обмоток  $100/\sqrt{3}$  В: 3Р. Предельная мощность трансформатора – до 1600 ВА.

Основным преимуществом элегазовых трансформаторов является их общая пожаробезопасность. Кроме того, они имеют следующие преимущества по сравнению с маслонаполненными выключателями, устанавливаемыми внутри и снаружи помещений. Это преимущество дает возможность уменьшить размер места, отводимого под него, и снизить стоимость.

Недостатками всегда являются меньшие затраты времени на нагрев по сравнению с масляными трансформаторами. Поэтому допустимое время полной загрузки расширено по величине [10].

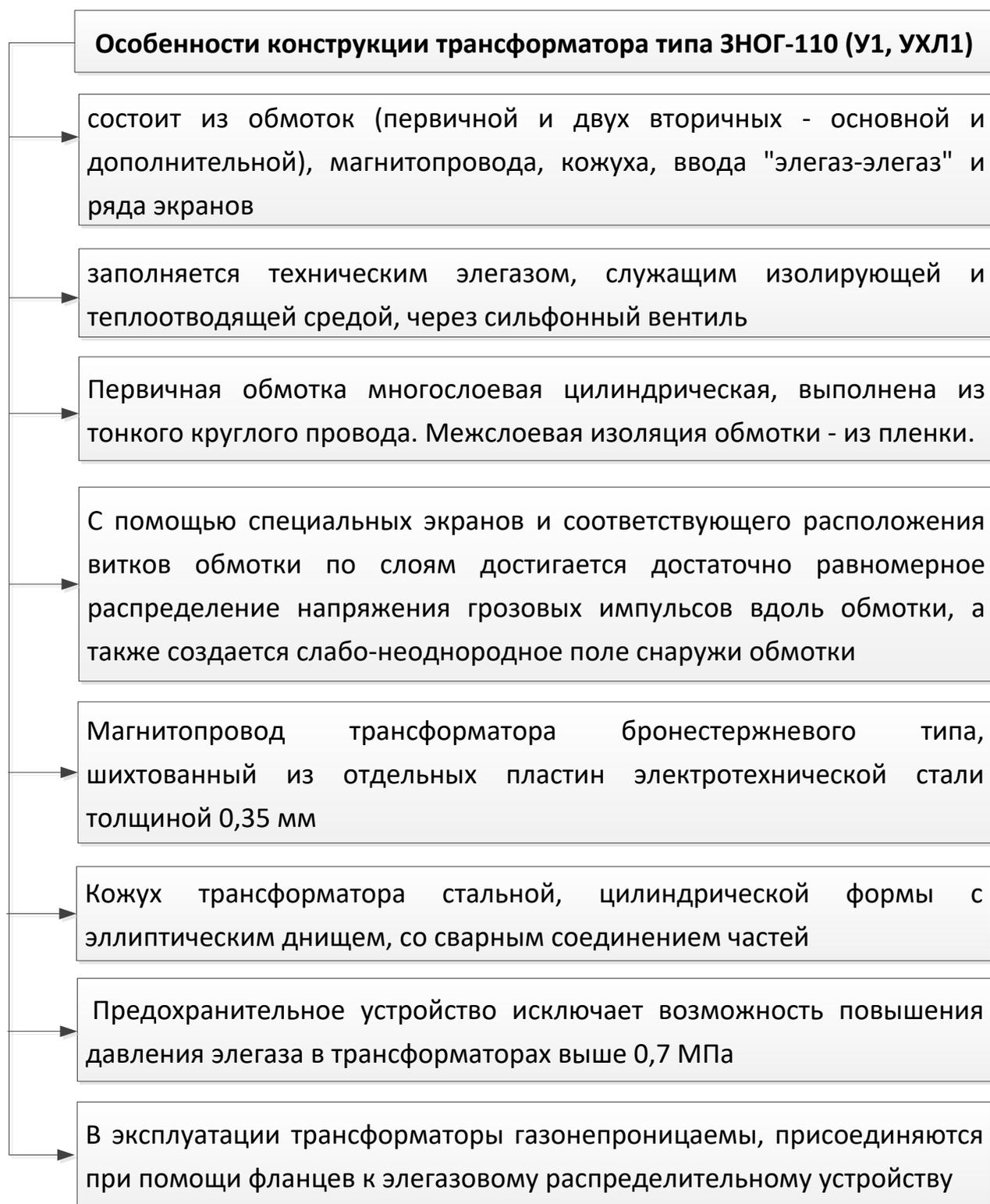


Рисунок 2.8 – Особенности конструкции трансформатора типа ЗНОГ-110(У1, УХЛ1)

### 3 Практическая часть

#### 3.1 Выбор защит воздушной линии

Основной защитой воздушных линий 110 кВ служат [7, 8, 29]:

- высокочастотная дифференциально-фазная защита;
- комплект ступенчатых защит (дистанционная защита, токовая отсечка) с передачей разрешающего или блокирующего сигналов;
- токовая защита нулевой последовательности;
- АПВ (для быстрого восстановления питания тупиковой ПС);
- защиты максимального и минимального напряжения.

#### 3.2 Расчет токов КЗ

Расчет токов КЗ производим в соответствии с методикой, приведенной в РД 153-34.0-20.527-98 [14], который является действующим руководящим документом в настоящий момент. Из этого источника берем общие принципы расчета при напряжении выше 1000 В. Для настройки устройств релейной защиты необходимо рассчитать не только схему прямой последовательности, которая является обычной для расчета токов трехфазного КЗ, но и схему нулевой последовательности, где удельные сопротивления воздушной линии (кроме сопротивлений трансформаторов) в общем случае увеличиваются кратно (чаще всего – утраиваются) в результате протекания токов нулевой последовательности [14].

Параметры линии ВЛ-110 кВ:

W1, АС-240/56:  $S_1 = 240 \text{ мм}^2$ ;  $L_1 = 27,102 \text{ км}$ ;  $x_{уд} = 0,4 \text{ Ом/км}$  [9].

Трансформатор Т1: ТДТНШ-16000/115/6,6/6,3 (основные параметры для расчета представлены в таблице 3.1).

Таблица 3.1 – Основные параметры трансформатора для расчета

$U_H, \text{кВ}$	ВН	СН	НН
	115	6,6	6,3
$u_k, \%$	В-С	В-Н	С-Н
	10,5	17,5	6,5

По данным предприятия электрических сетей, обслуживающего ПС «Городская» (см. фрагмент схемы подстанции ПС 110/6,6/6,3 кВ «Межегей» в Приложении) и питающей ВЛ-110 кВ, отобразим в точке К0 исходные параметры (максимальный и минимальный токи к.з.) в начале линии на схеме (рисунок 3.1). Для расчетов рассматривается только одна цепь линии и один трансформатор ПС 110/6,6/6,3кВ «Межегей», как наиболее тяжелый и неблагоприятный случай, при котором токи КЗ будут наибольшими. Исходные токи КЗ в точке К0 позволят в дальнейшем определить сопротивления электрической системы в максимальном и минимальном режиме, причем между ними существует обратная зависимость: чем больше ток КЗ, тем меньше сопротивление системы.

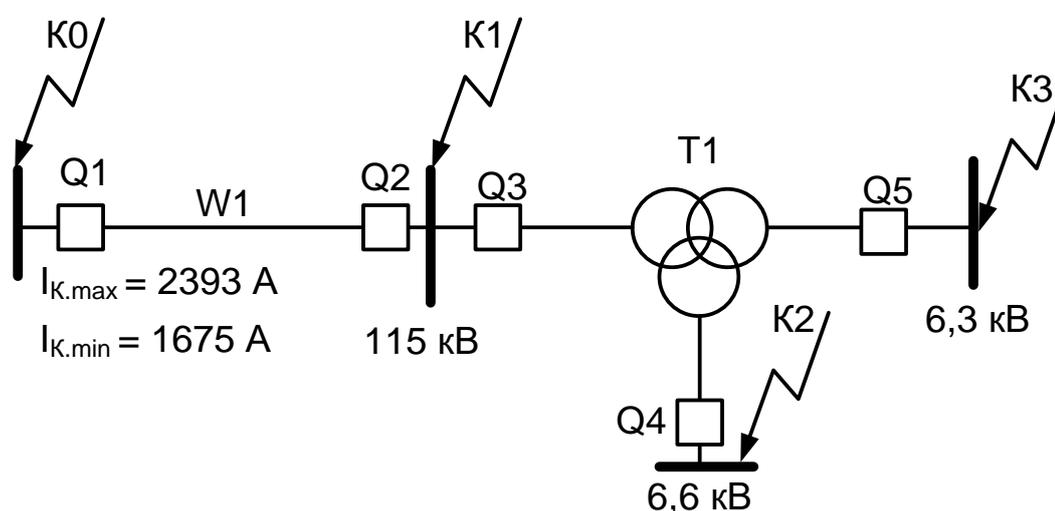


Рисунок 3.1 – Расчетная схема электроснабжения ПС «Межегей» с точками КЗ

По расчетной схеме электроснабжения ПС «Межегей» с точками КЗ составим схему замещения для расчета токов трехфазного КЗ (рисунок 3.2),

используя основные положения об отдельных элементах схемы (линиях электропередач и трансформаторах). Сопротивления трехобмоточного трансформатора или трансформатора с расщепленной обмоткой представляются в виде трехлучевой звезды [14].

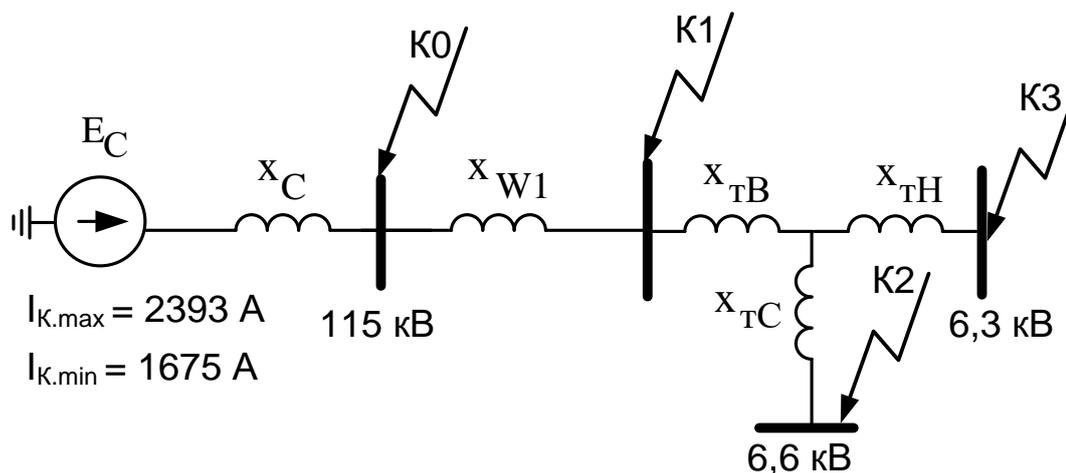


Рисунок 3.2 – Схема замещения для расчета токов КЗ

Задаемся базисными величинами:

– базисная мощность:  $S_B = 100 \text{ МВА}$ ;

– для расчета токов КЗ в именованных единицах необходимо принять значения напряжений ступеней для рассматриваемой схемы сети из шкалы средних номинальных напряжений [2]:

$$U_{CT1} = 115 \text{ кВ}, U_{CT2} = 6,6 \text{ кВ}, U_{CT3} = 6,3 \text{ кВ}; \quad (3.1)$$

– базисные токи:

$$I_{B1} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{cp}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 115} = 502 \text{ А}. \quad (3.2)$$

$$I_{B2} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{cp}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,6} = 8748 \text{ А}. \quad (3.3)$$

$$I_{БЗ} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{cp}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9165 A. \quad (3.4)$$

Определяем значения сопротивлений элементов сети. При этом в высоковольтных сетях допустимо вести расчет в относительных единицах (сопротивления представляют собой безразмерную величину), а также, поскольку в сетях 110 кВ преобладающей удельной величиной является реактивное сопротивление(х), то активной составляющей (г) в схемах замещения можно пренебречь.

Параметры схемы замещения линии(для воздушной линии при расчете в относительных единицах,  $x_{y01} = 0,4$  Ом/км):

$$x_{w1} = x_{y01} \ell_1 S_B / U_{cp}^2 = 0,4 \cdot 27,102 \cdot 100 / 110^2 = 0,09. \quad (3.5)$$

Для трёхобмоточных трансформаторов учитывается только индуктивная составляющая сопротивления [14]:

$$x_T = \frac{U_K S_B}{100 S_T}; \quad (3.6)$$

$$x_{TH} = \frac{0,5(u_{KBH} + u_{KCH} - u_{KBC})}{100} \cdot \frac{S_B}{S_T}; \quad (3.7)$$

$$x_{TC} = \frac{0,5(u_{KBC} + u_{KCH} - u_{KBH})}{100} \cdot \frac{S_B}{S_T}; \quad (3.8)$$

$$x_{TB} = \frac{0,5(u_{KBC} + u_{KBH} - u_{KCH})}{100} \cdot \frac{S_B}{S_T}; \quad (3.9)$$

где  $U_K$  – напряжение короткого замыкания соответствующей обмотки трансформатора, отнесенное к мощности  $S_T$  данной обмотки.

Сопротивление трёхобмоточного трансформатора Т1:

$$x_{TB} = \frac{0,5 * (10,5 + 17,5 - 6,5)}{100} * \frac{100}{16} = 0,672,$$

$$x_{TC} = \frac{0,5 * (10,5 + 6,5 - 17,5)}{100} * \frac{100}{16} \approx 0,$$

$$x_{TH} = \frac{0,5 * (17,5 + 6,5 - 10,5)}{100} * \frac{100}{16} = 0,422.$$

Приводим значения заданных в точке К0 токов КЗ (поскольку для расчета параметров релейной защиты нам необходимо рассчитать параметры и максимального и минимального режимов работы системы электроснабжения, то запишем формулы через максимальное и минимальное значения сопротивлений электрической системы):

$$I_{K0.max}^{(3)} = 2393 \text{ А (задано, см. с. 33 и Приложение);}$$

$$I_{K0.min}^{(3)} = 1675 \text{ А (задано, см. с. 33 и Приложение);}$$

$$I_{K0.min}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{K1.min}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1675 = 1451 \text{ А.}$$

Определим сопротивления внешней электрической системы по отношению к воздушной линии и трансформатору, в максимальном и минимальном режимах, в относительных единицах:

Базисный ток:

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}}; \tag{3.10}$$

При приведении к базисным величинам  $S_{\delta}, U_{\delta}, X_{\delta}$  в расчетах принимаем

$$U_{cp} = U_{\delta} \tag{3.11}$$

$$I_k = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot X_* \cdot X_\delta} = \frac{U_\delta}{\sqrt{3} \cdot X_\delta \cdot \frac{U_\delta^2}{S_\delta}} = \frac{S_\delta}{\sqrt{3} \cdot U_\delta \cdot X_*} = I_\delta \cdot U_\delta, \quad (3.12)$$

где  $I_\delta/X_{c*}$ - Формула расчета тока кз в относительных единицах отсюда получаем.

$$X_{c*} = \frac{I_\delta}{I_k}. \quad (3.13)$$

Из этих формул выражаем сопротивления системы в максимальном и минимальном режимах:

$$x_{c.\max} = \frac{I_{B1}}{I_{K0.\max}^{(3)}} = \frac{502}{2393} = 0,21; \quad (3.14)$$

$$x_{c.\min} = \frac{I_{B1}}{I_{K0.\min}^{(3)}} = \frac{502}{1675} = 0,3. \quad (3.15)$$

Находим токи КЗ в других точках(каждый ток к.з. определяется через соответствующий базисный ток, а сопротивления в знаменателе подставляются в относительных единицах, поэтому токи к.з. получаются в Амперах):

точка К1 (приведены к ступени 110 кВ):

$$I_{K1.\max}^{(3)} = \frac{I_{B1}}{x_{c.\max} + x_{W1}} = \frac{502}{0,21 + 0,09} = \frac{502}{0,3} = 1673 \text{ A}; \quad (3.16)$$

$$I_{K1.\min}^{(3)} = \frac{I_{B1}}{x_{c.\min} + x_{W1}} = \frac{502}{0,3 + 0,09} = \frac{502}{0,39} = 1287 \text{ A}; \quad (3.17)$$

$$I_{K1.\min}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{K1.\min}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1287 = 1115 \text{ A}; \quad (3.18)$$

точка К2 (приведены к ступени 6,6 кВ):

$$\begin{aligned}
 I_{K2.max}^{(3)} &= \frac{I_{B2}}{x_{c.max} + x_{W1} + x_{mB} + x_{mC}} = \\
 &= \frac{8748}{0,21 + 0,09 + 0,672 + 0} = \frac{8748}{0,972} = 9000 \text{ A};
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

$$I_{K2.min}^{(3)} = \frac{I_{B2}}{x_{c.min} + x_{W1} + x_{mB} + x_{mC}} = \frac{8748}{0,3 + 0,09 + 0,672 + 0} = \frac{8748}{1,062} = 8237 \text{ A};$$

$$I_{K2.min}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{K2.min}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 8237 = 7134 \text{ A};
 \tag{3.20}$$

точка К3 (приведены к ступени 6,3 кВ):

$$\begin{aligned}
 I_{K3.max}^{(3)} &= \frac{I_{B3}}{x_{c.max} + x_{W1} + x_{mB} + x_{mH}} = \\
 &= \frac{9165}{0,21 + 0,09 + 0,672 + 0,422} = \frac{9165}{1,394} = 6575 \text{ A};
 \end{aligned}
 \tag{3.21}$$

$$\begin{aligned}
 I_{K3.min}^{(3)} &= \frac{I_{B3}}{x_{c.min} + x_{W1} + x_{mB} + x_{mH}} = \\
 &= \frac{9165}{0,3 + 0,09 + 0,672 + 0,422} = \frac{9165}{1,484} = 6176 \text{ A};
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

$$I_{K3.min}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{K3.min}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 6176 = 5349 \text{ A}.
 \tag{3.23}$$

Для отстройки релейной защиты необходимо также привести расчетные токи К3 к единой ступени напряжения (110 кВ), по аналогичным формулам, тогда:

точка К2 (приведены к ступени 110 кВ):

$$I_{K2.max}^{(3)} = \frac{502}{0,972} = 516 \text{ A};
 \tag{3.24}$$

$$I_{K2.min}^{(3)} = \frac{502}{1,062} = 473 \text{ A};
 \tag{3.25}$$

$$I_{K2.min}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{K2.min}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 473 = 410 \text{ А}; \quad (3.26)$$

точка К3 (приведены к ступени 110 кВ):

$$I_{K3.max}^{(3)} = \frac{502}{1,394} = 360 \text{ А}; \quad (3.27)$$

$$I_{K3.min}^{(3)} = \frac{502}{1,484} = 338 \text{ А}; \quad (3.28)$$

$$I_{K3.min}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{K3.min}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 338 = 293 \text{ А}. \quad (3.29)$$

Результаты расчета сводим в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты расчетов токов трехфазного и двухфазного КЗв различных режимах (приведены к одной ступени 110 кВ)

Точка к.з.	$x_{max}$ , о.е.	$I_{max}^{(3)}$ , А	$x_{min}$ , о.е.	$I_{min}^{(3)}$ , А	$I_{min}^{(2)}$ , А
К0	0,21	2393	0,3	1675	1451
К1	0,3	1673	0,39	1287	1115
К2	0,972	516	1,062	473	410
К3	1,394	360	1,484	338	293

При расчете токов нулевой последовательности сопротивление нулевой последовательности воздушной линии ВЛ-110 кВ, имеющей хорошо проводящие тросы, в 3 раза превышает сопротивление прямой последовательности, поэтому сопротивления всех линий вводим в схему замещения в виде утроенной величины по отношению к ранее сопротивлениям линий:

$$x_{w1} = 3 * 0,09 = 0,27.$$

Поэтому по аналогии с предыдущими расчетами пересчитаем токи нулевой последовательности:

точка К1 (приведены к ступени 110 кВ):

$$I_{K1.max0} = \frac{I_{B1}}{x_{c.max} + x_{W1}} = \frac{502}{0,21+0,27} = \frac{502}{0,48} = 1046 \text{ A}; \quad (3.30)$$

$$I_{K1.min0} = \frac{I_{B1}}{x_{c.min} + x_{W1}} = \frac{502}{0,3+0,27} = \frac{502}{0,57} = 881 \text{ A}; \quad (3.31)$$

точка К2 (приведены к ступени 110 кВ):

$$\begin{aligned} I_{K2.max0} &= \frac{I_{B1}}{x_{c.max} + x_{W1} + x_{mB} + x_{mC}} = \\ &= \frac{502}{0,21+0,27+0,672+0} = \frac{502}{1,152} = 436 \text{ A}; \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$I_{K2.min0} = \frac{I_{B1}}{x_{c.min} + x_{W1} + x_{mB} + x_{mC}} = \frac{502}{0,3+0,27+0,672+0} = \frac{502}{1,242} = 404 \text{ A};$$

точка К3 (приведены к ступени 110 кВ):

$$\begin{aligned} I_{K3.max0} &= \frac{I_{B1}}{x_{c.max} + x_{W1} + x_{mB} + x_{mH}} = \\ &= \frac{502}{0,21+0,27+0,672+0,422} = \frac{502}{1,574} = 319 \text{ A}; \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} I_{K3.min0} &= \frac{I_{B1}}{x_{c.min} + x_{W1} + x_{mB} + x_{mH}} = \\ &= \frac{502}{0,3+0,27+0,672+0,422} = \frac{502}{1,664} = 302 \text{ A}. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Результаты расчетов токов нулевой последовательности в различных режимах сводим в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчетов токов нулевой последовательности в различных режимах (приведены к одной ступени 110 кВ)

Точка к.з.	$x_{\max}$ , о.е.	$I_{\max 0}$ , А	$x_{\min}$ , о.е.	$I_{\min 0}$ , А
К0	0,21	2393	0,3	1675
К1	0,48	1046	0,57	881
К2	1,152	436	1,242	404
К3	1,574	319	1,664	302

### 3.3 Расчет параметров срабатывания устройств РЗА ВЛ 110 кВ

Вычислим рабочие максимальные токи присоединений согласно расчетной схеме (рисунок 3.1):

$$I_{T1} = \frac{S_{T1}}{\sqrt{3}U_n} = \frac{16000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 84 \text{ А}; \quad (3.35)$$

$$I_{p(W1)} = I_{T1} = 84 \text{ А}.$$

В режиме перегрузки трансформатора ток одной цепи ВЛ-110 кВ составит:

$$I_{nep(W1)} = 1,4I_{T1} = 1,4 * 84 = 117,6 \text{ А}. \quad (3.36)$$

Коэффициент трансформации трансформаторов тока принимается, как правило, в соответствии со шкалой номинальных токов, ближайшим большим к рабочему току данного элемента сети. Однако, как правило, первичный ток трансформатора тока выбирается с 1,5-2,0-кратным запасом.

Для построения защиты воздушной линии ВЛ-110 кВ и исходя из обзоров в п.2.3, принимаем трансформаторы тока ТОГФ-110 УХЛ1, класс точности 10Р, с параметрами (первичным и вторичным током):

$I_{1\text{ном}} = 150 \text{ А}$ ,  $I_{2\text{ном}} = 5 \text{ А}$ , коэффициент трансформации  $K_I = 150/5=30$ .

Коэффициенты трансформации трансформаторов напряжения принимаются по каталогу в соответствии с напряжением места установки трансформатора. Выбор коэффициентов трансформации производится только для тех элементов сети, где устанавливаются устройства защиты и автоматики.

Для построения защиты воздушной линии ВЛ-110 кВ и исходя из обзоров в п.2.4, принимаем трансформаторы напряжения ЗНОГ-110 УХЛ1, класс точности 3Р, при номинальном напряжении основных вторичных обмоток(фазном)  $100/\sqrt{3} \text{ В}$ . Номинальная мощность  $S=1600 \text{ ВА}$ , при этом коэффициент трансформации линейного напряжения  $K_U = 110000/100 = 1100$ .

### **3.3.1 Расчет уставок срабатывания высокочастотной дифференциально-фазной защиты**

Защиту линии выполняем на базе комплекта дифференциально-фазовой защиты ШЭЛТ-ДФЗ-011-011 (два полукомплекта), включающий в себя терминал «Сириус-3-ДФЗ-01».

Шкаф представляет собой низковольтное комплектное устройство, выполненное в конструктиве «Rittal», с применением комплектующих ведущих мировых производителей.

Шкаф может применяться в качестве комплекта основной защиты линии электропередачи, напряжением 110 кВ. Входные и выходные цепи шкафа предусматривают взаимодействие с выключателями, оборудованными трехфазным приводом.

Дифференциально-фазная защита является основной быстродействующей защитой линий электропередачи 110 кВ и состоит из двух полукомплектов, устанавливаемых по концам линии. Защита содержит релейную и высокочастотную части. Шкаф ШЭЛТ-ДФЗ-011 содержит релейную часть, высокочастотный приёмопередатчик поставляется производителем отдельно и устанавливается на подготовленное в шкафу место. Типовой вариант пред-

полагает использование в качестве приёмопередающего устройства – “ПВЗУ-Е” производства ООО “Уралэнергосервис”.

1) Токи срабатывания защиты и реле пуска передатчика:

$$I_{с.з.н.н} = \frac{k_n}{k_b} \cdot I_{раб.макс} = \frac{1,2}{0,9} \cdot 84 = 112 \text{ А}, \quad (3.37)$$

$$I_{с.р.н.н} = \frac{k_n}{k_b} \cdot \frac{I_{раб.макс}}{K_I} = \frac{1,2}{0,9} \cdot \frac{84}{30} = 3,7 \text{ А}, \quad (3.38)$$

где  $k_z = 1,1 \dots 1,2$  - коэффициент надежности;  $k_b = 0,9$  - коэффициент возврата реле;  $I_{нагр.макс} = 84 \text{ А}$  - наибольший ток нагрузки, принимается по длительно допустимому току линии;  $K_I$  - коэффициент трансформации ТТ линии, рассчитан ранее.

Выбираем уставку по току 4 А, ток срабатывания защиты при  $K_{сх}=1$  (неполная звезда) составит  $I_{ср.з.} = 4 \cdot 30 = 120 \text{ А}$ .

2) Токи срабатывания защиты и реле подготовки цепи отключения:

$$I_{с.з.н.о} = k_c I_{с.з.н.н} = 1,4 \cdot 112 = 156,8 \text{ А}, \quad (3.39)$$

$$I_{с.р.н.о} = k_c I_{с.р.н.н} = 1,4 \cdot 3,7 = 5,18 \text{ А}, \quad (3.40)$$

где  $k_c = 1,4$  – коэффициент согласования различных полуккомплектов защиты.

Выбираем уставку по току 5,3 А, ток срабатывания защиты при  $K_{сх}=1$  (неполная звезда) составит 160 А.

3) Чувствительность токовых пусковых органов:

$$k_{ч.н.н}^{(3)} = \frac{I_{K1}^{(2)}}{I_{сз.н.н}} = \frac{1115}{120} = 9,3 > 2; \quad (3.41)$$

$$k_{ч.н.о}^{(3)} = \frac{I_{K1}^{(2)}}{I_{сз.н.о}} = \frac{1115}{160} = 7 > 1,5. \quad (3.42)$$

Чувствительность токовых органов достаточна.

В качестве вспомогательных реле в указанном комплекте применяем промежуточные реле и органы направления мощности (измерительные реле на основе аналоговых интегральных микросхем с двумя воздействующими электрическими величинами – током и напряжением), входящие в комплект.

Принцип действия ДФЗ основан на сравнении фаз токов манипуляции по концам защищаемой линии. Сравнение фаз токов осуществляется с помощью высокочастотных сигналов, которыми обмениваются высокочастотные приемопередатчики, устанавливаемые по концам защищаемой линии.

Пуск ВЧ передатчика, при возникновении КЗ, осуществляется сигналом срабатывания чувствительных ПО. Фаза импульсов высокочастотного сигнала определяется фазой тока манипуляции.

Сигнал на отключение выключателя выдается при одновременном выполнении следующих условий:

- срабатывание грубых пусковых органов (ПО);
- совпадение фаз токов манипуляции по концам защищаемого объекта.

Место КЗ, внутри или вне защищаемой линии, определяется по совпадению фаз токов манипуляции по концам линии. При КЗ внутри защищаемой линии, токи манипуляции совпадают, при этом в канале связи образуются паузы (рисунок 3.3). В случае, если КЗ вне защищаемой линии, токи манипуляции находятся в противофазе, образуя в канале связи непрерывный ВЧ сигнал. ВЧ приемник, принимающий сигнал с линии и воздействующий на орган сравнения фаз устройства, действует инверсно, т.е. при отсутствии ВЧ сигнала на линии, на выходе ВЧ приемника формируется единичный управляющий сигнал. Таким образом, длительностью единичного сигнала на входе органа сравнения фаз (ОСФ) устройства определяется место КЗ.

Длительность ВЧ пакетов соответствует полупериоду тока манипуляции.

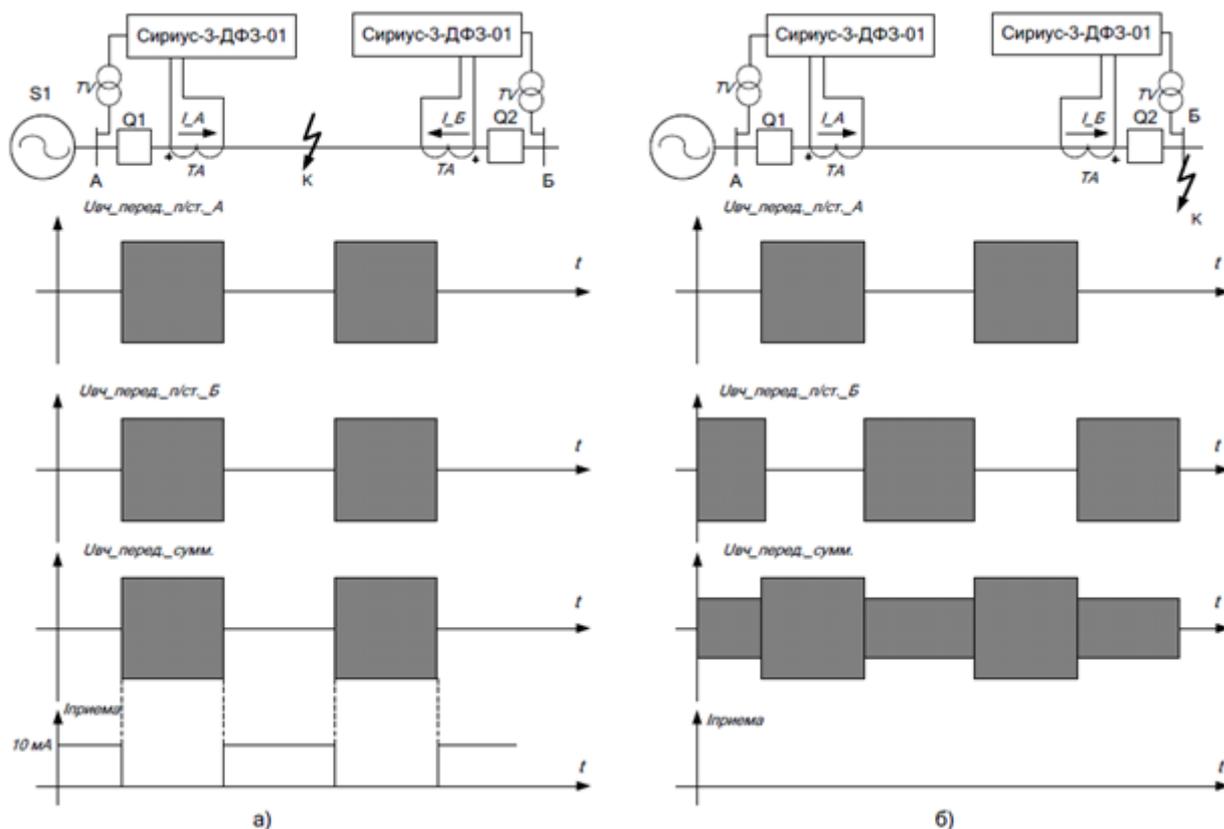


Рисунок 3.3 – Принцип работы дифференциально-фазной защиты:

а) работа защиты и ВЧ приемопередатчиков при внутреннем КЗ;

б) работа защиты и ВЧ приемопередатчиков при внешнем КЗ

ДФЗ устройства включает три группы пусковых органов (ПО), орган манипуляции (ОМ) и орган сравнения фаз (ОСФ). Чувствительные ПО и ОМ производят управляющий сигнал ВЧ передатчика. Грубые ПО, дополнительные ПО и ОСФ формируют сигнал отключения. Упрощенная структурная функционально-логическая схема ДФЗ устройства и полная функционально-логическая схема блока ДФЗ изображены на рисунке 3.4.

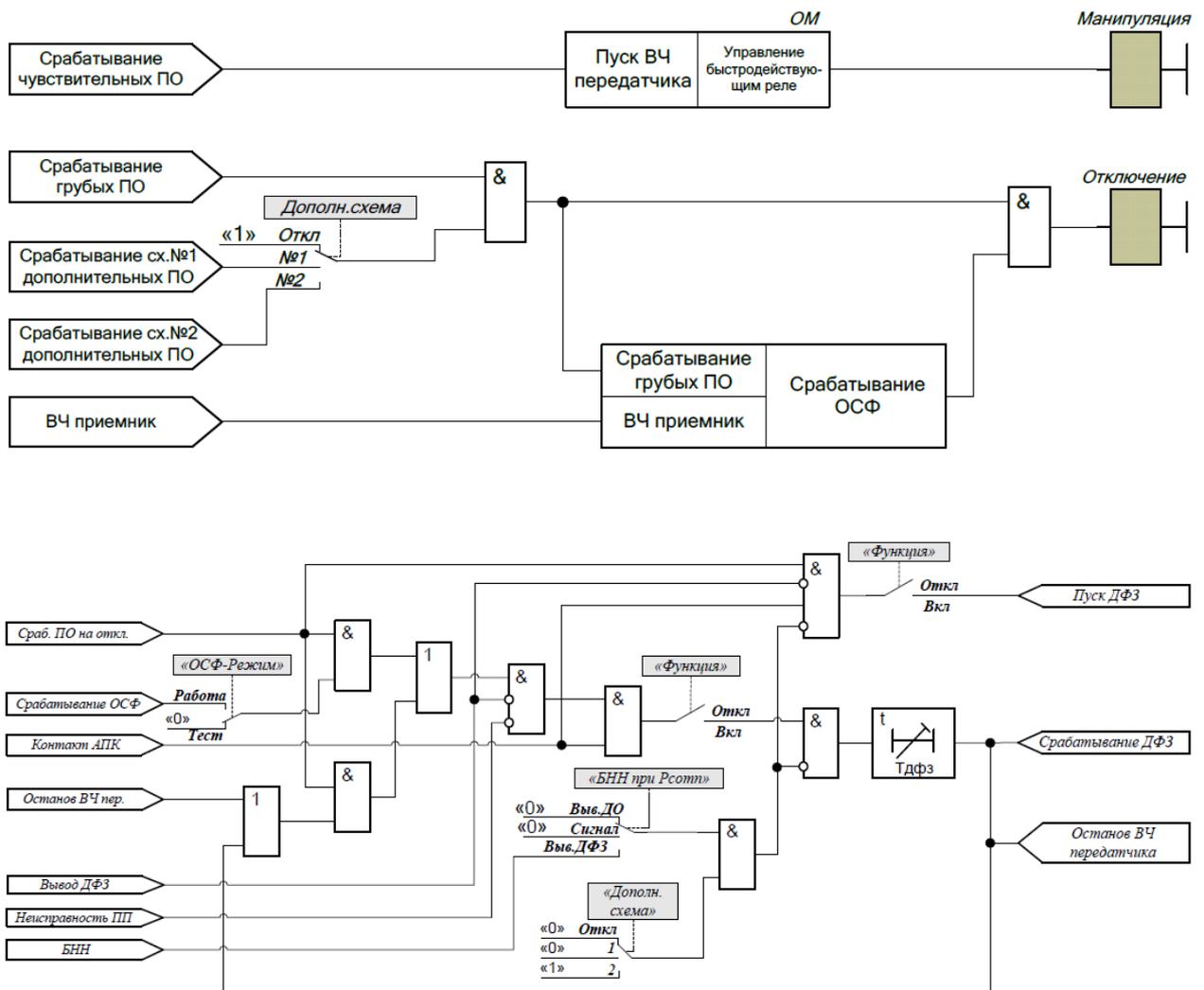


Рисунок 3.4 – Структурная функционально-логическая схема ДФЗ устройства и полная функционально-логическая схема блока ДФЗ

Устройство включает три группы пусковых органов:

- чувствительные ПО, действующие на пуск ВЧ передатчика;
- грубые ПО, формирующие цепь отключения;

Конструктивно устройство ШЭЛТ-ДФЗ-011-011 на базе «Сириус-3-ДФЗ-01» выполнено в виде блока, с размещенными внутри съемными модулями, имеющего лицевую панель (пульт управления). Структурная схема устройства изображена на рисунке 3.5.

В блоке расположены легкосъёмные модули, в состав которых входят печатная плата и другие необходимые элементы. Модули объединены между собой с помощью жесткой кросс-платы. Внешние сигналы всех модулей

(кроме модуля управления) выведены на заднюю панель блока и подключены к клеммам. Клеммы выполнены разъемными (целой группой), что позволяет при необходимости оперативно заменить устройство.

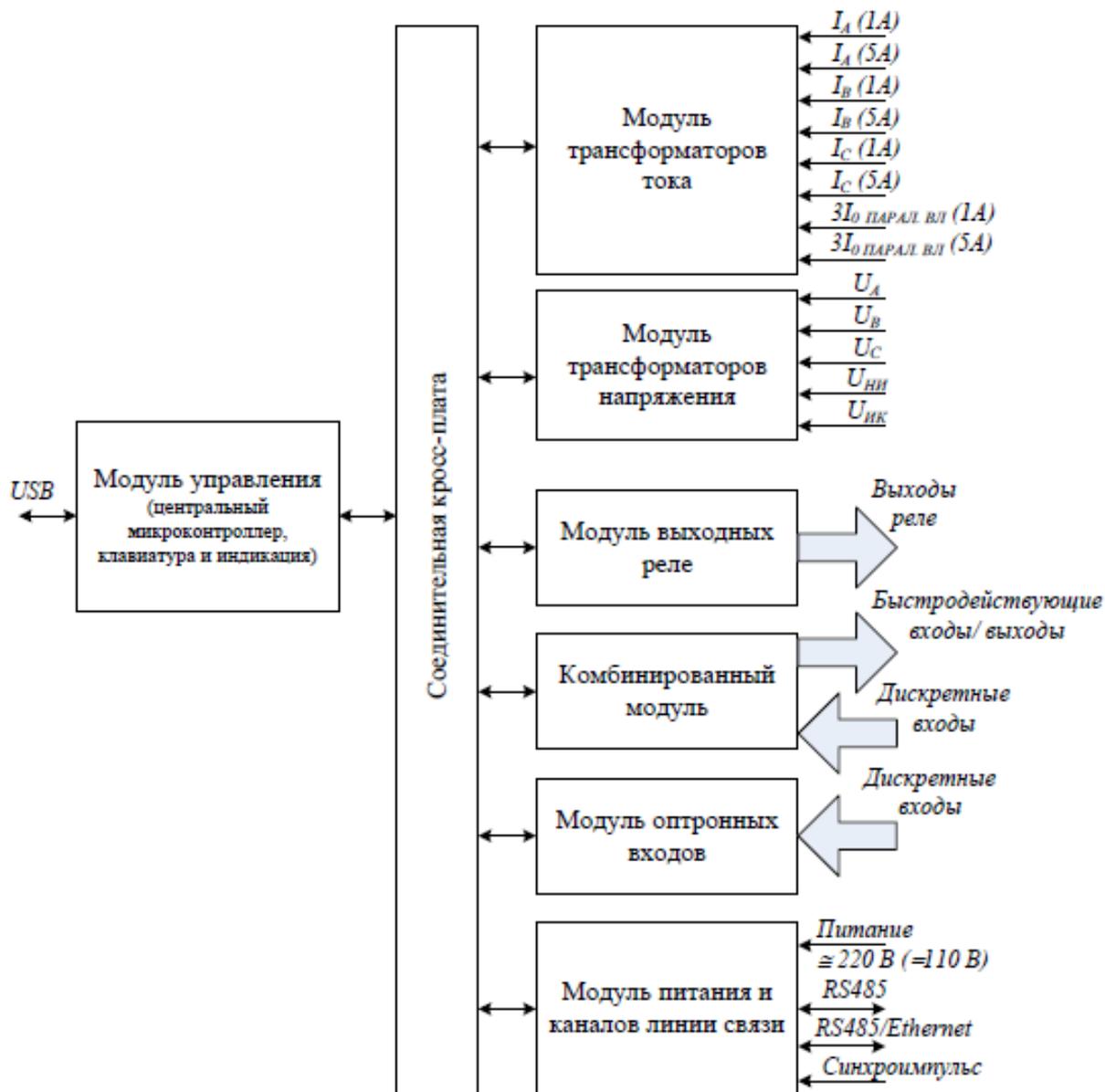


Рисунок 3.5 – Структурная схема устройства «Сириус-3-ДФЗ-01»

### 3.3.2 Токовая защита нулевой последовательности

Для защиты воздушной линии ВЛ-110 кВ применяем четырехступенчатые ТЗНП в составе шкафа ШЭЛТ-КС3-011 с трансформаторами тока нулевой последовательности типа ТЗЛМ-110[27].

*I ступень.* Ток срабатывания определяется по двум условиям:  
отстройки от тока замыкания в конце линии

$$I_{oc.з}^I \geq k_{отс} \cdot 3I_{оз}, \quad (3.43)$$

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

2) отстройки от утроенного тока нулевой последовательности при одновременном включении фаз выключателя:

$$I_{0c.з}^I \geq k_{отс} \cdot 3I_{0нп}. \quad (3.44)$$

Ток срабатывания определяем по этому условию, так как выключатели на ЛЭП 110 кВ не имеют по фазного управления.

$$I_{oc.з}^I = 1,2 \cdot 1046 = 1255 \text{ A};$$

$$I_{oc.р.}^I = 1255 / 30 = 42 \text{ A}.$$

Чувствительность проверяем при к.з. в начале линии:

$$k_{ч} = 3I_{оз \text{ мин}} / I_{oc.з}^I = 3 \cdot 1675 / 1255 = 4 > 2.$$

*II ступень.* Ток срабатывания определяется из условий:

1) Согласование I ступени защиты предыдущей линии:

$$I_{oc.з.}^{II} \geq k_{отс} \cdot 3I_{0c.з(n-1)}^I. \quad (3.45)$$

2) Отстройки от утроенного тока нулевой последовательности в защите в неполнофазном режиме в цикле ОАПВ.

Поскольку линия питается непосредственно с шин ПС «Городская», то эти условия в данном случае неприменимы.

Определим ток срабатывания, исходя из требуемого коэффициента чувствительности при однофазном КЗ в конце зоны.

$$k_{ч.т} = \frac{3I_{0з.мин}}{I_{0с.з.}^{II}} \Rightarrow I_{0с.з.}^{II} \leq \frac{3I_{0з.мин}}{k_{ч.т}} = \frac{3*1675}{1,5} = 3350 A; \quad (3.46)$$

$$I_{0с.р.}^{II} = \frac{3350}{30} = 112 A.$$

Время срабатывания определяется из условия отстройки от времени срабатывания быстродействующих защит смежного элемента.

$$t_{с.з.}^{II} = t_{быстр.} + \Delta t = 0,1 + 0,5 = 0,6 \text{ с.} \quad (3.47)$$

где  $t_{быстр.} = 0,1 \text{ с}$ ;  $\Delta t = 0,5 \text{ с}$ . – степень селективности.

*III ступень*. Применяется в случаях неудовлетворительной чувствительности II ступени.

Определим ток срабатывания исходя из требуемого коэффициента чувствительности при однофазном КЗ в конце зоны.

$$k_{ч.т} = \frac{3I_{0з.мин}}{I_{0с.з.}^{III}}; \quad I_{0с.з.}^{III} \leq \frac{3I_{0з.мин}}{k_{ч.т}} \quad (3.48)$$

$$I_{0с.з.}^{III} = \frac{1046}{1,75} = 598 \text{ A};$$

$$I_{0с.р.}^{III} = \frac{598}{30} \approx 20 \text{ A}.$$

*IV ступень*. Ток срабатывания отстраивается от тока небаланса в нулевом проводе ТТ при трехфазных КЗ за трансформатором (точка КЗ на рисун-

ках 3.1-3.2).

$$I_{ос.з}^{IV} = k_{отс} \cdot k_{пер} \cdot k_{нб} \cdot I_{расч}, \quad (3.49)$$

где  $k_{отс} = 1,25$ ;  $k_{пер} = 1$ , при  $t_{с.р}^{IV} = 0,6с$  - учитывает увеличение тока небаланса в переходном режиме,  $k_{нб} = 0,05...1$ , при  $I_{расч} > (2...3) I_{ном,Т}$  - коэффициент небаланса, зависящий от кратности тока к номинальному току ТТ.

$$I_{расч}^{(3)} = 360 \text{ А}, \quad I_{ос.з}^{IV} = 1,25 \cdot 1 \cdot 0,1 \cdot 360 = 45 \text{ А}.$$

$$I_{ос.р.}^{IV} = \frac{45}{30} = 1,5 \text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности проверяем при  $K^{(1)}$  в конце зоны резервирования:

$$k_{ч} = \frac{I_{о.мин}}{I_{ос.з}^{IV}} = \frac{1675}{45} = 37,2 > 1,2. \quad (3.50)$$

Время срабатывания определяется из условия отстройки от  $t_{с.з}$  последних ступеней защиты трансформатора:

$$t_{с.з.}^{IV} = t_{сзсм} + \Delta t = 1,5 + 0,5 = 2,0 \text{ с}. \quad (3.51)$$

### 3.3.3 Расчет параметров срабатывания токовой отсечки

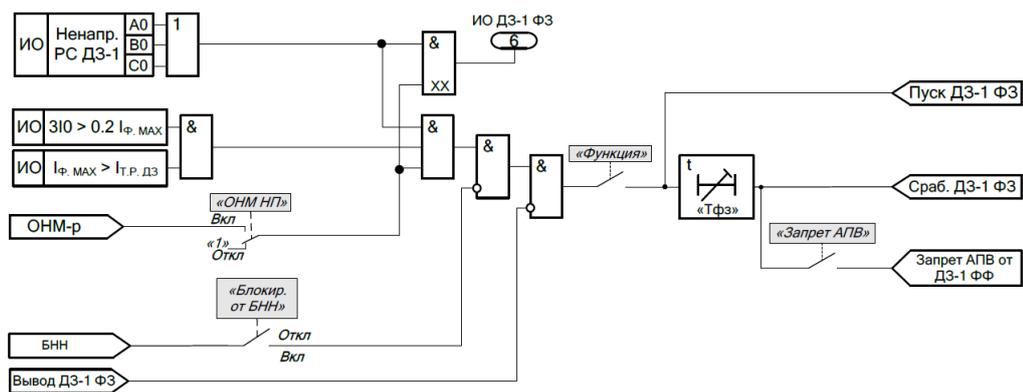
Шкаф ШЭЛТ-КСЗ-011, выполнен на базе терминала «Сириус-3-ЛВ-03». Шкаф представляет собой низковольтное комплектное устройство, выполненное в конструктиве «Rittal», с применением комплектующих ведущих мировых производителей.

Структурная схема устройства «Сириус-3-ЛВ-03» аналогично схеме, представленной на рисунке 3.5 выше, для ДФЗ.

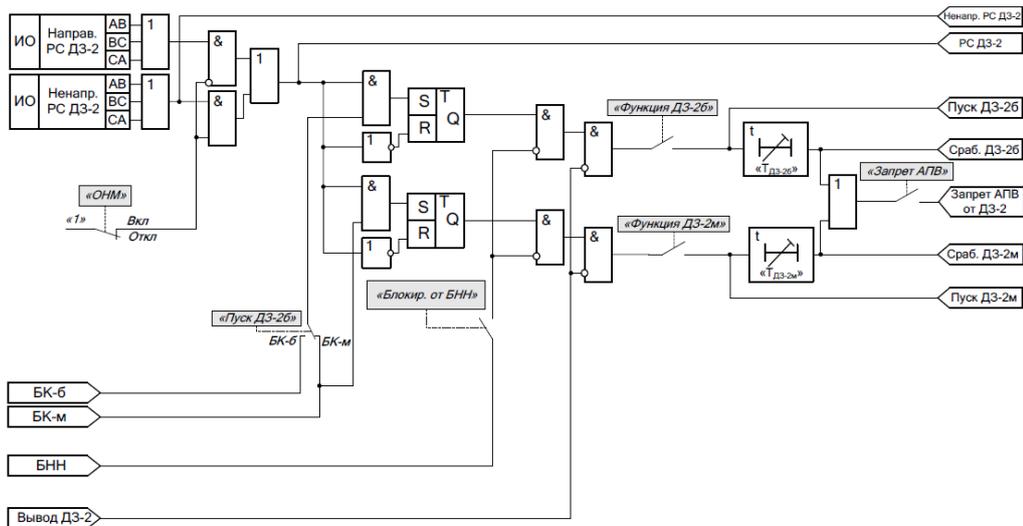
Функционально-логическая схема блоков ДЗ представлены на рисунке 3.6, а-в.

Функционально-логическая схема блока ТО показана на рисунке 3.7. ТО предназначена для резервирования действия ступеней ДЗ при неисправностях в цепях напряжения. С помощью уставки «Функция» в группе уставок «ТО» имеется возможность задать режим работы ТО:

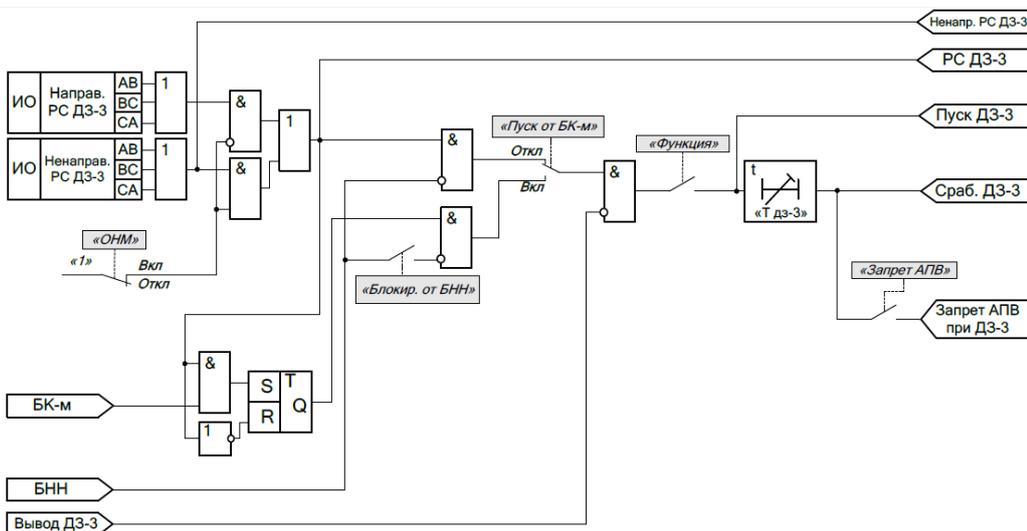
- постоянное действие (значение уставки «Вкл»);
- ускоряющая отсечка – вводится в работу только на заданное время после включения выключателя («УсОтс»);
- ступень аварийной защиты – вводится в работу при выявлении неисправностей в цепях ТН («Авар»);
- аварийная и ускоряющая защита – вводится в работу на заданное время после включения выключателя или при выявлении неисправностей в цепях ТН (объединение логики ускоряющей отсечки и ступени аварийной защиты; «Авар&УсОтс»). Для оперативного вывода из действия ТО используется общий сигнал для всех токовых защит от дискретного входа «Вывод ТЗ». Предусматривается возможность ввести запрет АПВ при срабатывании ТО. (уставка «Запрет АПВ»).



а)



б)



в)

Рисунок 3.6 – Функционально-логические схемы блоков ДЗ:

а – ДЗ-1; б – ДЗ-2; в – ДЗ-3 и ДЗ-4

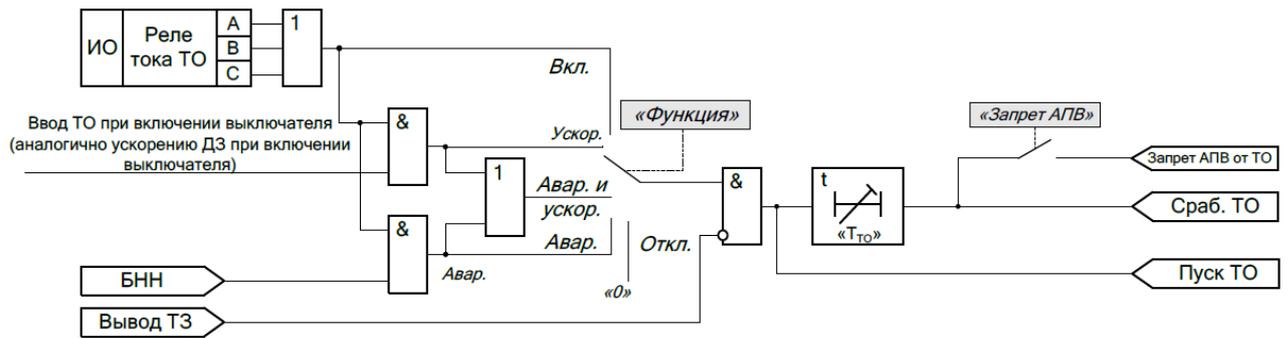


Рисунок 3.7 – Функционально-логическая схема блока ТО

Ток срабатывания отсечки (ТО) отстраивается от максимального тока, протекающего через защиту при следующих расчетных условиях [9]:

а) отстройка от максимального тока линии при КЗ на шинах приемной подстанции в т. К1  $I_{K1}^{(3)} = 1673 \text{ A}$ ;

б) отстройка от максимального тока линии при КЗ на шинах подстанции в месте установки защиты (КЗ “за спиной”) в т. К0  $I_{K0}^{(3)} = 2393 \text{ A}$ ;

Ток срабатывания отсечки выбирается по наибольшему из полученных значений токов:

$$I_{с.з.} = k_z \cdot I_{макс.} = 1,2 \cdot 2393 = 2872 \text{ A.} \quad (3.52)$$

Рекомендуется определить чувствительность отсечки при двухфазном КЗ в начале линии [11]. Отсечка может рекомендоваться к установке, если

$$k_{ч} = \frac{I_{K0}^{(2)}}{I_{с.з.}} = \frac{1451}{2872} = 0,51 < 1,2, \quad (3.53)$$

следовательно, отсечка нецелесообразна. Она защитит только часть воздушной линии. Ниже, по тому же шкафу ШЭЛТ-КСЗ-011, произведем расчет дистанционной защиты от междуфазных повреждений.

### 3.3.4 Расчет параметров срабатывания дистанционной защиты от междуфазных повреждений

Дистанционные защиты используются в сетях сложной конфигурации для защиты линий от междуфазных КЗ. Эти защиты приходят в действие при снижении сопротивления в сети, т.е. являются минимальными. Основными преимуществами дистанционных защит по сравнению с токовыми защитами являются независимость защищаемой зоны при изменении уровня токов КЗ, т.е. при изменении режима работы сети, а также направленность действия. Селективность защит смежных линий обеспечивается введением ступенчатых выдержек времени: все КЗ в пределах I зоны (ступени), ближайшей к месту установки защиты, отключаются с минимальным временем; все КЗ в пределах II зоны с большим временем; КЗ в пределах последней, III зоны, отключаются с наибольшим временем. Измерительными органами защиты являются направленные реле полного сопротивления, которые называются дистанционными органами (реле I и II ступеней) и пусковыми органами (реле III ступени) [1, 9].

Как и для отсечки, для дистанционной защиты используем тот же шкаф ШЭЛТ-КСЗ-011.

1) Характеристика срабатывания *I ступени* имеет форму окружности, проходящей через начало координат.

Сопротивление срабатывания определяется:

$$Z'_{с.з} \leq \frac{Z_{л1}}{k_{отс}}, \quad (3.54)$$

где  $k_{отс}=1,2$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности ТТ и ТН и необходимый запас,

Линия ВЛ-110 кВ выполнена проводом АС-240/56 определяем активное и реактивное сопротивления линии:  $r_y = 0,118$  Ом/км;  $x_y = 0,4$  Ом/км[1].

Тогда с учетом длины 27,102 км:

$z_l = 0,118 * 27,102 + j0,4 * 27,102 = 3,198 + j10,841 = 11,303 \angle 74^\circ \text{ Ом}$  - сопротивление защищаемой линии.

$$Z'_{c.з} \leq \frac{11,303}{1,2} = 9,4 \text{ Ом.}$$

Приведем  $Z'_{c.з}$  ко вторичной стороне.

Коэффициенты трансформации трансформаторов напряжения и тока (обоснованы и найдены ранее):

$$k_u = 1100 ;$$

$$k_I = 30 .$$

$$Z'_{c.п.} = Z'_{c.з.} \frac{k_I}{k_u} = 9,4 \cdot \frac{30}{1100} = 0,26 \text{ Ом.} \quad (3.55)$$

Коэффициент чувствительности для первой ступени ДЗ обычно не рассчитывается, так как первая ступень обычно чувствительность обеспечивает.

Отстройка от КЗ на шинах подстанции в месте установки защиты не производится, так как все ступени защиты выполнены направленными.

2) Сопротивление срабатывания *II ступени*  $Z''_{c.з}$  определяем исходя из обеспечения  $k_{ч}$ , чувствительность проверяем при металлическом к.з. в конце линии, отстройка защиты производится от к.з. за трансформатором приемной подстанции:

$$Z''_{c.з.} = k_3 \left( z_l + j \frac{(1 - \Delta U)^2}{k_{\text{мох}}} x_m \right). \quad (3.56)$$

где  $\Delta U$  - наибольший относительный предел регулировки напряжения силового трансформатора, равен 0,16 при регулировке  $\pm 16\%$ .

$k_{\text{ток}}$  – коэффициент токораспределения при к.з. за трансформатором:

$k_{\text{ток}} = I_{\text{з.выб.}}/I_{\text{T}} = 0,5$  (т.к. ток распределяется между обмотками СН и НН трансформатора равномерно).

$x_m$  - сопротивление трансформатора, Ом:

$$x_m = \frac{U_K U_H^2}{100 S_H} = \frac{10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 6,3} = 220,417 \text{ Ом.} \quad (3.57)$$

$$Z_{\text{с.з.}}'' = 1,2 \cdot \left( 3,198 + j10,841 + j \frac{(1-0,16)^2}{0,5} 220,417 \right) = 3,838 + j386,27 = 386,289 \angle 89 \text{ Ом.}$$

$$k_{\text{ч}}'' = \frac{Z_{\text{с.з.}}''}{Z_{\text{л}}} = \frac{386,289}{11,303} = 34,2 \geq 1,25. \quad (3.58)$$

$$Z_{\text{с.р.}}' = Z_{\text{с.з.}}'' \frac{k_I}{k_{\text{II}}} = 386,289 \cdot \frac{30}{1100} = 10,535 \text{ Ом.} \quad (3.59)$$

Выдержка времени защиты должна быть на ступень больше максимальной выдержки времени максимальных защит отходящих присоединений:

$$t_{\text{с.р.}} = t_{\text{с.з.см.}} + \Delta t, \quad (3.60)$$

где  $t_{\text{с.з.см.}} = 1,5$  с;  $\Delta t = 0,3 \dots 0,6$  с – ступень селективности, принимаем  $\Delta t = 0,5$  с.

Таким образом, выдержка времени защиты:

$$t_{\text{с.з.}}^{\text{II}} = 1,5 + 0,5 = 2,0 \text{ с.}$$

3) При выборе первичного сопротивления срабатывания *III* ступени защиты прежде всего рассматривается возможность отстройки от максимального нагрузочного режима по углу. Для этого следует выбрать угол  $\gamma$  правой боковой стороны характеристики реле сопротивления III ступени:

$$\gamma = \varphi_{\text{нагр}} + \varphi_{\text{доп}}, \quad (3.61)$$

где  $\varphi_{\text{доп}} = 12^\circ$  - дополнительный угол.

Если это условие удовлетворяется, то первичное сопротивление срабатывания III ступени  $Z_{\text{с.з}}^{\text{III}}$  выбирается по условию обеспечения требуемой чувствительности при каскадном отключении металлического КЗ в конце зоны резервирования.

Рассмотрим возможность отстройки по углу.

$$\gamma = \varphi_{\text{наг}} + \varphi_{\text{доп}} = 30 + 12 = 42^\circ. \quad (3.62)$$

Если не удастся обеспечить отстройку от нагрузочного режима по углу, то первичное сопротивление срабатывания III ступени  $Z_{\text{с.з}}^{\text{III}}$  выбирается по условию отстройки от  $Z_{\text{нагр.расч}}$  по выражению:

$$Z_{\text{с.з}}^{\text{III}} \leq \frac{Z_{\text{нагр.расч}}}{k_{\text{отс}} k_{\text{в}}} \frac{\sin \varphi_{\text{нагр.расч}}}{\sin \varphi_{\text{м.ч}}}, \quad (3.63)$$

где  $k_{\text{отс}} = 1,2$ ;  $k_{\text{в}} = 1,1$  - коэффициент возврата реле сопротивления. Или

$$Z_{\text{с.з}}^{\text{III}} \leq \frac{U_{\text{нагр.мин}}}{\sqrt{3} k_{\text{отс}} k_{\text{в}} I_{\text{нагр}}} \frac{1}{\cos(\varphi_{\text{м.ч}} - \varphi_{\text{нагр}})} = \frac{110 \cdot 10^3 \cdot 0,9}{\sqrt{3} \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 84 \cdot \cos(74 - 30)} = 716,638, \quad (3.64)$$

$$Z_{\text{с.р.}}^{\text{III}} = 716,638 \cdot \frac{30}{1100} = 19,545 \text{ Ом}.$$

После этого проверяется, обеспечивается ли требуемый коэффициент чувствительности.

$$k_{\text{ч}} \geq \frac{Z_{\text{с.з}}^{\text{III}} \sin \varphi_{\text{м.ч}}}{Z_3 \sin \varphi_3}, \quad (3.65)$$

При КЗ за трансформатором:

$$k_{\text{ч}} \geq \frac{716,638 \cdot \sin 74}{11,303 \cdot \sin 60} = 70,4 > 1,2.$$

Проверяем чувствительность по току точной работы для каждой ступени. Для этого из технических данных ШЭЛТ-КСЗ-011 при вторичном номинальном токе 5А выбираем согласно полученным данным,  $Z_{\text{уст. min}}$ , кратности регулирования уставки по напряжению и диапазона токов точной работы  $I_{\text{т.р. min}}$ .

Выберем  $Z_{\text{уст. min}}$  – минимальное сопротивление срабатывания реле при 100% включенных витков вторично обмотки его промежуточного трансформатора.

I ступень :  $Z_{\text{уст. min}} = 1 \text{ Ом/ф}$ ,  $I_{\text{т.р. min}} = 1 \text{ А}$ ;

II ступень :  $Z_{\text{уст. min}} = 1 \text{ Ом/ф}$ ,  $I_{\text{т.р. min}} = 1 \text{ А}$ .

Для правильной работы должна быть проверена чувствительность каждой ступени по току точной работы, определяемая коэффициентом чувствительности  $k_{\text{ч.т}}$  при КЗ между тремя фазами в расчетной точке:

$$k_{ч.т.} = \frac{I_{р.мин}}{I_{т.р.мин}}, \quad (3.66)$$

где  $I_{т.р.мин}$  - минимальный первичный ток точной работы рассматриваемой ступени защиты.

Ток  $I_{р.мин}$  для I и II ступеней допустимо определять при КЗ в конце защищаемой линии, при этом минимальное значение  $k_{ч.т.} \geq 1,2$ .

Проверяем чувствительность по току точной работы для первой и второй ступени (для III, как правило, обеспечивается). Для этого из технических данных реле при вторичном номинальном токе  $I_H = 5A$  выбираем согласно полученным данным  $Z_{учт.мин}$ , кратность регулирования уставки по напряжению и диапазона токов точной работы  $I_{з.т.мин}$ :

$$\text{I ступень: } k_{ч.т.} = \frac{I_{р.мин1}}{I_{т.р.мин}} = \frac{1451}{100 \cdot 1} = 14,51 > 1,2; \quad (3.67)$$

$$\text{II ступень: } k_{ч.т.} = \frac{I_{р.мин2}}{I_{т.р.мин}} = \frac{1115}{100 \cdot 1} = 11,15 > 1,2. \quad (3.68)$$

Таким образом, чувствительность дистанционной защиты обеспечивается.

### 3.4 Расчет параметров АПВ

В соответствии с ПУЭ в данной системе устройством АПВ должны оборудоваться все цепи питающей воздушной линии ВЛ-110 кВ[12].

Пуск устройства АПВ осуществляется по факту несоответствия положения ключа управления и самого выключателя.

Множество требований к устройствам АПВ приведены в [1]. Сущность их заключается в том, что для успешного действия АПВ необходимо, чтобы

время срабатывания  $t_{АПВ1}$  было больше времени, необходимого для восстановления готовности привода к работе на включение; времени, необходимого для деионизации среды в точке повреждения; времени готовности выключателя, необходимого для восстановления отключающей способности выключателя после отключения им тока КЗ.

Расчет параметров АПВ сводится к расчету времени срабатывания АПВ, которое не должно быть слишком маленьким. По логике работы АПВ оно должно включать выключатель в голове линии как можно быстрее, но в силу вышеуказанных протекающих физических и переходных процессов, в общей сложности, с учетом времени запаса время срабатывания АПВ должно составлять, не менее:

$$t_{АПВ1} \geq 0,5...0,8 \text{ с.}$$

### **3.5 Расчет параметров защиты минимального напряжения**

Защита минимального напряжения (ЗМН) используется совместно с другими системами, контролирующими состояние электросети. Основная задача такой защиты – обеспечить работу ответственного оборудования при кратковременных понижениях напряжения.

Уставка по напряжению срабатывания такой защиты выбирается равной 70% от номинального напряжения линии, т.е.  $0,7*110 = 77$  кВ, с учетом коэффициента трансформации напряжение срабатывания органа напряжения составит:

$$U_{cp} = 77000/1100 = 70 \text{ В.}$$

Выдержка времени при этом составляет 10-15 с.

### 3.6 Расчет параметров защиты максимального напряжения

Перенапряжение электрической сети представляет серьезную угрозу для любого электрооборудования. Проблема заключается в том, что ввиду природы этого эффекта полностью исключить его проявление невозможно. В связи с этим было разработано несколько решений для защиты электрооборудования, позволяющих минимизировать негативные последствия повышения напряжения.

Грозовое перенапряжение вызывают грозовые разряды, пришедшиеся на ЛЭП. В результате наблюдаются резкие броски напряжения в линии, при этом норма может быть превышена на порядок и более. Время длительности грозовых импульсов редко приближается к 10,0 мс.

Несмотря на столь короткое время величина электрического разряда настолько высока, что подключенное к сети электрооборудование выходит из строя вне зависимости от уровня изоляции.

Для предотвращения такого эффекта в данном проекте будут использованы ограничители перенапряжения (ОПН), общий вид которого представлен на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 –ОПН-110кВ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом выполнения ВКР является расчет комплекса релейной защиты воздушной линии электропередачи ВЛ-110кВ С-405-03, питающей ПС 110/6,6/6,3кВ «Межегей». В результате работы над ВКР решены все задачи.

Дана общая характеристика подстанции 110/6,6/6,3кВ «Межегей» и характеристику питающей ее воздушной линии 110 кВ С-405-03. ПС 110/6,6/6,3кВ «Межегей» включает в себя следующие основные элементы: силовые трансформаторы (типа ТДТНШ-16000/110/6), провода питающих линий (АС-240/56), шины, коммутационная аппаратура высокого напряжения, трансформаторы тока и напряжения.

Изучены общие требования к релейной защите. Основными из них являются быстрдействие, селективность, чувствительность и надежность.

Дан обзор типов устройств РЗА для защиты воздушной линии 110 кВ, конструкций трансформаторов тока и напряжения 110 кВ. Для воздушной линии 110 кВ со сталеалюминевыми проводами наиболее подходящими конфигурациями таких шкафов являются: ШЭЛТ-ДФЗ; ШЭЛТ-ДЗЛ; ШЭЛТ-КСЗ.

Осуществлен выбор защит воздушной линии. Основной защитой воздушных линий 110 кВ являются:

- высокочастотная дифференциально-фазная защита;
- комплект ступенчатых защит (дистанционная защита, токовая отсечка) с передачей разрешающего или блокирующего сигналов;
- токовая защита нулевой последовательности;
- АПВ (для быстрого восстановления питания тупиковой ПС);
- защиты максимального и минимального напряжения.

Рассчитаны параметры срабатывания устройств РЗА ВЛ 110 кВ, АПВ, защиты минимального напряжения, защиты максимального напряжения. Данные расчеты произведены при согласовании с предварительно рассчитанными величинами токов короткого замыкания.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения [Текст] : учеб. для вузов / В. А. Андреев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2006. – 639 с.
2. Андреев, В. А. Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах [Текст] : учеб. пособие / В. А. Андреев. – М. : Высш. шк., 2008. – 252 с.
3. Булычев В.А. Основные защиты линий. Рекомендации по выбору параметров срабатывания. Учебное пособие / Булычев В.А., Бычков Ю.В., Ясина З.В. – Чебоксары: ИПК РЗА, 2019. – 160 с.
4. Дьяков, А. Ф. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем [Текст] : учеб. пособие / А. Ф. Дьяков, Н. И. Овчаренко. – М. : МЭИ, 2008. – 335 с.
5. ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения : ГОСТ 2.755–87. – Введ. 01.01.1988. – URL: [http://standartgost.ru/g/ГОСТ\\_2.755-87](http://standartgost.ru/g/ГОСТ_2.755-87) (дата обращения 25.05.2023).
6. ЕСКД. Правила выполнения схем : ГОСТ 2.710–81. – Введ. 01.07.1981. – URL: [http://standartgost.ru/g/ГОСТ\\_2.710-81](http://standartgost.ru/g/ГОСТ_2.710-81) (дата обращения 25.05.2023).
7. Киреева, Э.А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем [Текст] : учеб. для вузов / Э. А. Киреева, С. А. Цырук. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 288 с.
8. Копьев, В. Н. Релейная защита. Принципы выполнения и применения [Текст] : учеб. пособие / В. Н. Копьев. – Томск : Изд-во ТПУ, 2009. – 153 с.
9. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст] : учеб. для студ. вузов, обуч. по курсу "Электроснабжение промышленных предприятий" / Б. И. Кудрин. – М. : Интермет Инжиниринг, 2005. – 671 с.

10. Лопухова, Т. В. Особенности конструкции трансформаторов с элегазовой изоляцией / Т. В. Лопухова, Ю. Н. Зацаринная, Р. Н. Балобанов // Вестник Казанского технологического университета, 2013: сайт. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-konstruktsii-transformatorov-s-elegazovoy-izolyatsiey> (дата обращения 25.05.2023).

11. НТЦ «Сириус». Руководство по эксплуатации блоков Сириус-2(21): сайт / Каталог. – URL: <https://www.rza.ru/catalog/zashchita-i-avtomatika-prisoedineniy-vvodov-i-bsk-dla-setey-6-35-kv/sirius-2-1-i-sirius-21-1.php> (дата обращения 25.05.2023).

12. Правила устройства электроустановок. – 7-е издание. - СПб.: Издательство ДЕАН, 2013. – 701 с.

13. Провод АС 240/56: вес, диаметр, сечение и другие характеристики: сайт / Каталог. – URL: <https://linijaorpgy.ru/provod-as-240-56-ves-diametr-sechenie-i-drugie-karakteristiki/> (дата обращения 25.05.2023).

14. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования; дата введ. 23.03.1998. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – 131 с. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200031256> (дата обращения 25.05.2023).

15. Реле электрические. Термины и определения : ГОСТ 16022-83. – Введ. 01.01.1985. – URL: <http://gostexpert.ru/gost/gost-16022-83> (дата обращения 25.05.2023).

16. Соколова, В. Н. Электрические схемы электростанций и подстанций [Текст] : лабораторный практикум / В. Н. Соколова, М. Д. Богатырев ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Поволжский государственный технологический университет". - Йошкар-Ола : ПГТУ, 2018. – 124 с.

17. Трансформатор напряжения элегазовыйЗНОГ-110 (У1, УХЛ1): сайт / Каталог. – URL: [https://zeto.ru/products\\_and\\_services/high\\_voltage\\_equipment/transformatory-napryajeniya-izmeritelnye-elegazovye](https://zeto.ru/products_and_services/high_voltage_equipment/transformatory-napryajeniya-izmeritelnye-elegazovye)(дата обращения 25.05.2023).

18. Трансформатор типа ТДТНШ-16000/110-У1: сайт / Каталог. – URL: <https://electro.mashinform.ru/transformatory-vzryvozashchishchennye-shahtnye/transformator-tipa-tdtnsh-16000-110-u1-obj3370.html> (дата обращения 25.05.2023).

19. Трансформатор тока ТОГФ-110 с азотной изоляцией:сайт / Каталог. – URL:<http://zaokurs.ru/uploads/files/89/togf-110sazotnoyizolyacieu.pdf>(дата обращения 25.05.2023).

20. Трансформатор тока ТРГ-УЭТМ 110/220 кВ: сайт / Каталог. – URL:<https://dv-electro.ru/izmeritelnye-transformatory/transformatory-110-220-kv>(дата обращения 25.05.2023).

21. Трансформаторы напряжения ЗНГ-УЭТМ®-110:сайт / Каталог. – URL: <http://www.uetm.ru/katalog-produktsii/item/znguetm110/>(дата обращения 25.05.2023).

22. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия : ГОСТ 1983-2001. – Введ. 01.01.2003. – URL: [http://standartgost.ru/g/ГОСТ\\_1983-2001](http://standartgost.ru/g/ГОСТ_1983-2001) (дата обращения 25.05.2023).

23. Трансформаторы тока ТРГ-УЭТМ®-110:сайт / Каталог. – URL: <http://www.uetm.ru/katalog-produktsii/item/trguetm110/>(дата обращения 25.05.2023).

24. Трансформаторы тока элегазовые с фарфоровой изоляцией ТОГФ-110, 220 (УХЛ1):сайт / Каталог. – URL: [https://zeto.ru/products\\_and\\_services/high\\_voltage\\_equipment/elegazovye-transformatory-toka-serii-togf-110-220-330-500](https://zeto.ru/products_and_services/high_voltage_equipment/elegazovye-transformatory-toka-serii-togf-110-220-330-500)(дата обращения 25.05.2023).

25. Трансформаторы тока. Общие технические условия : ГОСТ 7746-2001. – Введ. 01.01.2003. – URL: <http://standartgost.ru/en/129191> (дата обращения 25.05.2023).

26. Шабад М. А. Автоматизация распределительных электрических сетей с использованием цифровых реле [Текст] :учеб. пособие / М. А. Шабад. – СПб. : ПЭИПК, 2011. – 56 с.

27. Шабад М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей [Текст] :учеб. для вузов / М. А. Шабад. – 5-е изд., испр. и доп. – СПб. : ПЭИПК, 2012. – 350 с.

28. Шкафы релейной защиты и автоматики ШЭЛТ:сайт / Каталог. – URL: <https://iicom.kz/production/shkafy-releynoy-zashchity-i-avtomatiki/shkafy-releynoy-zashchity-i-avtomatiki-shelt/> (дата обращения 25.05.2023).

29. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита [Текст]: производственно-практическое издание / Э. М. Шнеерсон. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

30. ШЭЛТ-КСЗ :сайт / Каталог. – URL: <https://eltranssib.ru/shelt-ksz/>(дата обращения 25.05.2023).

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО  
«Сибирский федеральный университет»  
институт

«Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

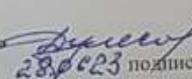
 А.С. Торопов  
подпись      инициалы, фамилия

« 29 » 06 2023 г.

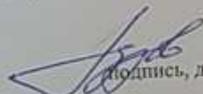
### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
код – наименование направления

Расчет комплекса релейной защиты воздушной линии электропередачи  
ВЛ-110кВ С-405-0,3 питающей ПС 110/6,6/6,3 кВ ООО УК «Межегейуголь»  
тема

Руководитель  доцент каф. ЭМиАТ, к.э.н. Н. В. Дулесова  
28.06.23      подпись, дата      должность, ученая степень      инициалы, фамилия

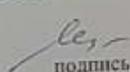
Выпускник

 Г. В. Гузов  
подпись, дата 27.06.2023

Г. В. Гузов

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

 И.А. Кычакова  
подпись, дата 28.06.2023

И.А. Кычакова  
инициалы, фамилия

Абакан 2023