Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
**«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»**

**Факультет:** Профессионального образования
**Направление:** 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
**Профиль:** Автоматизированный электропривод и робототехнические комплексы
**Кафедра:** Общенаучных дисциплин

Допускается к защите
и.о. зав. кафедрой ОНД
К.В. Кондратьева
«___» _____ 2026 г.

# ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

**на тему:**

«Разработка схемы защиты трансформаторной подстанции 110/35/6 кВ от токов короткого замыкания подстанции Снежная г. Гремячинск»

Студент: _____ Никитин И.С.
(подпись, дата)

Группа: АЭП-21-1бзЛФ

Состав ВКР:
1. Пояснительная записка на 83 стр.
2. Графическая часть на 4 листах.
3. Электронный носитель с материалами ВКР.

Руководитель: _____ ст. преподаватель кафедры ОНД, С.А. Нечаев
(подпись, дата)

Проверено
на наличие
заимствования: _____ канд. экон. наук, доцент, К.В. Кондратьева
(подпись, дата)

Лысьва 2026

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
**«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»**

**Факультет:** Профессионального образования
Направление: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Профиль: Автоматизированный электропривод и робототехнические комплексы
Кафедра: Общенаучных дисциплин

**УТВЕРЖДАЮ**
и.о. зав. кафедрой ОНД
К.В. Кондратьева
«___» _____ 2026 г.

**ЗАДАНИЕ**
**на выпускную квалификационную работу**

Фамилия, имя, отчество: Никитин Иван Сергеевич
Группа: АЭП-21-1бзЛФ
Начало выполнения работы: 05.02.2026 г.
Срок предоставления на кафедру: 20.06.2026 г.
Защита работы на заседании ГЭК: 25.06.2026 г.

1. Выпускная квалификационная работа на тему:

«Разработка схемы защиты трансформаторной подстанции 110/35/6 кВ от токов короткого замыкания подстанции Снежная г. Гремячинск».

2. Исходные данные к работе: техническая документация на трансформаторную подстанцию, сведения о существующих нагрузках, материалы по структуре электрических сетей и микропроцессорным устройствам релейной защиты, нормативно-техническая и учебная литература по электроэнергетике, электротехнике, релейной защите и автоматике.

3. Содержание пояснительной записки:

Введение. Отразить актуальность выбранной темы, сформулировать цель и конкретные задачи работы, конкретизировать объект и предмет исследования, методы выполнения работы, теоретическое значение и практическую значимость для исследуемого объекта. Увязать решение темы ВКР с задачами надежного электроснабжения и развития электротехнических комплексов.

Основная часть:

а) Исследовательский раздел. Рассмотреть общую характеристику объекта исследования, структуру электросетей, назначение релейной защиты и автоматики, требования к защите трансформаторной подстанции от токов короткого замыкания.

Выполнить анализ современных микропроцессорных устройств защиты и обосновать выбранные технические решения

б) Описательный раздел. Описать комплектное устройство защиты и автоматики присоединений 6-35; 0,4 кВ ТЭМП 2501-31, его назначение, технические данные, характеристики надежности, функции защиты, автоматики, связи с АСУ ТП, измерения и регистрации аварийных параметров.

в) Расчетный раздел. Оформить расчет токов короткого замыкания, релейной защиты, максимальной токовой защиты, контактных соединений, заземляющих устройств и молниезащиты. Расчетная часть выполняется по предоставленному исходному тексту без перерасчета численных данных.

г) Раздел охраны труда. Отразить общие требования безопасности при выполнении работ в электроустановках, требования к обслуживанию силовых трансформаторов и правила пользования средствами защиты.

Заключение. Кратко изложить решаемые в рамках ВКР задачи и полученные результаты, показать их соответствие теме и заданию ВКР, определить практическую значимость работы и перспективы дальнейшего применения разработанных решений.

4. Дополнительные указания: расчетную часть оформить без перерасчета численных данных; рисунки и схемы из файлов «Схема №1», «Схема №2», «Схема №3» и «Схема №4» вставить в приложения пояснительной записки.

5. Основная литература:

- ГОСТ 7.32-2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

- Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Энергосервис, 2023.

- Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии. М.: Энергосервис, 2023.

- Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. М.: Минтруд России, 2020.

- Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Академия, 2004.

- Розанов Ю.К., Лепанов М.Г. Силовая электроника: учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт, 2021.

Руководитель ВКР _____ ст. преподаватель кафедры ОНД, С.А. Нечаев

(подпись, дата)

Задание получил _____ Никитин И.С.

(подпись, дата)

# КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ

# ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

| № п/п | Наименование этапа | Объем этапа, в % | Сроки выполнения | | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | начало | конец | |
| 1 | Получение задания на выполнение ВКР. | 10 /10 | 05.02.26 | 10.02.26 | |
| 2 | Написание ВКР. | 20/30 | 10.02.26 | 22.05.26 | |
| 3 | Оформление пояснительной записки. | 30/60 | 23.05.26 | 14.06.26 | |
| 4 | Представление работы на проверку и отзыв руководителя квалификационной работы | 15/75 | 17.06.26 | 19.06.26 | |
| 5 | Представление ВКР на проверку заведующему кафедрой | 10/85 | 19.06.26 | 21.06.26 | |
| 6 | Защита на заседании ГЭК | 7/92 | 25.06.26 | 26.06.26 | |

Руководитель ВКР _____ ст. преподаватель кафедры ОНД, С.А. Нечаев
(подпись, дата)

«С календарным графиком ознакомлен» _____ Никитин И.С.
(подпись, дата)

## Содержание

Введение ... 8
1 Общая характеристика объекта исследования и средств релейной защиты ... 10
1.1 Организационная структура электросетей ... 10
1.2 Структура построения электросетей ... 12
1.3 Структурная схема цифрового устройства защиты ... 12
1.4 Характеристика подстанции 110/35/6 кВ Снежная ... 14
1.5 Силовое оборудование и распределительные устройства ... 16
1.6 Классификация коротких замыканий и аварийных режимов ... 16
1.7 Требования к релейной защите и автоматике ... 17
1.8 Обоснование принятого технического решения ... 17
1.9 Анализ возможных отказов устройств релейной защиты ... 18
1.10 Требования к текстовой документации и схемам ... 19
1.11 Роль расчетной части в обосновании схемы защиты ... 20
1.12 Выводы по разделу 1 ... 22
2 Описательная часть ... 23
2.1 Комплектное устройство защиты и автоматики присоединений 6-35; 0,4 кВ ТЭМП 2501-31 ... 23
2.2 Технические данные и характеристики ... 26
2.3 Характеристики надежности устройства ... 29
2.4 Технические параметры и характеристики функций защит ... 30
2.5 Технические параметры и характеристики функций автоматики ... 31
2.6 Устройство и работа (принцип действия) ... 32
2.7 Разработка схемы защиты распределительной части подстанции ... 39
2.8 Логика действия максимальной токовой защиты ... 40
2.9 Защита от замыканий на землю ... 41
2.10 Управление выключателем и дискретные цепи ... 41
2.11 Связь с АСУ ТП и регистрация аварийных событий ... 41

2.12 Сопоставление принятого решения с известными техническими решениями ..... 42
2.13 Проверка согласования схемы защиты с эксплуатационными режимами . 42
2.14 Требования к монтажу и наладке цепей РЗА ..... 44
2.15 Эксплуатационная документация и контроль исправности защиты ..... 46
2.16 Выводы по разделу 2 ..... 47
3 Расчетная часть ..... 49
3.1 Расчет силы токов короткого замыкания ..... 49
3.2 Расчет релейной защиты ..... 52
3.3 Расчет максимальной токовой защиты ..... 54
3.4 Расчет контактов ..... 55
3.5 Заземляющие устройства ..... 56
3.6 Расчет заземляющих устройств ..... 57
3.7 Молниезащита ..... 59
3.8 Расчет молниезащиты ..... 60
3.9 Пояснение к применению расчетной части ..... 61
3.10 Проверка соответствия расчетных результатов требованиям защиты ..... 62
3.11 Учет погрешностей и эксплуатационных факторов ..... 62
3.12 Выводы по разделу 3 ..... 70
4 Охрана труда и безопасность выполнения работ ..... 71
4.1 Общие требования ..... 71
4.2 Работа по обслуживанию силовых трансформаторов ..... 72
4.3 Правила пользования средствами защиты в электроустановках ..... 72
4.4 Требования электробезопасности при работах в РУ 110/35/6 кВ ..... 73
4.5 Организация безопасной проверки устройств РЗА ..... 74
4.6 Пожарная безопасность и действия при аварийной ситуации ..... 74
4.7 Выводы по разделу 4 ..... 74
Заключение ..... 77
Список использованных источников ..... 78

## Обозначения и сокращения

АВР – автоматический ввод резерва,

АПВ – автоматическое повторное включение,

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом,

АЦП – аналого-цифровой преобразователь,

АЧР – автоматическая частотная разгрузка,

ЗОФ – защита от обрыва фаз,

КРУ – комплектное распределительное устройство,

КТП СН – комплектная трансформаторная подстанция собственных нужд,

МТЗ – максимально-токовая защита,

ОЗЗ – однофазное замыкание на землю,

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство,

ПЗУ – постоянное запоминающее устройство,

ПС – подстанция,

РЗА – релейная защита и автоматика,

РБМВ – реле блокировки многократных включений выключателя,

РПВ – реле положения включено,

РПО – реле положения отключено,

РФК – реле фиксации команд,

СВ – секционный выключатель,

ТЗНП – токовая защита нулевой последовательности,

ТСН – трансформатор собственных нужд,

ТТНП – трансформатор тока нулевой последовательности,

УРОВ – устройство резервирования при отказе выключателя,

УСО – устройство сбора данных и согласования с объектом,

ЧАПВ – частотное автоматическое повторное включение,

ШМН – шинка минимального напряжения.

## Введение

Надежность электроснабжения промышленных, коммунальных и бытовых потребителей напрямую зависит от устойчивости работы трансформаторных подстанций и от правильности построения системы релейной защиты и автоматики. Наиболее опасными аварийными режимами для оборудования подстанции являются междуфазные и однофазные короткие замыкания, сопровождающиеся резким ростом токов, термическим и электродинамическим воздействием на токоведущие части, коммутационную аппаратуру и силовые трансформаторы [9].

Актуальность темы определяется необходимостью обеспечения селективного и быстродействующего отключения поврежденных участков сети, снижения вероятности развития аварии и повышения эксплуатационной надежности подстанции Снежная г. Гремячинск. Современная практика эксплуатации электроустановок предъявляет повышенные требования к защите, диагностике, регистрации аварийных событий и обмену данными с автоматизированными системами управления [8].

Традиционные электромеханические устройства защиты постепенно заменяются микропроцессорными терминалами, которые объединяют функции измерения, логической обработки, сигнализации, управления выключателями, регистрации аварийных параметров и передачи данных в АСУ ТП. Такой подход позволяет уменьшить количество отдельных реле, повысить точность уставок, расширить возможности самодиагностики и упростить обслуживание устройства [4].

Объектом исследования является трансформаторная подстанция 110/35/6 кВ Снежная г. Гремячинск и применяемые на ней технические решения по защите от токов короткого замыкания.

Предметом исследования является схема релейной защиты трансформаторной подстанции от токов короткого замыкания с применением микропроцессорного устройства защиты и автоматики.

Цель выпускной квалификационной работы - разработать и оформить схему защиты трансформаторной подстанции 110/35/6 кВ от токов короткого замыкания подстанции Снежная г. Гремячинск.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: рассмотреть структуру электросетей и назначение устройств релейной защиты; проанализировать состав и принцип работы цифрового устройства защиты; описать технические характеристики терминала ТЭМП 2501-31; оформить расчетную часть по токам короткого замыкания и уставкам защиты; представить графическую часть; сформулировать требования охраны труда при эксплуатации электроустановок.

Методическую основу работы составляют анализ нормативно-технических документов, учебной и справочной литературы по электроснабжению, электрическим сетям, релейной защите и автоматике, а также инженерное оформление расчетных материалов, рисунков и схем. Требования к структуре и оформлению пояснительной записки учтены по ГОСТ 7.32-2017 [4].

Практическая значимость работы заключается в подготовке комплекта проектных материалов, который может быть использован при изучении принципов построения защиты трансформаторных подстанций, при анализе схем РЗА и при подготовке эксплуатационной документации.

# 1 Общая характеристика объекта исследования и средств релейной защиты

## 1.1 Организационная структура электросетей

Рассматриваемая подстанция Снежная г. Гремячинск входит в систему электроснабжения промышленного и коммунального назначения. Основной задачей электросетевого подразделения является надёжное и качественное электроснабжение промышленных и сельскохозяйственных потребителей в 5 административных районах Пермского края: Чусовском, Лысьвенском, Горнозаводском, Губахинском, Гремячинском.

Потребителями электроэнергии являются промышленные предприятия, объекты жилищно-коммунальной инфраструктуры, социальные учреждения и бытовые потребители. Для таких объектов особенно важны устойчивость электроснабжения и правильная работа устройств релейной защиты [12].

Надежность работы подстанции определяется исправностью силового оборудования, корректностью выбора уставок защит, состоянием цепей управления и готовностью оперативного персонала к действиям при аварийных режимах [6].

При построении схемы защиты учитываются требования к селективности, чувствительности и быстродействию, а также особенности работы трансформаторов и присоединений среднего напряжения [16].

## 1.2 Структура построения электросетей

Чусовские электросети имеют в своем составе:

Службы:

- подстанций;
- линий электропередач;
- релейной защиты и автоматики;
- средств диспетчерско-технологического управления;
- оперативно-диспетчерская;
- механизации и транспорта;

- организации учёта электроэнергии.

Горнозаводский РЭС с центральной базой в г. Горнозаводске;

Чусовской РЭС с центральной базой в г. Чусовом;

Лысьвенский РЭС с центральной базой в г. Лысьве;

Северный участок на правах РЭС с центральной базой в г. Гремячинске;

Группа АСУ;

Отдел надежности и техники безопасности.

Служба подстанций осуществляет технический контроль над проведением капитальных ремонтов 35 подстанций ЧуЭС.

Служба ЛЭП осуществляет технический надзор, эксплуатацию и ремонт ВЛ-35-220 кВ.

Участок РЗА осуществляет технический надзор, эксплуатацию и ремонт устройств РЗА, автоматики и измерений на объектах, находящихся в ведении как предприятия, так и системы Пермэнерго.

Служба СДТУ производит технический контроль, ремонт и эксплуатацию средств диспетчерско-технологического управления Чусовских эл.сетей, а также системных каналов ТМ и связи. В распоряжении службы 4 узла связи.

Оперативно-диспетчерская служба осуществляет оперативно-диспетчерское управление работой оборудования электрических сетей.

Служба механизации и транспорта осуществляет надзор, эксплуатацию и текущий ремонт транспортных средств автопарка предприятия.

Технический контроль над эксплуатацией оборудования перечисленными выше подразделениями и состоянием охраны труда и техники безопасности осуществляет группа надежности и техники безопасности.

### 1.3 Структурная схема цифрового устройства защиты

Цифровое устройство РЗ представлено на рисунке 1.1. Центральным узлом цифрового устройства является микроЭВМ, которая через свои устройства ввода-вывода обменивается информацией с периферийными узлами. С помощью этих дополнительных узлов осуществляется сопряжение микроЭВМ (микропроцессора) с внешней средой: датчиками исходной информации, объектом управления, оператором и т. д.

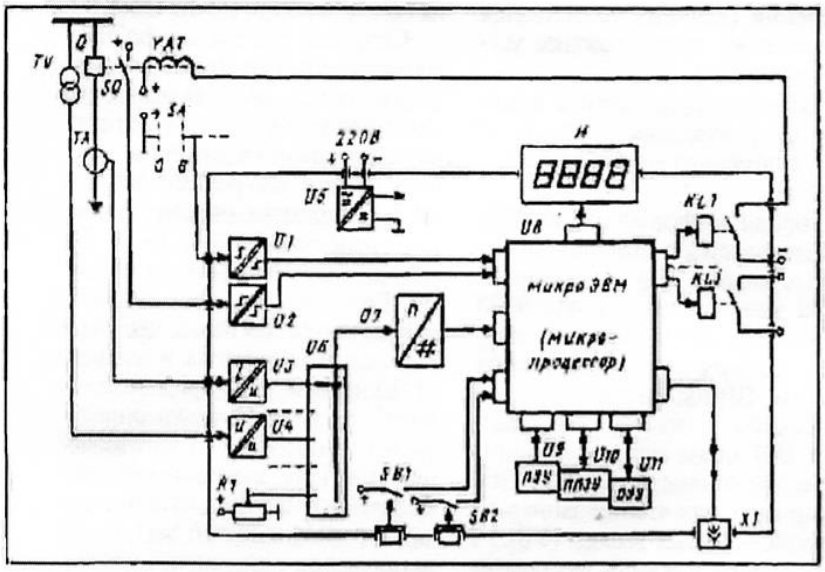


Рисунок 1.1 – Структурная схема цифрового устройства защиты

Непременными узлами цифрового устройства РЗА являются: входные U1—U4 и выходные KL1—KLi преобразователи сигналов, тракт аналого-цифрового преобразования U6, U7, кнопки управления и ввода информации от оператора SB1, SB2, дисплей Н для отображения информации и блок питания U5.

Входные преобразователи обеспечивают гальваническую развязку внешних цепей от внутренних цепей устройства.

Выходные релейные преобразователи. Воздействия реле на защищаемый объект традиционно осуществляется в виде дискретных сигналов управления. При этом выходные цепи устройства защиты выполняются так, чтобы обеспечить гальваническую развязку коммутируемых цепей, как между собой, так и относительно внутренних цепей устройства РЗ. Выходные преобразователи

должны обладать соответствующей коммутационной способностью и, в общем случае, обеспечивать видимый разрыв коммутируемой цепи.

Тракт аналого-цифрового преобразования включает мультиплексор U6 и собственно аналого-цифровой преобразователь (АЦП) — U7. В АЦП осуществляется преобразование мгновенного значения входного сигнала в пропорциональное ему цифровое значение.

Блок питания (БП) — U5 – обеспечивает стабилизированным напряжением все узлы рассматриваемого устройства, независимо от возможных изменений напряжения в питающей сети.

Порт связи с внешними цифровыми устройствами. Достоинством цифровых устройств является возможность передачи имеющейся информации в другие цифровые системы: АСУ ТП, персональный компьютер и т.д.

Требования к релейной защите трансформаторной подстанции

Система релейной защиты трансформаторной подстанции должна обеспечивать надежное выявление аварийного режима, отключение поврежденного элемента и сохранение питания неповрежденных присоединений. К основным требованиям относятся селективность, быстродействие, чувствительность, надежность и устойчивость к ложным срабатываниям. Выполнение указанных требований особенно важно для подстанций, через которые осуществляется питание нескольких групп потребителей [1; 10].

Селективность защиты означает отключение только поврежденного участка сети. При коротком замыкании на отходящем присоединении защита должна отключить соответствующий выключатель, не допуская необоснованного отключения всей секции шин или питающего трансформатора. Быстродействие необходимо для уменьшения термического воздействия токов короткого замыкания и ограничения повреждений оборудования [14].

Чувствительность защиты определяется способностью реагировать на минимальные токи короткого замыкания в расчетной зоне действия. При выборе уставок необходимо учитывать максимальные рабочие токи, пусковые и

переходные режимы, коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов тока, а также возможные погрешности измерительных цепей [1; 15].

Надежность микропроцессорной защиты обеспечивается аппаратной самодиагностикой, контролем питания, контролем цепей управления выключателем, регистрацией событий и возможностью проверки заданных уставок. При этом важную роль играет правильное подключение дискретных входов, выходных реле, токовых цепей и цепей оперативного питания [13].

Применение микропроцессорного устройства защиты позволяет объединить в одном терминале функции максимальной токовой защиты, защиты от замыканий на землю, автоматики повторного включения, сигнализации, телеизмерения и передачи данных в АСУ ТП. По сравнению с традиционными релейными схемами такое решение уменьшает объем вторичной коммутации и облегчает обслуживание [2; 14].

Терминал ТЭМП 2501-31 может использоваться в схемах защиты присоединений 6-35 кВ и в сетях 0,4 кВ. Для рассматриваемой работы он выбран как типовое микропроцессорное устройство, позволяющее показать принципы построения защиты трансформаторной подстанции от токов короткого замыкания, взаимодействие с выключателем и передачу сигналов в цепи управления и сигнализации.

При разработке схемы защиты необходимо обеспечить корректное подключение цепей тока, цепей оперативного питания, дискретных входов и выходных реле. В приложениях приведены структурная схема устройства и схема защиты трансформаторной подстанции от короткого замыкания, которые отражают состав основных блоков и логику взаимодействия терминала с внешними цепями [11].

### 1.4 Характеристика подстанции 110/35/6 кВ Снежная

Подстанция 110/35/6 кВ Снежная рассматривается как узел распределения электроэнергии, через который осуществляется питание потребителей различного назначения. Наличие трех классов напряжения определяет сложность

схемы защиты: повреждение на стороне 110 кВ, 35 кВ или 6 кВ имеет различный уровень тока короткого замыкания, различную зону влияния и разные требования к быстродействию отключения. При разработке схемы защиты необходимо учитывать не только номинальные параметры силового оборудования, но и схему присоединения линий, режим работы нейтрали, состав коммутационных аппаратов и наличие резервных связей [9].

С точки зрения релейной защиты подстанция представляет собой совокупность взаимосвязанных присоединений: силовых трансформаторов, вводов, секций шин, отходящих линий, трансформаторов собственных нужд и цепей оперативного тока. Для каждого присоединения задается собственная зона действия защиты, а работа защит согласуется между собой. При коротком замыкании первой должна сработать защита, ближайшая к месту повреждения, а вышестоящая защита сохраняет резервирующую роль. Это обеспечивает селективность и уменьшает объем отключаемой нагрузки [1].

Таблица 1 – Характеристика распределительных устройств подстанции

| Уровень напряжения | Назначение | Основные элементы | Функции защиты |
|---|---|---|---|
| 110 кВ | Связь с питающей сетью | Вводы, выключатели, ТТ и ТН | Основная и резервная защита |
| 35 кВ | Распределение питания | Секции шин, линии, выключатели | МТЗ, защиты линий, автоматика |
| 6 кВ | Питание отходящих линий и собственных нужд | КРУ, вводы, СВ, кабельные линии | МТЗ, ОЗЗ, АПВ, АВР |

В рамках данной ВКР основное внимание уделено защите распределительной части подстанции и принципам построения схемы защиты от токов короткого замыкания. Применение терминала ТЭМП 2501-31 оправдано для присоединений 6-35 кВ и отдельных цепей 0,4 кВ, поэтому описание устройства относится к той части подстанции, где требуется защита линий, вводов, секционных выключателей и трансформаторов собственных нужд. Для подстанции 110/35/6 кВ это соответствует уровню распределения электроэнергии после силового трансформатора и позволяет связать тему работы с фактически представленными схемами.

### 1.5 Силовое оборудование и распределительные устройства

Силовое оборудование подстанции включает коммутационные аппараты, силовые трансформаторы, измерительные трансформаторы тока и напряжения, сборные шины, кабельные и воздушные линии. Для каждого элемента определяются допустимые токовые нагрузки, термическая и электродинамическая стойкость, условия обслуживания и требования к защите. Ошибка в выборе или согласовании защит может привести к отказу отключения поврежденного участка, повреждению оборудования и снижению надежности электроснабжения потребителей [7].

Силовые трансформаторы являются наиболее дорогостоящими и ответственными элементами подстанции. Они должны защищаться от междуфазных коротких замыканий, повреждений внутри бака, перегрузок, внешних коротких замыканий, понижения уровня масла, газовыделения и недопустимых температурных режимов. Для распределительной стороны 6 кВ особое значение имеет максимальная токовая защита, поскольку она обеспечивает отключение повреждений на отходящих присоединениях и резервирование защит нижестоящих участков [14].

Измерительные трансформаторы тока выполняют преобразование первичного тока до безопасного уровня и гальваническое разделение первичных и вторичных цепей. При выборе трансформаторов тока учитывается коэффициент трансформации, класс точности, предельная кратность, нагрузка вторичной цепи и устойчивость к насыщению. Проверка трансформаторов тока важна для токовых защит, так как насыщение сердечника при аварии может привести к снижению измеряемого вторичного тока и ухудшению чувствительности защиты [10].

### 1.6 Классификация коротких замыканий и аварийных режимов

Короткое замыкание представляет собой ненормальный электрический контакт между фазами, фазой и землей либо между токоведущими частями, которые в нормальном режиме должны быть изолированы друг от друга. В трехфазных сетях различают трехфазные, двухфазные, двухфазные на землю и

однофазные замыкания. Наиболее тяжелым по величине тока часто является трехфазное короткое замыкание, однако для сетей с определенным режимом нейтрали однофазные повреждения также могут представлять значительную опасность [15].

При разработке схемы защиты важно различать внутренние и внешние повреждения относительно выбранной зоны защиты. Внутренним считается повреждение в пределах участка, который данная защита должна отключить без выдержки или с минимальной выдержкой времени. Внешнее повреждение расположено за пределами зоны действия основной защиты, и в этом случае защита может работать как резервная. Согласование этих зон выполняется по току, времени и направлению действия защиты.

### 1.7 Требования к релейной защите и автоматике

К основным требованиям к релейной защите относятся селективность, быстродействие, чувствительность и надежность. Селективность означает отключение только поврежденного элемента сети. Быстродействие снижает термическое и электродинамическое воздействие токов короткого замыкания на оборудование. Чувствительность показывает способность защиты срабатывать при минимальных токах повреждения в конце защищаемой зоны. Надежность включает готовность к действию при реальной аварии и отсутствие ложных срабатываний в нормальных и переходных режимах [1].

Надежность устройств РЗА обеспечивается исправностью входных цепей, блоков питания, выходных реле, клеммных соединений и измерительных преобразователей. Второй уровень связан с корректностью программной логики и уставок. Третий уровень определяется организацией эксплуатации: проверками, испытаниями, ведением журналов, анализом срабатываний и своевременным устранением выявленных дефектов [8].

### 1.8 Обоснование принятого технического решения

В качестве технической основы схемы защиты выбран микропроцессорный терминал, выполняющий функции максимальной токовой защиты, защиты

от замыканий на землю, автоматики повторного включения, управления выключателем и сигнализации. Применение терминала ТЭМП 2501-31 в работе обосновано тем, что устройство рассчитано на присоединения 6-35 кВ и может использоваться в распределительных сетях подстанций [13].

Сравнение с электромеханическими решениями показывает, что микропроцессорное устройство имеет меньший объем монтажных соединений, более гибкую настройку и расширенные диагностические возможности. Однако это решение требует строгого соблюдения правил электробезопасности и проверки цепей оперативного питания, входных дискретных сигналов и выходных команд. Ошибка в параметрировании терминала может иметь такие же последствия, как неправильное подключение отдельного реле.

### 1.9 Анализ возможных отказов устройств релейной защиты

При проектировании схемы защиты необходимо учитывать не только штатную работу терминала, но и возможные отказы отдельных элементов. Отказ может быть связан с потерей оперативного питания, повреждением вторичных цепей трансформаторов тока, ошибкой дискретного входа, неисправностью выходного реле, неправильной уставкой или нарушением связи с системой верхнего уровня. Каждый из этих отказов имеет разные последствия для защищаемого присоединения и должен быть учтен при эксплуатационном анализе.

Наиболее опасным является отказ на отключение при реальном коротком замыкании. В этом случае ток повреждения продолжает протекать через оборудование, что увеличивает термическое воздействие на кабели, шины, трансформаторы тока и выключатель. Для ограничения последствий используется резервирование защит: вышестоящая ступень МТЗ с большей выдержкой времени должна отключить повреждение, если основная защита или выключатель не выполнили свою функцию.

Ложное срабатывание также является нежелательным, поскольку приводит к необоснованному отключению потребителей и нарушению нормального режима электроснабжения. Причинами ложного срабатывания могут быть

неверно выбранные уставки, неправильное подключение измерительных цепей, влияние переходных процессов, обрыв фазных цепей или ошибки в логике дискретных сигналов. Поэтому после монтажа необходимо выполнять комплексную проверку схемы, а после каждого срабатывания - анализировать журнал событий.

Отдельно рассматривается отказ цепей сигнализации. Если защита сработала, но сигнал не поступил на щит управления или в АСУ ТП, оперативный персонал может получить неполную информацию о состоянии оборудования. Это затрудняет локализацию повреждения и восстановление нормального режима. Поэтому цепи сигнализации проверяются вместе с цепями отключения, а в терминале контролируется состояние выходных реле и дискретных входов.

Потеря связи с АСУ ТП не должна приводить к потере защитных функций. Терминал должен сохранять способность измерять токи, сравнивать их с уставками и формировать команду на отключение независимо от состояния канала связи. Канал связи используется для передачи данных, настройки и диагностики, но не должен быть единственным условием действия защиты. Это требование повышает автономность и надежность схемы.

При анализе отказов важно учитывать человеческий фактор. Ошибка при вводе уставок, неправильное положение испытательного блока, оставленная после проверки перемычка или несоответствие исполнительной схемы фактическому монтажу могут привести к неправильной работе защиты. Поэтому в проектной документации должны быть понятные схемы, однозначные обозначения цепей, перечень уставок и порядок проверки.

### 1.10 Требования к текстовой документации и схемам

Пояснительная записка и приложения со схемами должны дополнять друг друга. В тексте раскрываются назначение защиты, принцип действия терминала, расчетные зависимости, требования охраны труда и выводы. В приложениях показываются схемы, которые невозможно полноценно описать только текстом: однолинейная схема подстанции, структурная схема терминала, схема

соединений и принципиальная схема защиты. Такое разделение делает работу более наглядной и соответствует требованиям к ВКР.

Каждый рисунок и схема должны иметь ссылку в тексте до их размещения. Это требование исключает появление иллюстраций, которые не связаны с содержанием пояснительной записки. В данной работе ссылки на приложения А-Г приведены в описательной части и перед заключением, а сами приложения оформлены с указанием буквенного обозначения, заголовка и подписи рисунка. Такой порядок позволяет быстро найти нужный графический материал.

Список использованных источников должен включать только те источники, на которые имеются ссылки в тексте. Поэтому при доработке добавлены ссылки на нормативные требования безопасности, литературу по электрической части подстанций, релейной защите, расчетам уставок и техническому описанию терминала. Наличие ссылок показывает, что проектные решения опираются на учебную, нормативную и техническую базу, а не являются набором неподтвержденных утверждений.

Особое внимание уделяется единообразию терминологии. В тексте используются сокращения РЗА, МТЗ, ОЗЗ, АПВ, АВР, АСУ ТП и другие обозначения, поэтому они вынесены в список обозначений и сокращений. Это облегчает чтение работы и соответствует требованиям к оформлению пояснительной записки. При первом упоминании технических функций желательно использовать полное название, а затем применять сокращение.

Схемы, включаемые в приложения, должны иметь подписи и ссылки в тексте. Отдельная графическая часть в данном варианте не оформляется; все четыре схемы вставлены непосредственно в приложения пояснительной записки.

### 1.11 Роль расчетной части в обосновании схемы защиты

Расчетная часть не ограничивается механическим выполнением формул. Ее назначение заключается в том, чтобы показать, почему выбранные защиты должны сработать при повреждении и не должны сработать при нормальной нагрузке. Для этого рассчитываются токи короткого замыкания, выбираются

токи срабатывания, проверяются коэффициенты чувствительности, а также рассматриваются заземляющие устройства и молниезащита. Даже если численные данные принимаются из исходного материала, логика расчета должна быть понятной.

При расчете токов короткого замыкания важно определить точки, в которых оборудование находится в наиболее тяжелых условиях. Для таких точек определяются суммарные активные и индуктивные сопротивления цепи, токи короткого замыкания и ударные токи. Эти значения используются для проверки аппаратов, шин, кабелей и выбора уставок защиты. В пояснительной записке расчеты должны быть оформлены последовательно, с указанием исходных данных и выводом по результатам.

Расчет уставок релейной защиты связан с требованиями селективности и чувствительности. Ток срабатывания должен быть отстроен от максимального рабочего тока и возможных переходных режимов, но должен обеспечивать срабатывание при минимальном токе повреждения. Если это условие не выполняется, необходимо изменять схему защиты, уточнять коэффициенты трансформации трансформаторов тока или использовать дополнительные защитные функции.

Расчет заземления и молниезащиты показывает связь электротехнической части проекта с требованиями безопасности. Заземляющее устройство снижает опасные напряжения прикосновения и шага, а молниезащита уменьшает риск повреждения оборудования при атмосферных перенапряжениях. Поэтому эти подразделы являются не второстепенными, а необходимыми элементами законченной ВКР по теме защиты подстанции.

В целом расчетная часть подтверждает, что схема защиты рассматривается не только как набор соединений, но как техническое решение, работающее в конкретной электрической сети. Текстовые пояснения к расчетам позволяют связать исходные численные данные с темой подстанции 110/35/6 кВ и с применением терминала в распределительной части объекта.

### 1.12 Выводы по разделу 1

В первом разделе рассмотрены особенности объекта исследования, состав основного оборудования трансформаторной подстанции 110/35/6 кВ и требования к устройствам релейной защиты. Показано, что для распределительной части подстанции существенное значение имеют токовые защиты, защита от замыканий на землю, автоматика управления выключателями и регистрация аварийных событий. Обосновано применение микропроцессорного терминала для построения схемы защиты от токов короткого замыкания.

# 2 Описательная часть

## 2.1 Комплектное устройство защиты и автоматики присоединений 6-35; 0,4 кВ ТЭМП 2501-31

Устройство ТЭМП 2501-31 предназначено для применения в схемах вторичной коммутации на ПС с переменным, выпрямленным переменным или постоянным оперативным током с выполнением необходимых функций по защите, автоматике, управлению и сигнализации различных присоединений комплектных распределительных устройств 6–35 кВ. Допускается использование устройства и в сетях 0,4 кВ. Устройство применяется для селективной защиты от междуфазных коротких замыканий и замыканий на землю в качестве ненаправленной двух- или трехфазной МТЗ и защиты от замыканий на землю в распределительных сетях среднего и низкого напряжения с изолированной или глухо-заземленной нейтралью.

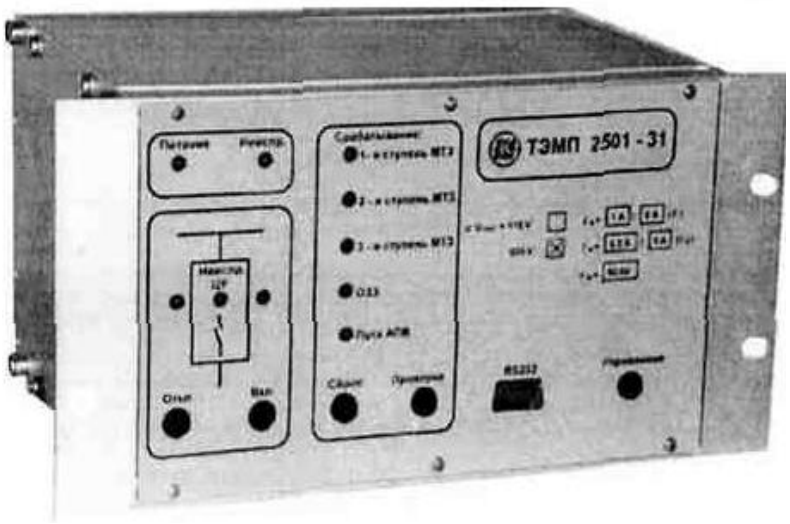


Рисунок 2.1 – Комплектное устройство ТЭМП 2501-31

Устройство предназначено для установки в КСО, КРУ, КРУН, КТП СН электрических станций и подстанций, а также на панелях, в шкафах управления, расположенных в релейных залах и пультах управления. Технические характеристики устройства делают возможным его применение на реконструируемых

объектах небольших ПС промышленных предприятий и сетей с установкой в камерах КСО или КРУН с жесткими температурными условиями эксплуатации.

Устройство обеспечивает взаимодействие с масляными, вакуумными, элегазовыми выключателями, оснащенными различными типами приводных механизмов.

Устройство изготавливается в климатическом исполнении УХЛ3.1 по ГОСТ 15150-69 и предназначено для эксплуатации в следующих условиях:

– верхнее предельное рабочее значение температуры окружающего воздуха плюс 55°С;

– нижнее предельное рабочее значение температуры окружающего воздуха минус 40°С;

– верхнее рабочее значение относительной влажности - не более 80% при плюс 25°С;

– место установки устройства должно быть защищено от попадания брызг воды, масел, эмульсий, а также от прямого воздействия солнечной радиации;

Устройство соответствует группе условий эксплуатации М7 по ГОСТ 17516.1-90, при этом допускаются вибрационные нагрузки с ускорением до 1g в диапазоне частот от 0,5 до 100 Гц.

Устройство выдерживает многократные ударные нагрузки длительностью от 2 до 20 мс с максимальным ускорением 3g.

По требованиям защиты человека от поражения электрическим током устройство соответствует классу 01 по ГОСТ 12.2.007.0-75.

Устройство предназначено для применения в качестве основной или резервной защиты различных присоединений, отдельно или совместно с другими устройствами РЗА, выполненными на различной элементной базе (в т.ч. и на электромеханической элементной базе).

Специальные технические решения, примененные в устройстве, обеспечивают работоспособность системы контроля изоляции цепей постоянного оперативного тока при возникновении замыканий на землю в приёмных цепях устройства.

Устройство ТЭМП 2501-31 выполнено с применением микропроцессорной элементной базы, которая позволяет реализовать многофункциональное устройство, совмещающее функции релейной защиты, управления, автоматики, сигнализации, измерения, регистрации. Наряду с основными функциями устройство выполняет и целый ряд вспомогательных, но крайне полезных функций: обеспечивает связь с сетью АСУ электроэнергетического объекта, фиксирует вид повреждения с записью тока повреждения и момента возникновения аварии, контролирует время включения/отключения выключателя и т.д.

Использование микропроцессорной элементной базы обеспечивает постоянство характеристик, высокую точность измерений, а также возможность реализации различных алгоритмов автоматики, управления, защитных функций.

Устройство ТЭМП 2501-31 обеспечивает следующие функциональные возможности:

В части защит:

- Трехступенчатая ненаправленная МТЗ;
- Одноступенчатая ненаправленная токовая защита от замыканий на землю;
- Защита от несимметричного режима работы нагрузки (обрыва фаз);
- Ускорение второй ступени МТЗ при включении выключателя;
- Наличие двух групп уставок;

В части управления:

- Местное (с ключей на двери релейного шкафа) управление выключателем;
- Дистанционное (через АСУ ТП) управление выключателем;
- Контроль цепей управления (РПО, РПВ);
- Блокировка от многократных включений выключателя;

В части автоматики:

- Одно или двухступенчатое АПВ, ЧАПВ;
- АВР секционного выключателя, при приеме сигнала от внешнего устройства пуска АВР;
- Отключение от внешних цепей (АЧР, ЗМН и др.);

- Реализация алгоритмов автоматики различных присоединений (линия, ввод, секционный выключатель, ТСН 6/0,4 кВ) в одном устройстве (выбирает пользователь);

В части связи с АСУ ТП:

- Реализация функций телеуправления, телеизмерений и телесигнализации;
- Чтение/запись всех параметров нормального, аварийного режима;
- Отдельный порт для связи с АСУ;
- Программное обеспечение для работы с реле;

В части измерения, осциллографирования, регистрации:

- Индикация токов в первичных / относительных величинах;
- Встроенный аварийный осциллограф (действующее значение тока);
- Регистрация аварийных параметров;
- Календарь и часы реального времени.

В устройстве одновременно заложены функции автоматики, управления и сигнализации нескольких видов защищаемых присоединений: линия, ввод, секционный выключатель, ТСН 6/0,4 кВ. Выбор необходимого вида присоединения (функциональной схемы) производится пользователем через меню с использованием кнопок управления на лицевой панели терминалов или с использованием переносного компьютера (в ходе наладочных работ или работ по обслуживанию). Это позволяет иметь небольшую номенклатуру изделий и меньшее число запасных устройств на объекте.

## 2.2 Технические данные и характеристики

Основные технические данные устройства:

номинальный переменный ток, А:

- цепей защиты от междуфазных замыканий – 1 / 5,
- цепей защиты от однофазных замыканий на землю – 0,2 / 1,0;

номинальная частота переменного тока, Гц – 50;

номинальное напряжение

переменного/выпрямленного переменного/постоянного оперативного тока, В – 110 или 220;

рабочий диапазон напряжения оперативного тока, В – от 88 до 242;

потребление:

- цепей переменного тока, ВА/фазу – не более 0,3;

- цепей оперативного тока в состоянии покоя/срабатывания, Вт – не более 7/15;

Электрическая прочность и сопротивление изоляции устройства

Сопротивление изоляции всех независимых цепей устройства (кроме порта последовательной передачи данных) относительно корпуса и между собой в холодном состоянии при температуре окружающей среды (20 ± 5) °С и относительной влажности до 75% составляет не менее 100 МОм.

Характеристики входных и выходных цепей устройства

Клеммные колодки токовых цепей предназначены для присоединения под винт одного или двух одинаковых проводников общим сечением до 6 мм2 включительно и сечением не менее 1 мм2 каждый.

Клеммные колодки цепей питания, входных и выходных цепей предназначены для подсоединения под винт одного или двух одинаковых проводников общим сечением до 2,5 мм2 включительно и сечением не менее 0,5 мм2 каждый. Контактные соединения устройства соответствуют 2 классу по ГОСТ 10434-82.

Цепи переменного тока

Цепи переменного тока защиты от междуфазных замыканий выдерживают без повреждений при номинальном входном токе 1 и 5 А ток:

4 и 20 А длительно;

100 и 500 А в течение 1 с.

Цепи переменного тока защиты от замыканий на землю выдерживают без повреждений при номинальном входном токе 0,2 и 1 А ток:

1,5 и 4 А длительно;

40 и 100 А в течение 1 с.

Устройство правильно функционирует при изменении частоты входных сигналов тока в диапазоне от 45 до 55 Гц. Дополнительная погрешность параметров срабатывания измерительных органов устройства при этом не превышает ± 3 % относительно значений параметров срабатывания, измеренных при номинальной частоте.

Цепи оперативного питания

Устройство предназначено для работы от источника переменного, выпрямленного переменного или постоянного оперативного тока в диапазоне входных напряжений от 88 до 242 В.

Мощность, потребляемая по цепям питания устройства от источника оперативного тока в режиме срабатывания – не более 15 Вт, в дежурном режиме – не более 7 Вт.

Время готовности устройства к действию после подачи напряжения оперативного питания не более 0,15 с. Минимальное время отключения повреждения при одновременной подаче тока повреждения и напряжения оперативного питания не превышает 0,25 с.

Устройство сохраняет заданные функции (в т.ч. с действием выходных реле) без изменения параметров и характеристик срабатывания и перезапуска при кратковременных перерывах питания длительностью до 0,5 с (при минимально допустимом оперативном напряжении 88 В).

Устройство не повреждается и не срабатывает ложно при включении и (или) отключении источника питания, после перерывов питания любой длительности с последующим восстановлением, при подаче напряжения оперативного постоянного тока обратной полярности, а также при замыканиях на землю в сети оперативного постоянного (выпрямленного переменного) тока.

Входные дискретные сигналы

Входные дискретные цепи выполнены с применением опто-электрических преобразователей и обеспечивают гальваническое разделение внутренних цепей устройства с внешними цепями. Количество дискретных входных цепей – 8. Входные дискретные цепи предназначены для работы на постоянном и

переменном оперативном токе. Номинальное значение напряжения входных сигналов составляет 110 или 220 В постоянного/переменного тока (определяется при заказе устройства).

Для защиты от повреждения входных цепей при кратковременных или длительных перенапряжениях в устройстве предусмотрены ограничители перенапряжений (варисторы), уровень среза которых составляет 330 В.

Выходные цепи устройства

Выходные цепи устройства ТЭМП 2501-31 выполнены с использованием малогабаритных реле и обеспечивают гальваническое разделение внутренних цепей устройства с внешними цепями. Количество выходных реле управления коммутационными аппаратами – 3, количество выходных сигнальных реле – 7, из которых одно реле – двухпозиционное. Контакты выходных реле, действующих на цепи управления коммутационными аппаратами, имеют коммутационную способность 5/3/1 А при коммутации цепи постоянного тока напряжением 48/110/220 В с активно-индуктивной нагрузкой и постоянной времени до 0,04 с. Коммутационная износостойкость контактов не менее 1 000 циклов.

Контакты выходных сигнальных реле имеют коммутационную способность не менее 30 Вт в цепях постоянного тока с индуктивной нагрузкой и постоянной времени до 0,02 с при напряжениях от 24 до 250 В или при токе до 1,0 А. Длительно допустимый ток равен 5 А. Контакты допускают включение цепи с током до 10 А в течение 0,5 с и током до 8 А в течение 3 с. Коммутационная износостойкость контактов не менее 23 000 циклов.

Максимальное рабочее напряжение контактов реле 300 В постоянного тока или 440 В переменного тока.

### 2.3 Характеристики надежности устройства

Полный средний срок службы устройства не менее 20 лет при условии проведения требуемых технических мероприятий по обслуживанию. Средняя наработка на отказ не менее 100 000 ч. Среднее время восстановления

работоспособного состояния устройства при наличии полного комплекта запасных блоков – не более 2 ч с учетом времени нахождения неисправности.

### 2.4 Технические параметры и характеристики функций защит

Максимальная токовая защита (МТЗ)

Устройство содержит три ступени МТЗ:

– 1 ступень – отсечка;

– 2 ступень – с независимой от тока выдержкой времени;

– 3 ступень – как с независимой, так и с зависимой от тока выдержкой времени.

Ввод/вывод ступеней защит и выбор вида характеристики производится с помощью программных переключателей в соответствии с требуемыми уставками. Ступени МТЗ выполнены как ненаправленные, в однофазном, двухфазном или трехфазном исполнении. Каждая из ступеней МТЗ (кроме 1 ступени) выполнена с несколькими выдержками времени для организации возможности раздельного действия на цепи отключения, сигнализации, автоматики. Предусмотрено две группы уставок (основные и вторичные) по току и времени, а также блокирование ступеней МТЗ внешними дискретными сигналами (по выбору). Переключение групп уставок может производиться по факту срабатывания дискретного входного сигнала (по выбору).

Устройство позволяет использовать 2 ступень МТЗ в качестве защиты от асинхронного хода двигателей, при этом диапазон выдержек времени на возврат составляет от 0,04 до 10 с.

Устройство обеспечивает организацию цепей логической селективности (логическая защита шин), при этом на выходное реле выдается сигнал пуска 2 или 3 ступени МТЗ.

Защита от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ)

Для токовой защиты от однофазных замыканий на землю в составе устройства предусмотрена одна ступень ОЗЗ, которая может выполняться как с

независимой, так и с зависимой от тока выдержкой времени. Ввод и вывод ступени защиты, а также выбор вида характеристики выполняются в соответствии с требуемыми уставками. Ступень ОЗЗ имеет две выдержки времени, что позволяет организовать раздельное действие на цепи отключения и сигнализации.

Предусмотрено две группы уставок (основные и вторичные) по току и времени, а также блокирование ступени внешними дискретными сигналами (по выбору).

Защита от несимметричного режима работы нагрузки (защита обрыва фаз – ЗОФ)

Защита может работать в двухфазном или трехфазном режиме с независимой от тока характеристикой срабатывания. Защита от обрыва фаз выполнена с двумя выдержками времени для организации раздельного действия на цепи отключения, сигнализации, автоматики. Ввод/вывод ступени защиты производится программными переключателями. Предусмотрено две группы уставок (основные и вторичные) по току и времени. Переключение групп уставок производится по факту срабатывания дискретного входного сигнала (по выбору).

## 2.5 Технические параметры и характеристики функций автоматики

Автоматическое повторное включение (АПВ)

Устройство обеспечивают однократное или двукратное АПВ присоединения (вводной выключатель, выключатель линии и ТСН 6/0,4 кВ). Ввод/вывод АПВ производится программными переключателями, а также внешним дискретным сигналом («Ключ АПВ»). Пуск АПВ происходит при обнаружении цепи несоответствия между последней поданной командой (фиксируется специальным реле фиксации команд – РФК) и положением выключателя (положение РПО). Диапазон уставок по времени срабатывания первой ступени АПВ – от 0,5 до 20 с, второй ступени – от 20 до 120 с. Время подготовки (восстановления) АПВ регулируется в диапазоне от 0,5 до 25,0 с. Обеспечивается запрет АПВ при

действии защит, а также внешних дискретных сигналов, выбор которых производится программными переключателями.

Автоматическое включение резерва (АВР)

Устройство обеспечивает однократное включение ввода резервного питания (секционного выключателя) через время от 0,12 до 0,15 с после отключения вводов рабочего питания по факту срабатывания входной дискретной цепи. Время подготовки (готовности) АВР составляет 10 с после срабатывания реле РПО. Обеспечивается запрет действия АВР при срабатывании защит, а также внешних дискретных сигналов, выбор которых производится программными переключателями.

Устройство ТЭМП 2501-31 регистрирует для АСУ ТП с индивидуальным кодом и меткой

времени следующие события:

– запуск/возврат ступеней защит;

– срабатывание/возврат выдержек времени ступеней защит;

– изменение состояния входных дискретных сигналов;

– изменение состояния выходных реле;

– срабатывание/возврат функций автоматики и сигнализации;

– пуск/останов регистратора аварийных режимов;

– начало и завершение изменения уставок и конфигурации устройства.

Размер буфера событий, передаваемых в АСУ ТП, составляет – 31 событие. Перечень регистрируемых событий задается специальными параметрами – масками, которые доступны только по последовательному каналу.

### 2.6 Устройство и работа (принцип действия)

Конструктивное исполнение и состав устройства

В состав устройства входят следующие блоки:

– блок питания П1273;

– блок входных трансформаторов Д1860;

– блок входных дискретных сигналов Р1457;

– блок индикации и управления И2303;

– измерительный блок L2303;

– блок выходных реле Р1435;

– объединительная плата.

Структурная схема устройства

Устройство выполнено в виде программируемого логического контроллера, имеющего в качестве ядра блок центрального процессора (он же - измерительный блок), который обеспечивает взаимодействие между всеми входящими в состав устройства блоками. Измерительный блок обеспечивает прием поступающей на его вход информации от промежуточных трансформаторов тока, от блока входных дискретных сигналов, от кнопок управления, от порта последовательной связи для последующего преобразования и обработки по заранее заданным алгоритмам. Результаты обработки поступающей информации выдаются на выходные реле, на элементы индикации, а также передаются по запросам в систему АСУ ТП. Нормальное функционирование устройства обеспечивается бесперебойным питанием, а также развитой системой самодиагностики, которая постоянно производит оценку работоспособности составных частей устройства и программного обеспечения.

Питание устройства производится от преобразовательного блока питания П1273, который обеспечивает необходимые уровни напряжения питания для функционирования блоков. Подача оперативного питания производится через отдельный разъем Х2.

Переменный ток от измерительных трансформаторов тока (ТТ) подается через клеммные колодки Х1 на блок входных трансформаторов Д1860. В блоке трансформаторов производится гальваническое разделение внутренних цепей устройства от цепей измерительных трансформаторов тока и преобразование входных сигналов до необходимых для работы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) уровней.

Преобразованные сигналы от блока трансформаторов с помощью гибкого жгута поступают на вход измерительного блока, где производится их обработка.

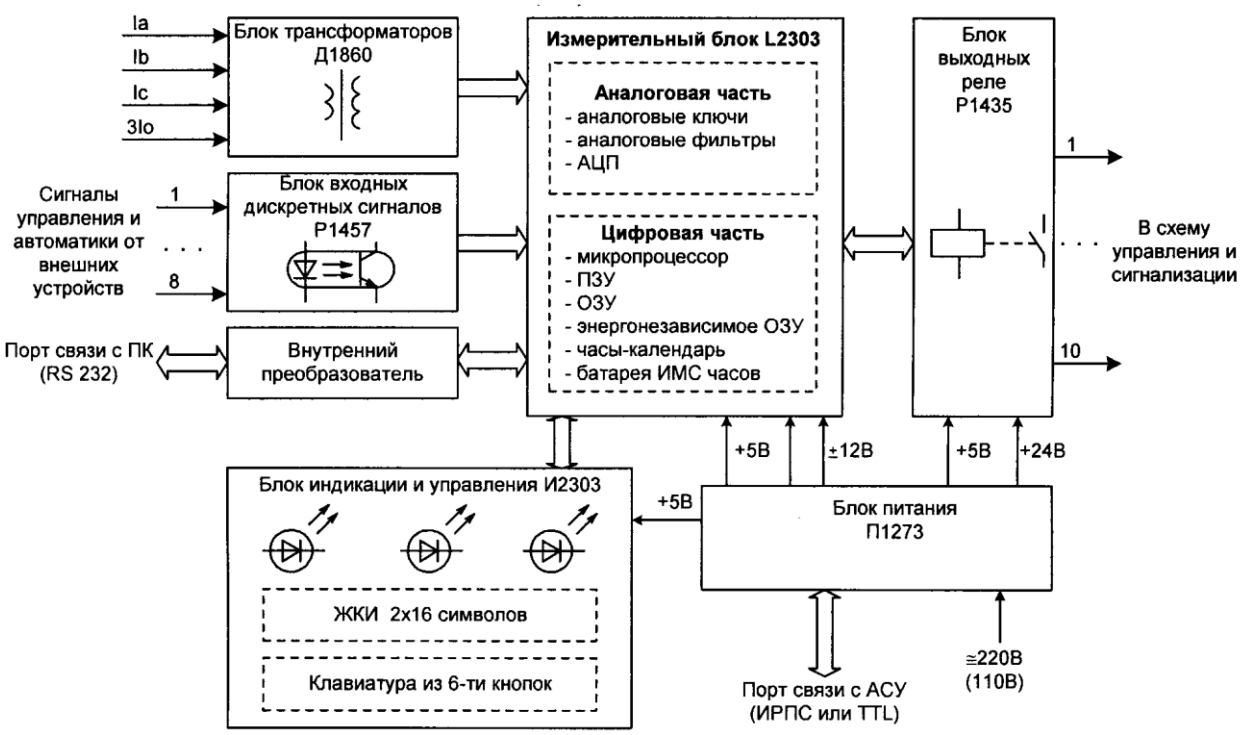


Рисунок 2.2 – Структурная схема ТЭМП 2501-31

Блок входных дискретных сигналов Р1457 обеспечивает прием внешних сигналов и их гальваническую развязку от внутренней схемы устройства. Подача входных сигналов производится через отдельный разъем X3.

С помощью блока индикации и управления И2303 осуществляется выставление уставок и конфигурация устройства, просмотр измеренных и зарегистрированных величин, состояние дискретных входных сигналов и выходных реле устройства. Блок индикации обеспечивает отображение каналов сработавших защит и функций автоматики, типов неисправности устройства, выявленных системой самодиагностики.

Измерительный блок L2303 выполнен на микропроцессорной элементной базе. Он имеет развитую систему самодиагностики для контроля исправности программной и аппаратной части устройства (блока выходных реле, АЦП, уровней питающих напряжений операционных усилителей и т.д.), которая

обеспечивает высокую готовность к действию и надежность устройства. Блок реализует функцию обработки и измерения аналоговых сигналов, а также функцию логического контроллера, при этом обеспечивается взаимодействие и обработка сигналов между всеми составными блоками, прием/передача сигналов по порту последовательной связи и др. Блок выполняет преобразование сигналов от промежуточных трансформаторов тока в последовательность двоичных кодов, а также выделение максимального значения тока в фазах за полпериода и сравнение их с уровнем уставок. В случае превышения уставки в регистры памяти записываются параметры аварийного режима, а также формируется логический сигнал для действия на цепи отключения, сигнализации, автоматики.

На вход измерительного блока поступают также логические сигналы от блока входных дискретных сигналов. Блок производит обработку поступающих сигналов по определенному алгоритму. Алгоритм обработки определяется пользователем с помощью выбора типа функциональной схемы и программных переключателей, которые определяют различное действие входных воздействующих сигналов на выходные цепи (действие на сигнализацию или отключение и т. п.). Измерительный блок формирует сигналы срабатывания выходных реле сигнализации и отключения, а также осуществляет вывод на дисплей блока индикации информации о состоянии и параметрах устройства.

Блок выходных реле Р1435 обеспечивает прием команд от измерительного блока и срабатывание реле управления и сигнализации. Измерительный блок производит постоянный контроль состояния выходных реле, обеспечивая высокую готовность к действию. Предусмотрены меры, исключающие самопроизвольное срабатывание выходных реле. Контакты выходных реле выведены на два отдельных разъема X4 и X5.

Работа составных частей устройства

Блок питания П1273.

Блок осуществляет преобразование напряжения переменного, выпрямленного переменного или постоянного оперативного тока в стабилизированные уровни напряжения +5 В и ±12 В для питания цифровой и аналоговой части

измерительного блока соответственно, а также нестабилизированное напряжение +24 В для питания обмоток выходных реле. Индикатор зеленого свечения «Uпит» в блоке индикации на лицевой панели устройства сигнализирует о нормальной работе блока питания. Для защиты от повреждения входных цепей блока при кратковременных перенапряжениях в сети оперативного тока, предусмотрены ограничители перенапряжений (варисторы), уровень среза которых составляет 330 В.

Защита от повреждений внутри блока питания осуществляется предохранителем на номинальный ток 1 А, включенным в первичную цепь 220 В, который расположен на печатной плате блока питания. На плате блоке питания так же размещен последовательный порт для связи устройства с АСУ ТП.

Блок трансформаторов Д1860.

Блок конструктивно состоит из плиты, на которой располагаются промежуточные трансформаторы тока. Преобразованные сигналы поступают в измерительный блок по внутренним соединениям устройства. Трансформатор тока защиты от замыканий на землю выполняется на номинальные токи 1 А и 0,2 А. При подключении его к трансформатору тока нулевой последовательности (типа ТЗЛМ, ТЗЛ и др.) обеспечивается наименьшее значение первичного тока срабатывания порядка 0,5 А.

Блок входных дискретных сигналов Р1457.

Устройство ТЭМП 2501-31 содержит блок входных дискретных сигналов, обеспечивающий приём восьми сигналов от внешних устройств с уровнем 110 В или 220 В переменного или постоянного оперативного тока. Выбор необходимого исполнения производится при заказе устройства. Входные цепи являются изолированными по отношению друг к другу, что позволяет подключать цепи от различных источников оперативного питания. При необходимости питание входных дискретных сигналов можно объединять. Входные цепи отделены от внутренних цепей устройства оптоэлектронными преобразователями, обеспечивающими необходимый уровень изоляции. Предусмотрены меры, исключающие ложное срабатывание входных цепей при замыканиях на землю в сети

постоянного оперативного тока. Напряжение активного уровня сигнала, необходимого для срабатывания входа, составляет не менее 0,6 номинального напряжения питания устройства. Специальными схемными решениями обеспечивается кратковременное (порядка 20 мс) протекание повышенного входного тока (до 20 мА) в момент срабатывания для надёжного пробоя оксидной плёнки на контактах внешних реле управления. После срабатывания входной цепи значение тока, протекающего через дискретный вход устройства, не превышает 3 мА.

Блок индикации и управления И2303.

Блок индикации и управления состоит из жидкокристаллического дисплея ЖКИ (2 строки по 16 символов), шести кнопок управления, обозначение которых нанесено на лицевой панели устройства, и трех светодиодов, сигнализирующих о состоянии устройства.

Измерительный блок L2303.

Измерительный блок состоит из двух частей: аналоговой и цифровой. В аналоговой части блока расположены активные фильтры промышленной частоты сигналов, поступающих от блока трансформаторов и схема 12-ти разрядного АЦП, преобразующего значения этих сигналов в двоичный код с частотой дискретизации 1200 Гц.

В цифровой части блока находятся:

– микропроцессор, производящий обработку входных сигналов по заданному алгоритму и формирование логических сигналов для блока выходных реле. Микропроцессор формирует данные для индикации, последовательной связи с АСУ ТП или переносного компьютера и выполняет функции самодиагностики устройства;

– микросхема ОЗУ (8 КБайт) для хранения действующих уставок и конфигурации устройства, организации буферов регистрируемых и измеренных значений, промежуточных данных работы микропроцессора;

– микросхема энергонезависимой памяти EEPROM (32 КБайт) для хранения уставок и конфигурации устройства и записи осциллограмм;

– микросхема ПЗУ (64 КБайт) для хранения программы работы микропроцессора;

– микросхема часов реального времени;

– ряд вспомогательных логических микросхем.

Блок выходных реле Р1435.

Блок выходных реле устройства ТЭМП 2501-3Х содержит 10 малогабаритных реле. Блок имеет три относительно мощных реле К1, К2, К3, действующих на цепи управления коммутационными аппаратами (технические данные реле см. п.1.2.4.4). Два реле (К1 - «Отключить» и К2 - «Включить») обеспечивают по одной нормально открытой выходной цепи с двумя последовательно соединенными контактами.

В состав блока входят еще пять менее мощных реле для действия на цепи сигнализации и автоматики (три реле с переключающими контактами и два реле с нормально разомкнутыми контактами), а также двухпозиционное реле фиксации команд с двумя переключающими контактами.

Реле «Неисправность» при поданном напряжении оперативного питания находится в подтянутом состоянии и возвращается в обесточенное состояние при обнаружении системой самодиагностики неисправности в устройстве или при потере оперативного питания. Реле имеет два нормально замкнутых контакта с общей точкой для подачи сигнала о неисправности в цепи сигнализации.

Объединительная плата.

На объединительной плате расположены разъемы, в которые, при снятой со стороны подключения внешних проводников крышке кассеты, устанавливаются блок питания, блок входных дискретных сигналов, измерительный блок и блок выходных реле. На объединительной плате располагается преобразователь RS232, обеспечивающий связь устройства ТЭМП 2501-1Х с переносным компьютером через нуль-модемный кабель, подключаемый к разъему, выведенному на лицевую панель.

Логическая защита шин (ЛЗШ).

ЛЗШ применяется для быстрого отключения КЗ на шинах и реализуется на рабочем и резервном вводах. Для этого в терминалах вводов предусматривается ступень МТЗ (ЛЗШ), которая блокируется от МТЗ присоединений (сигналом «Пуск МТЗ»). При внешних КЗ на отходящих присоединениях пускается ступень МТЗ этого присоединения и блокирует ступени защит рабочего и резервного вводов. При КЗ на шинах блокирования не происходит и ступень с выдержкой времени отключает ввод.

Возможно применение одной из двух схем организации ЛЗШ: параллельная (с использованием нормально открытых контактов реле МТЗ присоединений) и последовательная (с использованием нормально замкнутых контактов реле).

### 2.7 Разработка схемы защиты распределительной части подстанции

Разработка схемы защиты начинается с определения защищаемых присоединений и источников измерительной информации. Для токовых защит такими источниками являются трансформаторы тока, установленные на вводах, отходящих линиях или стороне низшего напряжения силового трансформатора. Вторичные цепи трансформаторов тока подключаются к входным трансформаторам терминала, которые обеспечивают согласование уровней сигналов и гальваническую развязку. Далее сигнал поступает в измерительный блок, где преобразуется в цифровую форму и сравнивается с заданными уставками [13].

На принципиальной схеме защиты должны быть отражены цепи переменного тока, цепи оперативного питания, входные дискретные сигналы, выходные реле и цепи сигнализации. Такое разделение облегчает чтение схемы: измерительные цепи показывают, откуда терминал получает информацию о токах; дискретные входы фиксируют положение выключателя и внешние команды; выходные реле формируют команды отключения, включения и сигнализации. Соответствующие схемы приведены в приложениях А-Г.

Таблица 2 – Соответствие функций терминала задачам защиты

| Функция терминала | Назначение в схеме | Результат действия |
|---|---|---|
| МТЗ-1 | Отключение близких междуфазных КЗ | Команда на отключение выключателя |
| МТЗ-2, МТЗ-3 | Селективная и резервная защита | Отключение с выдержкой времени |
| ОЗЗ | Обнаружение замыканий на землю | Сигнализация или отключение |
| АПВ, АВР | Восстановление питания и резервирование | Команда включения по алгоритму |
| Связь с АСУ ТП | Передача событий и параметров | Регистрация и контроль |

При коротком замыкании ток в защищаемой цепи возрастает, измерительный блок фиксирует превышение уставки и запускает соответствующую ступень защиты. Если условие срабатывания сохраняется в течение заданной выдержки времени, терминал формирует команду на выходное реле. Через цепь управления эта команда передается на катушку отключения выключателя. После отключения выключателя его вспомогательные контакты изменяют состояние дискретных входов РПО и РПВ.

### 2.8 Логика действия максимальной токовой защиты

Максимальная токовая защита применяется как основной и резервный вид защиты в распределительных сетях. В терминале ТЭМП 2501-31 она реализуется несколькими ступенями, что позволяет разделить функции токовой отсечки, защиты с независимой выдержкой времени и резервной защиты. Первая ступень обычно настраивается на большие токи близких коротких замыканий и действует без выдержки или с минимальной выдержкой. Вторая и третья ступени имеют выдержки времени, необходимые для согласования с защитами смежных присоединений [15].

Логика действия МТЗ строится по принципу сравнения измеренного тока с уставкой. Если ток превышает заданное значение, формируется сигнал пуска. Для ступеней с выдержкой времени запускается таймер. Если ток снизился до истечения выдержки, защита возвращается в исходное состояние. Если превышение сохраняется, формируется команда отключения. Такой алгоритм снижает вероятность ложных отключений при кратковременных переходных процессах.

### 2.9 Защита от замыканий на землю

Защита от однофазных замыканий на землю особенно важна для сетей среднего напряжения, поскольку величина тока повреждения зависит от режима нейтрали и емкости сети. В терминале защита может получать сигнал от трансформатора тока нулевой последовательности либо от суммы фазных токов. При появлении тока нулевой последовательности, превышающего уставку, запускается ступень ОЗЗ. В зависимости от принятой схемы она может действовать на сигнализацию или на отключение поврежденного присоединения.

При построении схемы защиты необходимо исключить ложное действие ОЗЗ при небалансе токов, переходных процессах и несимметрии нагрузки. Для этого уставка должна быть выше возможного небаланса, но ниже минимального тока замыкания на землю, который должен быть обнаружен защитой. Время срабатывания выбирается с учетом селективности.

### 2.10 Управление выключателем и дискретные цепи

Схема управления выключателем включает цепи включения, отключения, контроля положения и блокировки от многократных включений. Дискретные входы терминала получают информацию от вспомогательных контактов выключателя, ключей управления, внешних защит и устройств автоматики. Наличие таких сигналов позволяет терминалу выполнять не только защитные функции, но и функции управления, контроля цепей и регистрации событий.

### 2.11 Связь с АСУ ТП и регистрация аварийных событий

Через канал связи могут передаваться измеренные токи, состояние дискретных входов, положение выключателя, параметры уставок, сообщения о пуске и срабатывании защит. Регистрация аварийных событий имеет значение для последующего анализа: после короткого замыкания важно установить, какая ступень защиты сработала, какой ток был зафиксирован, не было ли отказа выключателя и какие сигналы поступали на входы.

## 2.12 Сопоставление принятого решения с известными техническими решениями

По сравнению с электромеханическими реле микропроцессорный терминал позволяет уменьшить количество отдельных аппаратов, кабельных связей и вспомогательных реле. Это упрощает монтаж, снижает вероятность ошибок в цепях и повышает информативность схемы. Недостатками микропроцессорных устройств являются зависимость от корректности параметрирования, необходимость квалифицированной наладки и чувствительность к качеству оперативного питания. Эти недостатки компенсируются регламентными проверками, самодиагностикой и ведением эксплуатационной документации.

## 2.13 Проверка согласования схемы защиты с эксплуатационными режимами

Схема защиты должна сохранять работоспособность не только при нормальном питании подстанции, но и при изменении эксплуатационного режима. На практике возможны ремонтные переключения, вывод из работы одного из вводов, питание части нагрузки через секционный выключатель, изменение числа подключенных отходящих линий и перевод нагрузки на резервный источник. В каждом из этих режимов токораспределение в сети меняется, поэтому защита должна быть согласована таким образом, чтобы сохранялась селективность отключения поврежденного присоединения.

При работе подстанции с раздельными секциями шин ток короткого замыкания на одной секции может отличаться от тока при параллельной работе секций. Если секционный выключатель включен, источники питания объединяются, и ток повреждения может увеличиться. Если секционный выключатель отключен, ток короткого замыкания определяется только одним источником питания. Эти особенности учитываются при выборе ступеней МТЗ и выдержек времени, особенно для вводов и секционного выключателя.

В проектной схеме важно предусмотреть резервирование защит. Основная защита поврежденного присоединения должна действовать первой, но в случае

отказа выключателя или отказа самой защиты повреждение должно быть отключено вышестоящей защитой. Такое резервирование достигается временной селективностью и выбором уставок резервных ступеней. При этом резервная защита не должна срабатывать при нормальных перегрузках и кратковременных пусковых токах нагрузки.

Особое значение имеет работа защиты при включении трансформатора или линии под нагрузку. Пусковые и намагничивающие токи могут кратковременно превышать рабочий ток, но не являются коротким замыканием. Поэтому уставка токовой отсечки и ступеней с выдержкой времени должна быть отстроена от таких режимов. В микропроцессорных терминалах это достигается выбором токовых уставок, выдержек времени и блокировок по внешним дискретным сигналам.

Для подстанции 110/35/6 кВ необходимо учитывать различие функций защит на разных уровнях напряжения. Защиты стороны 110 кВ и 35 кВ обычно связаны с защитой силового трансформатора и линий высокого напряжения, а терминал ТЭМП 2501-31 применим для распределительной части 6-35 кВ. Поэтому в ВКР выделена зона, где рассматриваемое устройство выполняет функции защиты присоединения и взаимодействует с выключателем, цепями сигнализации и системой верхнего уровня.

Согласование с эксплуатационными режимами подтверждается не только расчетами, но и анализом логики схемы. Необходимо проверить, какие входные сигналы разрешают или запрещают действие автоматики, что происходит при потере оперативного питания, как терминал фиксирует положение выключателя, какие выходные реле действуют на отключение и какие сигналы передаются в АСУ ТП. Такой анализ позволяет выявить возможные противоречия до выполнения монтажных и наладочных работ.

При оформлении схемы полезно разделять цепи по функциональному назначению: измерительные цепи, цепи дискретных входов, цепи выходных команд, цепи питания и цепи связи. Это повышает читаемость рисунков и схем и облегчает проверку. В приложениях такое разделение отражено через четыре

схемы, что обеспечивает полноту иллюстративного материала и позволяет использовать схемы при докладе.

Итогом проверки эксплуатационных режимов является подтверждение того, что принятая схема защиты обеспечивает отключение поврежденной зоны, сохраняет резервирование и позволяет персоналу получить информацию о причине срабатывания. При изменении состава нагрузки, замене оборудования или изменении схемы электроснабжения уставки и логика терминала должны проверяться повторно по фактическим данным объекта.

### 2.14 Требования к монтажу и наладке цепей РЗА

Качество монтажа вторичных цепей непосредственно влияет на надежность работы защиты. Даже при правильном выборе терминала и корректном расчете уставок ошибка в подключении трансформаторов тока, дискретных входов или выходных реле может привести к отказу отключения короткого замыкания. Поэтому монтаж цепей РЗА выполняется по утвержденным схемам с обязательной проверкой маркировки жил, клеммных соединений и соответствия фактических подключений проектной документации.

Особенно ответственной является проверка токовых цепей. Вторичные цепи трансформаторов тока не должны размыкаться при наличии первичного тока, так как это может привести к появлению опасного напряжения и повреждению изоляции. При наладке проверяют полярность, фазировку, коэффициент трансформации, отсутствие обрывов и правильность заземления вторичных цепей. Результаты проверки фиксируются в протоколах, которые затем используются при приемке устройства в эксплуатацию.

Цепи оперативного питания проверяются на соответствие номинальному напряжению терминала, правильность полярности, наличие защиты от короткого замыкания и устойчивость при кратковременных перерывах питания. Для микропроцессорных устройств это особенно важно, поскольку блок питания обеспечивает работу измерительной, логической и выходной частей терминала.

Нестабильное питание может привести к перезапуску устройства или потере части диагностической информации.

Дискретные входы проверяются путем имитации сигналов от вспомогательных контактов выключателя, ключей управления и внешних устройств. При проверке контролируют не только факт изменения состояния входа, но и правильность дальнейшей логики: запуск АПВ, запрет включения, фиксацию положения выключателя, передачу сообщения в АСУ. Такой подход позволяет убедиться, что схема работает как единая система, а не как набор отдельных цепей.

Выходные реле проверяются по каждому назначению. Отдельно проверяют команду на отключение, команду на включение, сигнализацию срабатывания защит, сигнал неисправности терминала и передачу событий. Если выходное реле действует на промежуточное реле или катушку выключателя, проверяется вся цепь до конечного исполнительного элемента. При этом во время испытаний должны быть приняты меры, исключающие несанкционированное отключение действующего оборудования.

После ввода уставок выполняют вторичную проверку током. На вход терминала подают испытательный ток, превышающий уставку соответствующей ступени, и измеряют время срабатывания. Для ступеней с выдержкой времени проверяют соответствие фактического времени заданному значению. Для защиты от замыканий на землю проверяют чувствительность канала нулевой последовательности и правильность действия на сигнал или отключение.

Заключительным этапом наладки является комплексная проверка схемы. Она включает имитацию повреждения, контроль пуска защиты, срабатывания выходного реле, изменения положения выключателя, появления сигнализации и регистрации события. Если схема связана с АСУ ТП, проверяют передачу соответствующих сообщений и правильность отображения состояния присоединения на верхнем уровне.

Правильно оформленная пояснительная записка должна показывать не только теоретическое назначение защиты, но и порядок ее практической реализации. Поэтому в ВКР дополнительно раскрыты вопросы монтажа и наладки, что

повышает завершенность работы и связывает расчетную часть с рисунками и схемами.

### 2.15 Эксплуатационная документация и контроль исправности защиты

Эксплуатация устройств РЗА требует ведения технической документации. К ней относятся исполнительные схемы, протоколы наладки, карты уставок, журналы проверки, журналы срабатываний и инструкции по обслуживанию. Для микропроцессорных терминалов дополнительно сохраняются файлы конфигурации и, при необходимости, осциллограммы аварийных режимов. Наличие полного комплекта документации облегчает поиск неисправностей и снижает риск ошибочных действий персонала.

Контроль исправности защиты выполняется в плановом порядке и после аварийных событий. Плановая проверка включает внешний осмотр, проверку питания, контроль индикации, просмотр журнала событий, проверку дискретных входов и выходных реле. После аварии дополнительно анализируют зафиксированные токи, время срабатывания, последовательность событий и состояние выключателя. Эти данные позволяют оценить правильность работы защиты и необходимость корректировки уставок.

Самодиагностика терминала является важным преимуществом микропроцессорных устройств. Она позволяет обнаруживать внутренние неисправности, сбои питания, ошибки памяти и другие нарушения. Однако самодиагностика не заменяет периодических проверок, поскольку не всегда способна выявить внешние дефекты: ослабление клемм, повреждение вторичных кабелей, неправильное положение испытательных блоков или ошибку в цепях коммутации.

При изменении схемы подстанции необходимо актуализировать документацию. Если добавляется новое присоединение, меняется трансформатор тока, переключается группа уставок или изменяется логика автоматики, соответствующие изменения должны быть отражены в схемах и в карте уставок.

Несоответствие исполнительных схем фактическому монтажу является серьезным эксплуатационным риском.

Контроль исправности выходных цепей имеет особое значение. Защита может правильно определить повреждение, но авария не будет ликвидирована, если команда не дойдет до катушки отключения выключателя. Поэтому при проверке контролируется весь путь команды: от логического выхода терминала до исполнительной цепи. Аналогично проверяется цепь сигнализации, так как отсутствие сигнала затрудняет оперативную оценку состояния объекта.

В составе документации должна быть указана логика действия автоматики. Для АПВ и АВР важно знать условия пуска, запрета, выдержки времени и восстановления готовности. Для персонала эти сведения необходимы при анализе причин включения или невключения выключателя после аварийного отключения. Непонимание логики автоматики может привести к неправильным оперативным действиям.

Рисунки и схемы в приложениях должны использоваться совместно с текстовой частью. Однолинейная схема показывает место защиты в общей схеме подстанции, структурная схема поясняет состав терминала, схема соединений показывает вторичные цепи, а принципиальная схема отражает логику действия защиты. Такое разделение рисунков и схем соответствует требованиям наглядности и облегчает защиту работы перед комиссией.

В результате эксплуатационный раздел дополняет описательную часть и показывает, как выбранная схема может сопровождаться в течение всего срока службы. Это важно, поскольку надежность защиты определяется не только расчетом и выбором устройства, но и качеством обслуживания, проверки, анализа срабатываний и поддержания документации в актуальном состоянии.

### 2.16 Выводы по разделу 2

Во втором разделе рассмотрено устройство ТЭМП 2501-31, его функциональные возможности и принцип взаимодействия с измерительными, дискретными и выходными цепями. Показано, что терминал может применяться для

защиты распределительной части подстанции 110/35/6 кВ, прежде всего для присоединений 6-35 кВ. Описана логика действия МТЗ, защиты от замыканий на землю, управления выключателем, сигнализации и связи с АСУ ТП.

# 3 Расчетная часть

## 3.1 Расчет силы токов короткого замыкания

Основной причиной нарушения нормального режима работы системы электроснабжения является возникновение КЗ в сети или в элементах электрооборудования. Для снижения ущерба, обусловленного выходом из строя электрооборудования при протекании токов КЗ, а так же для быстрого восстановления нормального режима работы системы электроснабжения необходимо правильно определить токи КЗ и по ним выбирать электрооборудование, защитную аппаратуру и средства ограничения токов КЗ.

При возникновение КЗ происходит увеличение токов в фазах системы электроснабжения или электроустановок по сравнению с их значением в нормальном режиме работы. Это вызывает снижение напряжений в системе, которое особенно велико в близи места КЗ.

Расчет токов КЗ с учетом действительных характеристик и действительных режимов работы всех элементов системы электроснабжения сложен. Поэтому для решения задач вводят некоторые упрощения.

Особенностью расчета токов короткого замыкания в установках до 1000В заключается в том, что при расчете кроме индуктивных учитываются и активные сопротивления цепи короткого замыкания (воздушных и кабельных линий, обмоток силовых трансформаторов, трансформаторов тока, шин, коммутационной аппаратуры). Кроме этого, при расчетах, согласно ПУЭ, следует исходить из условия, что: [9]

- напряжение на стороне высшего напряжения трансформатора неизменно и мощность системы не ограничена;

- по режиму короткого замыкания в сетях до 1000 В должны проверятся лишь элементы, указанные в ПУЭ, т.е. распределительные щиты, силовые шкафы и токпроводы.

Согласно ПУЭ – силы токов короткого замыкания рассчитываются в тех точках сети, при коротком замыкании в которых аппараты и токоведущие части будут находиться в наиболее тяжелых условиях. Для вычисления силы токов короткого замыкания составляется расчетная схема, на которую наносятся, все данные, необходимые для расчета, и точки, где следует определить точки короткого замыкания.

Данные элементов схемы:

силовой трансформатор $S_{\text{н.тр}} = 400$ кВт; $U_{\text{к}} = 8\%$;Р = 155 кВт - нагрузка потребителя; трансформатор тока 600/5, шины алюминиевые (Ш-1) $100 \times 6$ мм$^2$ .

Точка К-1

а) Сопротивление трансформатора (в относительных единицах):

Активное:

$$r_m = \frac{\Delta P_{\text{К}}}{S_{\text{н.тр}}} = \frac{12,2}{400} = 0,0305 \text{ Ом};$$

Индуктивное:

$$x_m = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{Н}}\%}{100}\right)^2 - r_m^2} = \sqrt{\left(\frac{8}{100}\right)^2 - 0,0305^2} = 0,074 \text{ Ом};$$

Сопротивление трансформатора:

$$x_m = \frac{x_m \cdot U^2}{400} = \frac{0,074 \cdot 400^2}{400} = 29,6 \text{ мОм};$$

$$r_m = \frac{r_m \cdot U^2}{400} = \frac{0,0305 \cdot 400^2}{400} = 12,2 \text{ мОм};$$

б) Трехфазное сопротивление магнитного пускателя (данные из справочника)

$r_a = 0,15$ мОм;

в) Сопротивление первичных обмоток трансформатора тока:

$\text{x}_{\text{mm}} = 0,07$ мОм;

$\text{x}_{m-1} = 8 \cdot x_0 = 8 \cdot 0,189 = 1,5$ мОм;

г) Сопротивление шин Ш-1 (данные из справочника):

$r_{m-1} = 8 \cdot r_0 = 8 \cdot 0{,}099 = 0{,}792$ мОм;
$x_{m-1} = 8 \cdot x_0 = 8 \cdot 0{,}189 = 1{,}5$ мОм;

д) Суммарное сопротивление до точки К-1:

$r_{\sum k-1} = r_m + r_{\text{mm}} + r_{m-1} + r_a = 12,2 + 0{,}05 + 0{,}792 + 0{,}15 = 13{,}192$ мОм;
$x_{\sum m-1} = x_m + x_{\text{mm}} + x_{m-1} = 29,6 + 0{,}07 + 1{,}5 = 31{,}17$ мОм;

е) Сила тока короткого замыкания:

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\sum}^2 + x_{\sum}^2}} = \frac{400}{1{,}73 \cdot \sqrt{13,192^2 + 31,17^2}} = 6{,}83 \text{ кА};$$

ж) Сила ударного тока:

$k_{\text{у}} = 1{,}3;$
$i_{\text{уд}} = k_{\text{уд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{к.з.}} = 1{,}3 \cdot \sqrt{2} \cdot 6{,}83 = 8{,}9$ кА;

з) Определяем силу ударного тока с учетом нагрузки потребителя:

$$I_{\text{н.п.}} = \frac{\text{P}_{\text{н.п}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot \cos\phi \cdot \eta} = \frac{6 \cdot 1{,}55}{1{,}73 \cdot 380 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}8} = 1{,}96 \text{ кА};$$

Точка К-2

а) Сопротивление шин Ш-2 (данные из справочника)

$r_{\text{ш}-2} = 2{,}5 \cdot 0{,}222 = 0{,}555$ мОм;
$\text{x}_{\text{ш}-2} = 2{,}5 \cdot 0{,}214 = 0{,}535$ мОм;

б) Сопротивление автомата:

Катушки:

$r_a = 0{,}12;\ \text{x}_{\text{a}} = 0{,}094;$

Переходные сопротивления контактов (данные из справочника):

$r_{\text{к.а.}} = 0{,}25$ мОм;

в) Сопротивление кабеля (данные из справочника)

$r_{\text{каб}} = r_0 \cdot l = 1{,}33 \cdot 200 = 266$ мОм;
$\text{x}_{\text{каб}} = \text{x}_0 \cdot l = 0{,}07 \cdot 200 = 14$ мОм;

г) Суммарное сопротивление до точки К-2:

$r_{\sum \text{к}-2} = r_{\sum \text{к}-1} + r_{\text{ш}-2} + r_a + r_{\text{к.а.}} + r_{\text{каб}} = 2{,}272 + 0{,}555 + 0{,}12 + 0{,}25 + 266 = 268{,}4$ мОм;
$\text{x}_{\sum \text{к}-2} = \text{x}_{\sum \text{к}-1} + \text{x}_{\text{ш}-2} + \text{x}_{\text{a}} + \text{x}_{\text{каб}} = 10{,}274 + 0{,}535 + 0{,}094 + 14 = 25{,}3$ мОм;

д) Сила тока короткого замыкания:

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\sum}^2 + x_{\sum}^2}} = \frac{6000}{1{,}73 \cdot \sqrt{268{,}4^2 + 25{,}3^2}} = 12{,}9 \text{ кА};$$

е) Сила ударного тока:

$k_{\text{у}} = 1{,}3;$

$i_{\text{уд}} = k_{\text{уд}} \cdot \sqrt{2} \cdot 12{,}9 = 1{,}3 \cdot \sqrt{2} \cdot 12{,}9 = 23{,}7$ кА;

Вывод: В данных расчетах были проведены расчеты для точек К-1 и К-2, для точки К-1 ток короткого замыкания составил 6,83 кА, для точки К-2 ток короткого замыкания составил 12,9 кА.

### 3.2 Расчет релейной защиты

В процессе эксплуатации системы электроснабжения возникают повреждения отдельных элементов релейной защиты. Наиболее опасными и частыми видами повреждений являются КЗ между фазами электрооборудования и однофазные КЗ на землю в сетях с большими токами замыкания на землю. При протекании тока КЗ, элементы системы электроснабжения подвергаются термическому и динамическому воздействию. Для уменьшения размеров повреждений и предотвращения развития аварии устанавливают совокупность автоматических устройств, называемых релейной защитой и обеспечивающих с заданной степенью быстродействия, отключение поврежденного приемника электроэнергии или сети. Основные требования предъявляемые к релейной защите (РЗ): надежное отключение всех видов повреждений, чувствительность защиты, селективность действия, быстродействие, наличие сигнализации о повреждениях.

Расчет релейной защиты произведем на примере трансформатора ГПП, который имеет группу соединений Y/Δ-11 [1].

Определяем номинальные токи трансформатора:

$$I_{\text{н1}} = \frac{S_{\text{нт}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н1}}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6} = 96 \text{ А};$$

$$I_{\text{н2}} = \frac{S_{\text{нт}}}{\sqrt{3} \cdot 0{,}4} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 0{,}4} = 1443 \text{ А};$$

$S_{\text{нт}}$- Номинальная мощность трансформатора, кВА;

Определяем коэффициент трансформации:

$$К_Т = \frac{U_{н1}}{U_{н2}} = \frac{6}{0{,}4} = 15;$$

Определяем коэффициент трансформации трансформатора тока:

$$К_{I1} = К_{сх} \cdot I_{н1}/5 = 1{,}73 \cdot 96/5 = 33{,}2;$$

$$К_{I2} = К_{сх} \cdot I_{н2}/5 = 1 \cdot 1443/5 = 288{,}6;$$

$К_{сх}$ – коэффициент схемы, для Δ $К_{сх}$ = 1,73, для Y $К_{сх}$ = 1.

Выбираем тип трансформатора тока и уточняем коэффициент трансформации.

$К'_{I1}$ = 40 - для трансформатора тока типа ТФ3М-6-У1(наружная установка);

$К'_{I2}$ = 120 - для трансформатора тока типа ТШН-0,66У3 (внутренняя установка).

Действительные вторичные токи в плечах защиты:

$$\text{на ВН:} \quad I_{в1} = I_{н1} \cdot К_{сх} / К'_{I1} = \frac{96 \cdot 1{,}73}{40} = 4{,}1 \text{ А};$$

$$\text{на НН:} \quad I_{в2} = I_{н2} \cdot К_{сх} / К'_{I2} = \frac{1443 \cdot 1}{120} = 12 \text{ А};$$

Плечи с большими вторичными токами являются основными.

Ток внешнего КЗ, приведенный к основной стороне:

$$I'_{к\ max} = I_{к\ max}/К_{тр} = \frac{15{,}91}{15} \cdot 10^3 = 1060 \text{ А};$$

Определяем первичный ток небаланса:

$$I_{нб.р} = К_{одн} \cdot 0{,}1 + \Delta N_{рег} \cdot I'_{к\ max} = 1 \cdot 0{,}1 + 0{,}1 \cdot 1060 = 106 \text{ А};$$

где: $К_{одн}$ = 1 – коэффициент однотипности;

$\Delta N_{рег}$ = 0,1 – погрешность при регулировании напряжения.

Ток срабатывания защиты:

- по условию отстройки от тока небаланса:

$I_{ср.з} \geq К_{отс} \cdot I_{нб.р} = 1{,}2 \cdot 106 = 127$ А, где: $К_{отс}$ = 1,2 - 1,3;

- по условию отстройки от броска намагничевающего тока:

$I_{ср.з} \geq К_н \cdot I_{н1} \cdot К_з = 1{,}3 \cdot 96 \cdot 1 = 125$ А, где: $К_н$ = 1,3;

$I_{ср.з}$ = 127 > $I_{ср.з}$ = 125; принимаем $I_{ср.з}$ = 127.

Минимальный ток двухфазного КЗ:

$$I_{к\,min} = (1{,}3 \cdot I_{к\,max})/К = (1{,}3 \cdot 1591)/15 = 139 \text{ А};$$

Определяем коэффициент чувствительности:

$$К_ч = [(К_{сх} \cdot I_{к\,min})/ I_{сз}] > 1{,}5;$$

$$К_ч = [(1{,}73 \cdot 139)/ 127] = 1{,}9 > 1{,}5;$$

Ток срабатывания на основной стороне:

$$I_{ср.р.осн} = (К_{сх} \cdot I_{сз})/ К'_{I1} = (1{,}73 \cdot 127)/40 = 5{,}5 \text{ А};$$

Число витков обмотки реле на основной стороне:

$$W_{осн.р} = 100/ I_{ср.р.осн} = 100/5{,}5 = 18{,}1 \text{ витков};$$

Для надежной отстройки $W_{осн} < W_{осн.р}$, тогда $W_{осн} = 18$ витков;

Число витков обмотки реле на неосновной стороне:

$$W_{неосн.р} = W_{осн} \cdot (I_{в1}/ I_{в2}) = 18 \cdot (4{,}1/12) = 6{,}2 \text{ витков};$$

Принимаем $W_{неосн.р} = 6$ витков.

### 3.3 Расчет максимальной токовой защиты

Основным видом релейной защиты в электрических сетях является МТЗ, срабатывающая от резкого увеличения тока цепи при КЗ или перегрузках. Пусковым органом в МТЗ является реле максимального тока и реле времени срабатывания. Значение тока, при котором происходит срабатывание защиты, называют током срабатывания защиты. Уставкой тока срабатывания реле называется настройка реле на заданный ток срабатывания.

Для расчета МТЗ принимаем схему с блокировкой минимального напряжения. При КЗ схема срабатывает, при перегрузке нет, т.к. напряжение резко падает [15].

Ток срабатывания защиты:

$I_{ср.з} = (К_{отс} \cdot I_{н1}) \cdot К_в = 1,2 \cdot 96/0,8 = 144$ А, где: $К_{отс} = 1,2$; $К_в = 0,8$;

Вторичный ток срабатывания реле:

$$I_{ср.р2} = (К_{сх}/ К_{I2}) \cdot I_{ср.з} = 1 \cdot 144/288,6 = 0,5 \text{ А};$$

Коэффициент чувствительности защиты:

$$К_ч = (К_{сх} \cdot I_{к\,min})/ К'_I \cdot I_{ср.р} = 139 \cdot 1,3/144 = 1,7 > 1,5;$$

Защита от перегрузки.

Ток срабатывания защиты:

$$I_{ср.з(пер)} = (К_{отс} \cdot К_в) \cdot I_{2\,ном} = (1,2/0,8) \cdot 1443 = 2165 \text{ А};$$

где: $К_в$ – коэффициент возврата реле.

$$I_{ср.\,(пер)} = I_{ср.з(пер)} / К_{I2} = 2165/288,6 = 7,5 \text{ А};$$

### 3.4 Расчет контактов

Расчет контактных соединений включен в расчетную часть как проверка надежности вспомогательных цепей управления и сигнализации. Для схемы защиты это важно, поскольку команда отключения и сигналы состояния проходят через контактные элементы, а их ненадежная работа может привести к отказу или ложному срабатыванию защиты.

Определить величину требуемого контактного нажатия мостикого контакта вспомогательной цепи контактора, если через контакты протекает ток 5 А, а все контакты изготовлены из серебряных накладок полусферической формы радиуса 1 см. Принять допустимое напряжение на контактах равным 0,1 напряжения размягчения.

Дано:

$$I = 5A; r = 0,01\text{м}; \rho = 1,5 \cdot 10^{-8}\text{Ом} \cdot \text{м}; E = 7,35 \cdot 10^{10}\,\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}; U_P = 0,09B;$$

Найдём радиус площадки касания

$$a = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot 0,1 \cdot U_P} = \frac{5 \cdot 1,5 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 0,1 \cdot 0,09} = 4,166 \cdot 10^{-6}\text{м};$$

Найдём контактное нажатие на одном контакте

$$P_K = \left(\frac{a}{0{,}83}\right)^3 \cdot \frac{E}{r} = \left(\frac{4{,}166 \cdot 10^{-6}}{0{,}83}\right) \cdot \frac{7{,}35 \cdot 10^{10}}{0{,}01} = 0{,}00093H;$$

Т. к. мостик имеет два контакта, то суммарное давление в нем

$$P = 2 \cdot P_{\text{К}} = 2 \cdot 0{,}00093 = 0{,}00186\text{Н};$$

Контакты реле изготовлены в виде напаек серебром, радиус кривизны которых 5 мм. Определить значение сопротивления стягивания этих контактов, если сила контактного нажатия 0,01 Н [16].

Дано:

$$\rho = 1{,}6 \cdot 10^{-8}\text{Ом}; E = 7{,}35 \cdot 10^{10}\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}; r = 0{,}005\text{м}; P = 0{,}01\text{Н};$$

Решение:

Найдём радиус площадки касания

$$a = 0{,}86 \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot r}{E}} = 0{,}86 \cdot \sqrt[3]{\frac{0{,}01 \cdot 0{,}005}{7{,}35 \cdot 10^{10}}} = 7{,}564 \cdot 10^{-6}\text{м};$$

Найдём сопротивление стягивания контактов

$$R_C = \frac{\rho}{2 \cdot a} = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 7{,}564 \cdot 10^{-6}} = 0{,}00106\text{Ом};$$

### 3.5 Заземляющие устройства

Задача заземляющих устройств:

уменьшить напряжение заземления;

напряжение прикосновения;

напряжение шаговое.

Заземлители бывают искусственные и естественные. В качестве искусственных заземлителей обычно применяют вертикально забитые в землю отрезки угловой стали длиной 2,5-3 м и горизонтально проложенные стальные полосы, круглые и прямоугольные, которые служат для связки вертикальных заземлителей.

В последнее время стали применяться углубленные прутковые заземлители из круглой стали диаметром 12 – 14 мм и длиной до 5 м, ввертываемые в грунт посредством специального приспособления. Благодаря проникновению электродов в глубокие слои грунта с повышенной влажностью снижается удельное сопротивление. Использование углубленных прутковых заземлителей снижает расход металла и затраты труда на работы по устройству заземления.

В качестве естественных заземлителей используются: проложенные в земле стальные водопроводные трубы, стальная броня силовых кабелей, проложенных в земле, при числе их не менее двух; металлические конструкции зданий и сооружений, имеющие надежное соединение с землей; различного рода трубопроводы, проложенные под землей; свинцовые оболочки кабелей, проложенные в земле.

Не допускается использовать в качестве естественных заземлителей трубопроводы горючих жидкостей и горючих или взрывчатых газов, алюминиевые оболочки кабелей, алюминиевые проводники и кабели, проложенные в туннелях, блоках, каналах.

Для снижения расходов на заземляющие устройства в первую очередь рекомендуется использовать естественные заземлители.

### 3.6 Расчет заземляющих устройств

Определяем длину заземляющего устройства.

$$l_п = (S_{гпп} + 2) \cdot 4 = (40 + 2) \cdot 4 = 168 \text{ м}$$

Определяем удельное сопротивление грунта.

$\rho_{расч} = К_{сез} \cdot \rho$, где $К_{сез}$ – коэффициент сезонности, учитывает промерзание и просыхание грунта;

$К_{сез\ в} = 1,3 – 1,45$ (вертикально);

$К_{сез\ г} = 2,5 – 3,5$ (горизонтально);

$\rho$ – удельное сопротивление грунта в нормальных условиях.

Для Урала ρ = 100 Ом·м;

Искусственные заземлители:

вертикальные электроды из труб, уголков, прутков d = 12 – 14 мм, l = 5м;

горизонтальные электроды, стальная полоса на 0,5 – 0,7 м;

сечение S = 40×4 мм;

$\rho_{\text{расч. в.}} = 1{,}45 \cdot 100 = 145$ Ом·м;

$\rho_{\text{расч. г.}} = 3{,}5 \cdot 100 = 350$ Ом·м;

Сопротивление вертикального заземлителя:

$$R_{\text{в}} = \frac{0{,}366 \cdot \rho_{\text{расч.}}}{l} \lg \frac{2 \cdot l^2}{b \cdot t} = \frac{0{,}366 \cdot 350}{168} \cdot \lg \frac{2 \cdot 168^2}{0{,}04 \cdot 0{,}5} = 0{,}8 \cdot 14{,}9 = 11{,}92 \text{ Ом}$$

где: l – длина полосы, b – ширина полосы, t – глубина заложения.

Расстояние меж вертикальными электродами примерно равно длине стержней т.е. 5 метров.

Число вертикальных заземлителей:

$$n_{\text{в}} = \frac{r_{\text{в}}}{R_{\text{иск}} \cdot \eta_{\text{в}}} = \frac{39{,}15}{4 \cdot 0{,}4} = 24,$$

где: $\eta_{\text{в}}$- коэффициент использования,

$R_{\text{иск}}$ - искусственное сопротивление, берется до 10 Ом.

В зависимости от расстояния определяется их количество при n = 10,

$\eta_{\text{в}} = 0{,}6$; n = 15, $\eta_{\text{в}} = 0{,}53$; n = 20, $\eta_{\text{в}} = 0{,}5$; n до 40, $\eta_{\text{в}} = 0{,}4$.

Сопротивление горизонтальных электродов в контуре вертикальных:

$$R_{\text{г}} = \frac{r_{\text{г}}}{\eta_{\text{г}}} = \frac{11{,}92}{0{,}35} = 34{,}1 \text{ Ом};$$

Определяем $R_{\text{в}}$ с учетом соединительной полосы:

$$R_{\text{в}} = \frac{R_{\text{г}} \cdot R_{\text{з(иск)}}}{R_{\text{г}} - R_{\text{з(иск)}}} = \frac{34{,}1 \cdot 4}{34{,}1 - 4} = 4{,}5 \text{ Ом}$$

$R_{\text{в}}$ – сопротивление вертикальных электродов;

Уточненное число вертикальных электродов:

$$n'_в = \frac{r_в}{R_в \cdot \eta'_в} = \frac{39,15}{4,5 \cdot 0,4} = 21,75,$$

где: $\eta'_в$= 0,4 (от 20 до 40 $n_в$);

Принимаем 22 электрода.

### 3.7 Молниезащита

Перенапряжением называется повышение напряжения до значения, опасного для изоляции электроустановки, рассчитанной на рабочее напряжение. Перенапряжения в электрических установках можно подразделить на две группы: коммутационные (внутренние) и атмосферные (внешние).

Коммутационные перенапряжения возникают в электроустановках при изменениях режима их работы, например при отключении короткого замыкания, включении или отключении нагрузки, внезапном значительном изменении нагрузки. При этом выделяется запасенная в установке энергия.

Эта энергия определяет кратность перенапряжения, представляющую собой отношение величин амплитуд перенапряжения и номинального напряжения.

Коммутационные перенапряжения вызываются разрывом цепи переменного тока, содержащей индуктивности и емкости, например при отключении токов холостого хода трансформаторов, асинхронных двигателей, линий электропередачи и др.

Одним из видов коммутационных перенапряжений является дуговые перенапряжения, которые могут возникать в установках выше 1000 В, при однофазных замыканиях на землю; их значение превышает в 4 – 4,5 раза номинальное напряжение.

Атмосферные перенапряжения возникают вследствие воздействия на электроустановки грозовых разрядов. В отличие от коммутационных они не зависят от значения рабочего напряжения электроустановки. Атмосферные перенапряжения подразделяют на индуцированные перенапряжения и перенапряжения от прямого удара молнии.

Индуцированные перенапряжения образуются при грозовом разряде вблизи электроустановки и линии электропередачи за счет индуктивных влияний.

В электроустановках, использующих тросы, амплитуда перенапряжения не превосходит 300 – 400 кВ. Поэтому они опасны для электроустановок с рабочим напряжением до 35 кВ и не опасны для электроустановок 110 кВ и выше.

Перенапряжение от прямого удара молнии наиболее опасны. Измерения показывают, что токи молнии изменяются от 10 до 250 кА, чаще всего их значение порядка 25 кА.

Для защиты электроустановок от атмосферных перенапряжений применяют молниеотводы, защитные тросы, разрядники и защитные промежутки.

### 3.8 Расчет молниезащиты

По размерам подстанции 40×40; $h_x = 8$ м.

Для защиты применяем два стержня молниеотвода высотой по 30 м,

$l = 31 – 32$ м.

Определяем параметры зоны защиты молнии на уровне земли:

$$h_0 = 0,85 \cdot h = 0,85 \cdot 30 = 25,5 \text{ м},$$

$h_0$ – высота зоны защиты.

Радиус зоны защиты на уровне земли:

$$r_0 = (1,1 – 0,002 \cdot h) \cdot h = (1,1 – 0,002 \cdot 30) \cdot 30 = 31,2 \text{ м}$$

Определяем параметры зоны защиты на высоте защищаемого объекта:

$$\frac{h_x}{0,85}\frac{8}{0,85}rx = (1,1 - 0,002 \cdot h) \cdot (h - hx/0,85) = 1,04 \cdot (30 - 8/0,85) = 21,4 \text{ м}.$$

Минимальная высота зоны защиты:

$$10^{-4} \cdot hc = h0 - (0{,}17 + 3 \cdot 10\text{^-}4 \cdot h) \cdot (l - h),$$

Если l > 30, то

$$h_c = h_0 = 25{,}2 \text{ м}$$

Минимальный радиус зоны защиты на уровне земли:

$$r_c = r_0 = 31{,}2 \text{ м}$$

Минимальный радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта:

$$\frac{h_0 - h_x}{h_c} = 31,2 \cdot \frac{25,5-8}{25,5} = 21,4 \text{rcx} = \text{r0} \cdot (\text{h0} - \text{hx})/\text{hc} = 31{,}2 \cdot (25{,}5 - 8)/25{,}5 = 21{,}4 \text{ м}.$$

### 3.9 Пояснение к применению расчетной части

Расчетная часть ВКР предназначена для подтверждения работоспособности принятой схемы защиты и демонстрации методики определения токов короткого замыкания, токов срабатывания защит, параметров заземляющих устройств и молниезащиты. Численные значения в разделе приведены по исходным данным, использованным в предоставленном расчетном материале. В рамках доработки пояснительной записки расчетные зависимости оформлены и согласованы с текстом работы без изменения исходных численных результатов.

Для связи расчетной части с темой подстанции 110/35/6 кВ принято, что рассматриваемая защита относится к распределительной части подстанции, где применяются устройства защиты присоединений 6-35 кВ и цепей 0,4 кВ. Такой подход соответствует назначению терминала ТЭМП 2501-31 и позволяет использовать расчетные данные для демонстрации выбора уставок и проверки защит на стороне распределения.

### 3.10 Проверка соответствия расчетных результатов требованиям защиты

Полученные значения токов короткого замыкания используются для выбора уставок защит и проверки чувствительности. Для МТЗ ток срабатывания должен быть больше максимального рабочего тока и возможных пусковых токов, но меньше минимального тока короткого замыкания в конце защищаемой зоны с учетом требуемого коэффициента чувствительности. Это условие позволяет обеспечить срабатывание при повреждении и отсутствие отключения при нормальной нагрузке [15].

Расчет заземляющего устройства необходим для снижения напряжения прикосновения и шага, а также для обеспечения надежной работы защит при замыканиях на землю. При проектировании учитывается удельное сопротивление грунта, сезонный коэффициент, длина и количество вертикальных и горизонтальных электродов. Полученный результат должен соответствовать требованиям электробезопасности и условиям эксплуатации объекта [5].

### 3.11 Учет погрешностей и эксплуатационных факторов

Расчетные значения уставок должны рассматриваться с учетом погрешностей измерительных трансформаторов, реле, таймеров и коммутационных аппаратов. Даже при использовании микропроцессорных терминалов полностью исключить погрешности невозможно, так как они возникают в первичных измерительных цепях, вторичных кабелях, контактах и источниках оперативного питания. Поэтому в расчетах применяются коэффициенты отстройки, возврата и чувствительности.

При наладке схемы защиты проверяются не только расчетные значения, но и фактическое действие цепей. Испытания включают подачу вторичного тока, проверку пуска ступеней, выдержек времени, срабатывания выходных реле,

индикации, дискретных входов и связи с АСУ ТП. Результаты испытаний фиксируются в протоколах, что подтверждает готовность устройства к эксплуатации [8].

При оформлении расчетной части важно сохранять единый подход к обозначениям. Все физические величины должны иметь расшифровку, а единицы измерения должны указываться рядом с численным результатом. Если в формуле используются коэффициенты отстройки, возврата, схемы или чувствительности, они должны быть пояснены в тексте. Такой подход снижает вероятность неправильного толкования расчетов и облегчает проверку работы руководителем и нормоконтролем.

В расчетах токов короткого замыкания необходимо последовательно показывать переход от расчетной схемы к эквивалентной схеме замещения. Даже если численные данные уже заданы, пояснительная записка должна демонстрировать, какие элементы сети учитываются в сопротивлении до расчетной точки. Для распределительных сетей это могут быть сопротивления трансформатора, шин, кабельных линий, трансформаторов тока, автоматических выключателей и контактных соединений.

При расчете релейной защиты важен не только итоговый ток срабатывания, но и логика выбора. Ток срабатывания должен быть отстроен от максимального рабочего тока, от возможных перегрузок и от переходных процессов, но при этом защита должна оставаться чувствительной к минимальному току повреждения. Поэтому в пояснительной записке приведены условия отстройки и проверка коэффициента чувствительности, а также сделаны выводы по результатам расчета.

Для максимальной токовой защиты с выдержкой времени необходимо учитывать согласование с нижестоящими защитами. Если выдержка времени будет слишком малой, возможна потеря селективности и отключение питающего присоединения вместо поврежденного отходящего фидера. Если выдержка будет чрезмерно большой, возрастет время действия тока короткого замыкания на

оборудование. Поэтому выбор времени срабатывания является компромиссом между селективностью и быстродействием.

Расчет контактных соединений включен в работу для оценки условий коммутации и надежности вспомогательных цепей. Хотя контакты выходных реле терминала не являются силовыми контактами выключателя, они должны обеспечивать надежную передачу команды в цепь управления. При недостаточном контактном нажатии возможно увеличение переходного сопротивления, нагрев и нестабильная работа цепи, что особенно нежелательно для цепей отключения.

Расчет заземляющего устройства связан с требованиями охраны труда и электробезопасности. Заземление обеспечивает снижение потенциала открытых проводящих частей и создание условий для надежной работы защит. При проектировании учитывается удельное сопротивление грунта, сезонные изменения, конструкция вертикальных и горизонтальных заземлителей, а также коэффициенты использования электродов.

При расчете молниезащиты учитываются габариты защищаемого объекта и высота молниеотводов. Зона защиты должна охватывать оборудование, которое может быть повреждено прямым ударом молнии или индуцированным перенапряжением. Для подстанции это особенно важно, поскольку повреждение изоляции на открытом распределительном устройстве может привести к отключению значительной части нагрузки.

Результаты расчетов должны быть связаны с рисунками и схемами, приведенными в приложениях. Однолинейная схема показывает расчетные точки и защищаемые присоединения, схема соединений показывает вторичные цепи, а принципиальная схема отображает, каким образом сигнал защиты передается в цепь отключения. Поэтому расчетные материалы и схемы приложений должны рассматриваться совместно.

Если в дальнейшем для подстанции будут уточнены фактические параметры силовых трансформаторов, линий, шин и трансформаторов тока, расчетная часть может быть пересчитана без изменения общей структуры работы. Для этого достаточно заменить исходные данные и выполнить повторное

определение токов короткого замыкания, уставок защит, сопротивления заземляющего устройства и параметров молниезащиты.

Таким образом, расчетная часть выполняет роль технического обоснования принятых решений. Она показывает, что разработанная схема защиты должна рассматриваться как часть системы электроснабжения, где электрические параметры, логика терминала, цепи управления и требования безопасности связаны между собой.

Важным итогом расчетной части является подтверждение необходимости комплексного подхода. Защита не может быть выбрана только по одному максимальному току: требуется учитывать минимальные токи повреждения, режимы нагрузки, пусковые токи, характеристики аппаратов и резервирование. Именно поэтому в работе приведены несколько расчетных подразделов, охватывающих не только МТЗ, но и контакты, заземление и молниезащиту.

Оформление расчетных зависимостей выполнено так, чтобы сохранить исходную численную часть и одновременно сделать ее понятной для проверки. Формулы приведены с поясняющим текстом, а после расчетов даны выводы. Это соответствует задаче ВКР: не пересчитать исходные данные заново, а собрать и оформить работу в завершенный комплект по требованиям кафедры и ФОС ГИА.

Итоговое применение расчетов заключается в подготовке технически согласованной схемы защиты. Схема должна обеспечивать распознавание аварийного режима, выдачу команды на отключение, фиксацию причины срабатывания, передачу информации в систему управления и возможность последующего анализа. Такие требования соответствуют современному подходу к построению релейной защиты и автоматики электроэнергетических объектов [8].

При защите выпускной квалификационной работы расчетная часть должна рассматриваться как подтверждение инженерной обоснованности проекта. В докладе целесообразно кратко показать, какие аварийные режимы рассматриваются, какие защиты применяются, каким образом выбранный терминал реализует отключение короткого замыкания и почему предложенная схема

соответствует требованиям надежности, безопасности и эксплуатационной пригодности.

Рекомендуется использовать расчетные результаты совместно с рисунками и схемами приложений. Однолинейная схема показывает место установки защит и коммутационных аппаратов; структурная схема поясняет внутреннюю организацию терминала; схема соединений раскрывает связь измерительных, дискретных и выходных цепей; принципиальная электрическая схема показывает прохождение команд отключения, включения и сигнализации. В комплексе эти материалы обеспечивают полноту проектного решения.

Таким образом, расчетная часть связана с темой работы напрямую: она подтверждает возможность применения выбранной схемы защиты на распределительной части подстанции 110/35/6 кВ и показывает, какие параметры должны быть проверены при настройке терминала. В работе не требуется изменение исходной методики расчета, однако результаты должны быть представлены в единой логике проектирования схемы защиты подстанции Снежная.

При анализе аварийного отключения расчетные данные используются для проверки правильности работы защиты. Если зарегистрированный ток повреждения превышает уставку, а время отключения соответствует заданной выдержке, действие защиты признается корректным. Если срабатывание произошло при токе, меньшем уставки, или не произошло при расчетном аварийном токе, необходимо выполнять дополнительный анализ измерительных цепей, настроек терминала и состояния выключателя.

В процессе эксплуатации необходимо периодически сверять фактические параметры терминала с утвержденной документацией. Это связано с тем, что микропроцессорные устройства позволяют изменять уставки программно, без изменения схемы вторичной коммутации. Поэтому в составе документации должны храниться протоколы проверки, файлы параметров, схемы соединений и отметки о выполненных изменениях.

Перед вводом схемы защиты в работу проводится наладочная проверка. В ходе проверки имитируются токовые воздействия, контролируется

срабатывание каждой ступени защиты, проверяется прохождение команды на отключение, правильность сигнализации, регистрация аварийного события и обмен данными с системой верхнего уровня. Такая проверка подтверждает, что расчетные решения реализованы в реальных цепях.

При эксплуатации подстанции результаты расчетов должны быть отражены в карте уставок. Карта уставок является рабочим документом для оперативного и ремонтного персонала. В ней указываются значения токов и времен срабатывания, группы уставок, назначение дискретных входов, состояние программных переключателей и логика выходных реле. Несоответствие фактических уставок расчетным значениям является недопустимым.

Особое значение имеет резервирование действия защит. Если основная защита поврежденного присоединения не сработала, повреждение должно быть отключено вышестоящей защитой. Однако выдержка времени резервной защиты должна быть больше, чтобы исключить неселективное отключение. Расчетная часть позволяет обосновать такие временные интервалы и показать, что повреждение будет устранено без излишнего отключения неповрежденных элементов сети.

Дискретные входы и выходы терминала участвуют в формировании команд управления выключателем, сигналов блокировки, пуска автоматики и передачи информации в АСУ ТП. При проверке результатов проектирования следует контролировать соответствие напряжения оперативного тока, коммутационной способности выходных реле, состояния цепей отключения и включения выключателя. Нарушение хотя бы одного из этих условий снижает надежность всей схемы защиты.

Для микропроцессорного терминала защиты важным является качество входных измерительных цепей. Трансформаторы тока должны обеспечивать требуемую точность в рабочих и аварийных режимах. При насыщении трансформатора тока форма вторичного сигнала искажается, что может повлиять на измерительный орган защиты. Поэтому при внедрении схемы защиты необходимо

выполнять проверку не только расчетных токов, но и фактической пригодности измерительных трансформаторов.

Молниезащита рассматривается как элемент комплексной защиты подстанции от внешних перенапряжений. Атмосферные перенапряжения могут вызывать повреждение изоляции, ложные срабатывания аппаратуры и выход из строя электронных блоков. Поэтому расчет зоны защиты молниеотводов должен увязываться с расположением открытых распределительных устройств, силовых трансформаторов, порталов и зданий управления.

В расчетах заземляющего устройства учитывается необходимость ограничения напряжения прикосновения и шагового напряжения. Для подстанции это особенно важно, так как при повреждении изоляции или замыкании на землю потенциал заземляющего контура может возрасти. Надежная система заземления обеспечивает безопасность персонала, корректную работу защит и снижение вероятности вторичных повреждений оборудования [5].

Расчет токов короткого замыкания связан также с выбором коммутационной аппаратуры. Выключатель, разъединитель, токоведущие части и контакты цепей управления должны выдерживать термическое и электродинамическое воздействие токов повреждения. Поэтому результаты расчета используются не только для настройки реле, но и для проверки соответствия оборудования предполагаемым аварийным режимам.

Коэффициент чувствительности защиты должен подтверждать способность защиты сработать при минимальном расчетном токе короткого замыкания в конце защищаемой зоны. При недостаточной чувствительности необходимо рассматривать изменение уставок, применение другой схемы включения трансформаторов тока, использование дополнительных защит или изменение выдержек времени. Такие решения принимаются с учетом требований надежности и селективности [1].

Для подстанции с уровнями напряжения 110/35/6 кВ важно учитывать, что одна и та же авария может проявляться по-разному в разных частях схемы. Междуфазное короткое замыкание на стороне 6 кВ вызывает значительный ток в цепи

низшего напряжения и отражается на токах в обмотках трансформатора. Поэтому при анализе работы защиты необходимо проверять не только местную ступень МТЗ, но и резервное действие защит трансформатора и вводных присоединений.

При практическом применении результатов расчетов особое внимание необходимо уделять согласованию ступеней защиты. Первая ступень максимальной токовой защиты, как правило, используется для быстрого отключения близких коротких замыканий. Вторая и третья ступени применяются для резервирования и должны иметь выдержки времени, обеспечивающие селективность с защитами отходящих линий, секционных выключателей и трансформаторных присоединений.

Выполненные расчетные зависимости позволяют установить, что токи короткого замыкания являются исходной величиной для выбора параметров срабатывания защиты. Если уставка будет выбрана слишком низкой, возможны ложные отключения при пусковых токах, перегрузках и переходных режимах. Если уставка будет выбрана слишком высокой, защита может потерять чувствительность к удаленным коротким замыканиям и не выполнить свою основную функцию [10].

Для стороны 110 кВ основной задачей является обеспечение устойчивой работы силовых трансформаторов и корректного взаимодействия защит с вышестоящей сетью. Для сторон 35 и 6 кВ наибольшее значение имеют селективность максимальной токовой защиты, защита от замыканий на землю, правильность выбора трансформаторов тока, надежность цепей отключения и возможность передачи сигналов в систему диспетчерского контроля.

Подстанция 110/35/6 кВ является узлом, в котором силовые трансформаторы связывают несколько уровней напряжения. В такой схеме защита должна обеспечивать не только отключение поврежденного присоединения, но и сохранение питания неповрежденных участков сети. Поэтому результаты расчетов должны рассматриваться не отдельно, а как часть общей логики выбора уставок,

проверки чувствительности, оценки коммутационной способности и согласования ступеней защит.

Расчетная часть в составе выпускной квалификационной работы используется как инженерное обоснование выбранной схемы защиты и порядка действия устройств релейной защиты и автоматики. При этом расчеты токов короткого замыкания, релейной защиты, максимальной токовой защиты, заземления и молниезащиты рассматриваются в связи с распределительной частью подстанции, так как именно на отходящих присоединениях и на стороне среднего напряжения возникают режимы, требующие быстрого и селективного отключения повреждения [9].

### 3.12 Выводы по разделу 3

В расчетной части оформлены расчеты токов короткого замыкания, релейной защиты, максимальной токовой защиты, контактных соединений, заземляющих устройств и молниезащиты. Дополнительно пояснена связь расчетов с темой подстанции 110/35/6 кВ и область применения терминала ТЭМП 2501-31. Расчеты подтверждают необходимость выбора уставок с учетом селективности, чувствительности, надежности и условий эксплуатации объекта.

# 4 Охрана труда и безопасность выполнения работ

## 4.1 Общие требования

Общие требования безопасности знакомит с инструкцией с действующими требованиями по охране труда, которые необходимо выполнять электромонтеру, электромонтажнику, электромеханику при выполнении работ по обслуживанию, ремонту электрооборудования.

К самостоятельной работе в действующих электроустановках допускаются лица:

- достигшие 18-летнего возраста;
- прошедшие медицинское освидетельствование;
- прошедшие курсовое обучение по профессии;
- прошедшие вводный инструктаж и первичный инструктаж по охране труда на рабочем месте;
- освоившие навыки безопасных приемов труда под руководством опытного работника из числа электротехнического персонала;
- прошедшие проверку знаний по Правилам Устройства Электроустановок (ПУЭ), Межотраслевыми Правилами по охране труда (Правилам Безопасности) при эксплуатации электроустановок (ПБЭЭ), Правилам Технической Эксплуатации Электроустановок Потребителей (ПТЭЭП), инструкциям по охране труда, эксплуатационным и должностным инструкциям с присвоением квалификационной группы по электробезопасности;
- имеющие удостоверение на допуск к работе в электроустановках.

Виновные в несоблюдении требований инструкции, обязательств по безопасности труда привлекаются в установленном порядке к дисциплинарной, материальной, административной или уголовной ответственности. Нарушение или не соблюдение требований инструкции не может быть оправдано её не знанием.

### 4.2 Работа по обслуживанию силовых трансформаторов

Осмотр силовых трансформаторов должен производиться непосредственно с земли или со стационарных лестниц с поручнями.

Отбор газового реле работающего трансформатора выполнять только после разгрузки и отключения трансформатора.

Для выполнения работ внутри баков трансформаторов допускаются только специально подготовленные специалисты, хорошо знающие пути перемещения, исключающие падение и травмирование во время выполнения работ или осмотров активной части. Спецодежда работников должна быть чистой и удобной для передвижения, не иметь металлических застежек, защищать тело от перегрева и загрязнения маслом. Работать внутри трансформатора в защитной каске и перчатках.

Работы по регенерации трансформаторного масла, его осушке, чистке, дегазации, должны выполнятся с использованием защитной одежды и обуви.

### 4.3 Правила пользования средствами защиты в электроустановках

При обслуживании электроустановок напряжением до и выше 1000 В необходимо использовать средства защиты от поражения электрическим током. К электрозащитным средствам относятся:

- изолирующие штанги всех видов (оперативные, измерительные, для наложения заземления);

- изолирующие и электроизмерительные клещи;

- указатели напряжения всех видов и классов напряжений (с газоразрядной лампой, бесконтактные, импульсного типа, с лампой накаливания и др.);

- изолирующий инструмент;

- диэлектрические перчатки, боты и галоши, ковры, изолирующие подставки;

- переносные заземления;

- плакаты и знаки безопасности.

Средства защиты должны находится в специально отведенных местах, как правило, у входа в помещение, а также на щитах управлении согласно перечню.

Средства защиты, кроме изолирующих подставок, диэлектрических ковров, переносных заземлений, защитных ограждений, плакатов и знаков безопасности должны быть испытаны и иметь соответствующий штамп лаборатории, проводившие испытания, с указанием даты следующего испытания.

Перед каждым применением средства защиты персонал обязан проверить его исправность, отсутствие внешних повреждений, загрязнений, проверить по штампу срок годности.

Использование средств защиты с истекшим сроком годности запрещается.

Все имеющиеся в подразделении средства защиты должны учитываться в журнале учета и содержания средств защиты.

### 4.4 Требования электробезопасности при работах в РУ 110/35/6 кВ

Работы в распределительных устройствах подстанции относятся к работам повышенной опасности и должны выполняться только подготовленным электротехническим персоналом. При подготовке рабочего места необходимо снять напряжение, исключить возможность ошибочной подачи напряжения, проверить отсутствие напряжения, наложить заземления и вывесить запрещающие и предупреждающие плакаты. Последовательность этих действий направлена на исключение поражения персонала электрическим током [5].

Особое внимание уделяется цепям вторичной коммутации. Ошибки в этих цепях могут привести к ложному отключению оборудования, отказу защиты или появлению опасного потенциала на доступных частях. Поэтому при работах с терминалами РЗА необходимо применять исправный инструмент, проверять маркировку жил, не размыкать вторичные цепи трансформаторов тока под нагрузкой и соблюдать требования инструкций по эксплуатации.

### 4.5 Организация безопасной проверки устройств РЗА

Проверка устройств РЗА выполняется по программе, в которой указываются состав операций, используемые приборы, значения подаваемых токов и напряжений, ожидаемые времена срабатывания и критерии приемки. Перед началом проверки персонал должен убедиться в правильности схемы испытаний и в том, что испытательные сигналы не приведут к фактическому отключению оборудования, если такая операция не предусмотрена программой.

При проверке токовых цепей необходимо учитывать опасность размыкания вторичной обмотки трансформатора тока. Размыкание может привести к появлению высокого напряжения на вторичных выводах и повреждению изоляции. Поэтому любые переключения во вторичных токовых цепях выполняются после их предварительного шунтирования или отключения первичной нагрузки.

### 4.6 Пожарная безопасность и действия при аварийной ситуации

На подстанциях имеются источники повышенной пожарной опасности: маслонаполненное оборудование, кабельные сооружения, аккумуляторные батареи, шкафы оперативного тока и силовые цепи. Короткие замыкания могут сопровождаться дуговым разрядом, выделением тепла и повреждением изоляции. Поэтому в помещениях РЗА, распределительных устройствах и на открытых площадках должны поддерживаться исправность средств пожаротушения, свободные проходы и доступ к коммутационным аппаратам.

### 4.7 Выводы по разделу 4

В разделе охраны труда рассмотрены общие требования безопасности, правила обслуживания силовых трансформаторов, применение средств защиты и дополнительные требования к работам в распределительных устройствах 110/35/6 кВ. Показано, что безопасность эксплуатации схемы защиты зависит не только от правильности технического решения, но и от качества организации работ, проверки вторичных цепей, ведения документации и соблюдения правил электробезопасности.

Схема однолинейная подстанции приведена в приложении А, схема соединений и подключений - в приложении Б, структурная схема цифрового устройства защиты ТЭМП 2501-31 - в приложении В, а схема электрическая принципиальная защиты трансформаторной подстанции от короткого замыкания - в приложении Г.

Перед передачей объекта в эксплуатацию персонал должен получить комплект документации, позволяющий однозначно определить назначение каждой цепи. В комплект должны входить однолинейная схема, схема соединений, принципиальная схема, карта уставок, инструкция по оперативному обслуживанию и протоколы наладки. Наличие такого комплекта снижает риск ошибочного отключения или неправильной проверки устройства.

При выполнении работ с микропроцессорными терминалами необходимо учитывать, что изменение программных параметров не всегда заметно визуально. В отличие от электромеханических реле, где положение шкалы или перемычки можно проверить непосредственно, уставки терминала хранятся в памяти. Поэтому после каждой настройки необходимо распечатывать или сохранять файл параметров и сверять его с утвержденной картой уставок.

Безопасность эксплуатации также зависит от состояния оперативного тока. Цепи питания защит, управления выключателями и сигнализации должны иметь надежный источник питания и защиту от коротких замыканий. При потере оперативного питания защита может потерять возможность выдать команду на отключение, поэтому состояние цепей оперативного тока контролируется при плановых проверках и при осмотрах оборудования.

После аварийного отключения запрещается повторно включать оборудование без выяснения причины срабатывания защиты, если это не предусмотрено алгоритмом автоматики. Оперативный персонал должен оценить показания терминала, состояние выключателя, наличие сигналов повреждения, данные АСУ ТП и внешние признаки неисправности. Только после анализа допускается восстановление нормальной схемы электроснабжения.

Таким образом, раздел охраны труда связан с технической частью работы напрямую. Правильно разработанная схема защиты должна не только отключать короткое замыкание, но и быть безопасной для проверки, обслуживания и последующего анализа. Это особенно важно для подстанций с несколькими уровнями напряжения, где ошибка персонала или отказ цепи может повлиять на значительное количество потребителей.

## Заключение

В выпускной квалификационной работе выполнена разработка и оформление схемы защиты трансформаторной подстанции 110/35/6 кВ от токов короткого замыкания подстанции Снежная г. Гремячинск.

В аналитической части рассмотрены структура электросетей, назначение устройств релейной защиты и основные требования к защите трансформаторной подстанции. Обосновано применение микропроцессорного терминала, совмещающего функции защиты, автоматики, управления, сигнализации, измерения и регистрации аварийных параметров.

В описательной части приведены назначение, технические данные, характеристики надежности, функции защиты и автоматики устройства ТЭМП 2501-31, а также рассмотрены составные блоки устройства: блок питания, блок входных трансформаторов, блок входных дискретных сигналов, блок индикации и управления, измерительный блок и блок выходных реле.

В расчетной части оформлены расчеты токов короткого замыкания, релейной защиты, максимальной токовой защиты, контактных соединений, заземляющих устройств и молниезащиты. Расчетные материалы оставлены на основе предоставленного исходного текста без пересчета численных данных.

В приложениях представлены схемы из предоставленных файлов, отражающие структуру цифрового устройства защиты и подключение элементов схемы защиты трансформаторной подстанции от короткого замыкания. Полученные материалы могут быть использованы при изучении принципов построения микропроцессорной релейной защиты и при подготовке проектной документации по объектам электроснабжения.

## Список использованных источников

1 Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. - М.: Высшая школа, 2006.

2 Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. - М.: Академия, 2004.

3 Белоус А.И., Ефименко С.А., Турцевич А.С. Полупроводниковая силовая электроника. - М.: Техносфера, 2013.

4 ГОСТ 7.32-2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

5 ГОСТ 12.2.007.0-75. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности.

6 Князевский Б.А., Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий. - М.: Высшая школа, 1979.

7 Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. - М.: Энергоатомиздат, 1989.

8 Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии. - М.: НЦ ЭНАС, 2023.

9 Правила устройства электроустановок. 7-е изд. - М.: Энергосервис, 2022.

10 РД 153-34.0-35.301-2002. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты.

11 Розанов Ю.К., Лепанов М.Г. Силовая электроника: учебник и практикум для вузов. - М.: Юрайт, 2021.

12 Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю., Яшков В.А. Электроснабжение промышленных предприятий. - М.: Высшая школа, 2001.

13 Устройство ТЭМП 2501-31. Руководство по эксплуатации. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.

14 Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем. - М.: Энергоатомиздат, 1998.

15 Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. - СПб.: ПЭИПК, 2003.

16 Электротехнический справочник: В 4 т. / под общ. ред. В.Г. Герасимова. - М.: Издательство МЭИ, 2002.

# Приложения

## Приложение А

## Схема №1

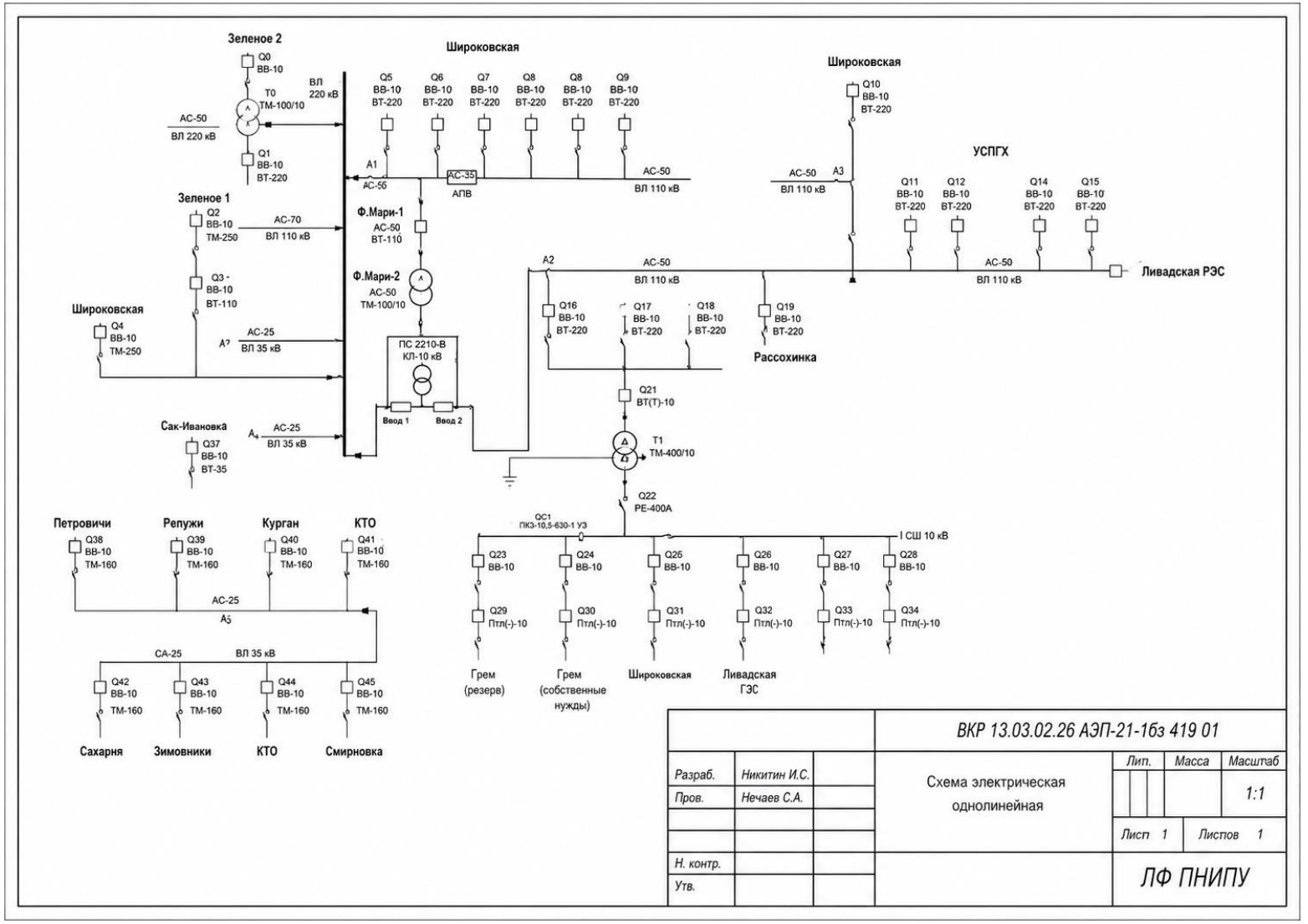


Рисунок А.1 – Схема электрическая однолинейная

## Приложение Б

## Схема №2

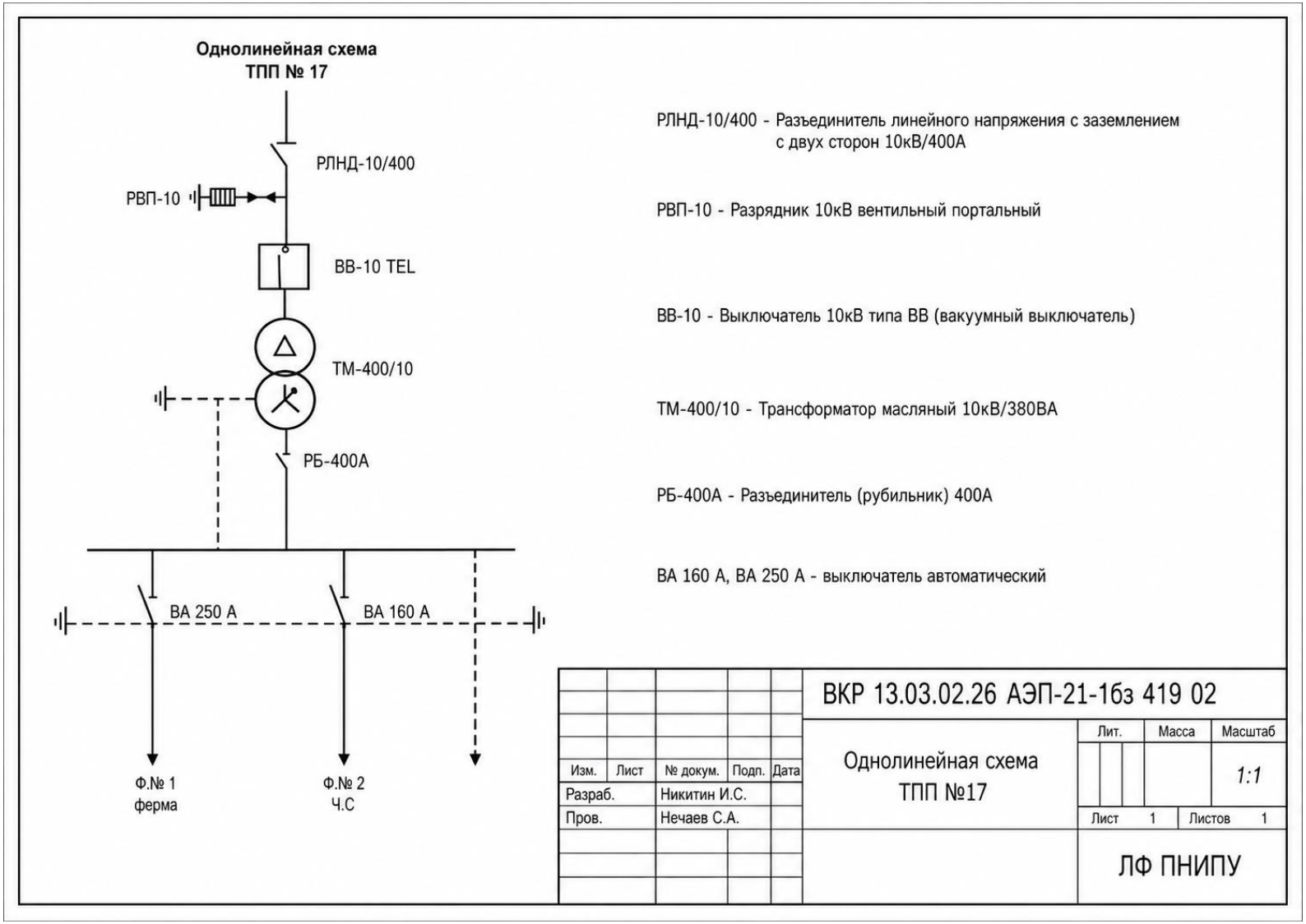


Рисунок Б.1 – Однолинейная схема ТПП №17

## Приложение В

## Схема №3

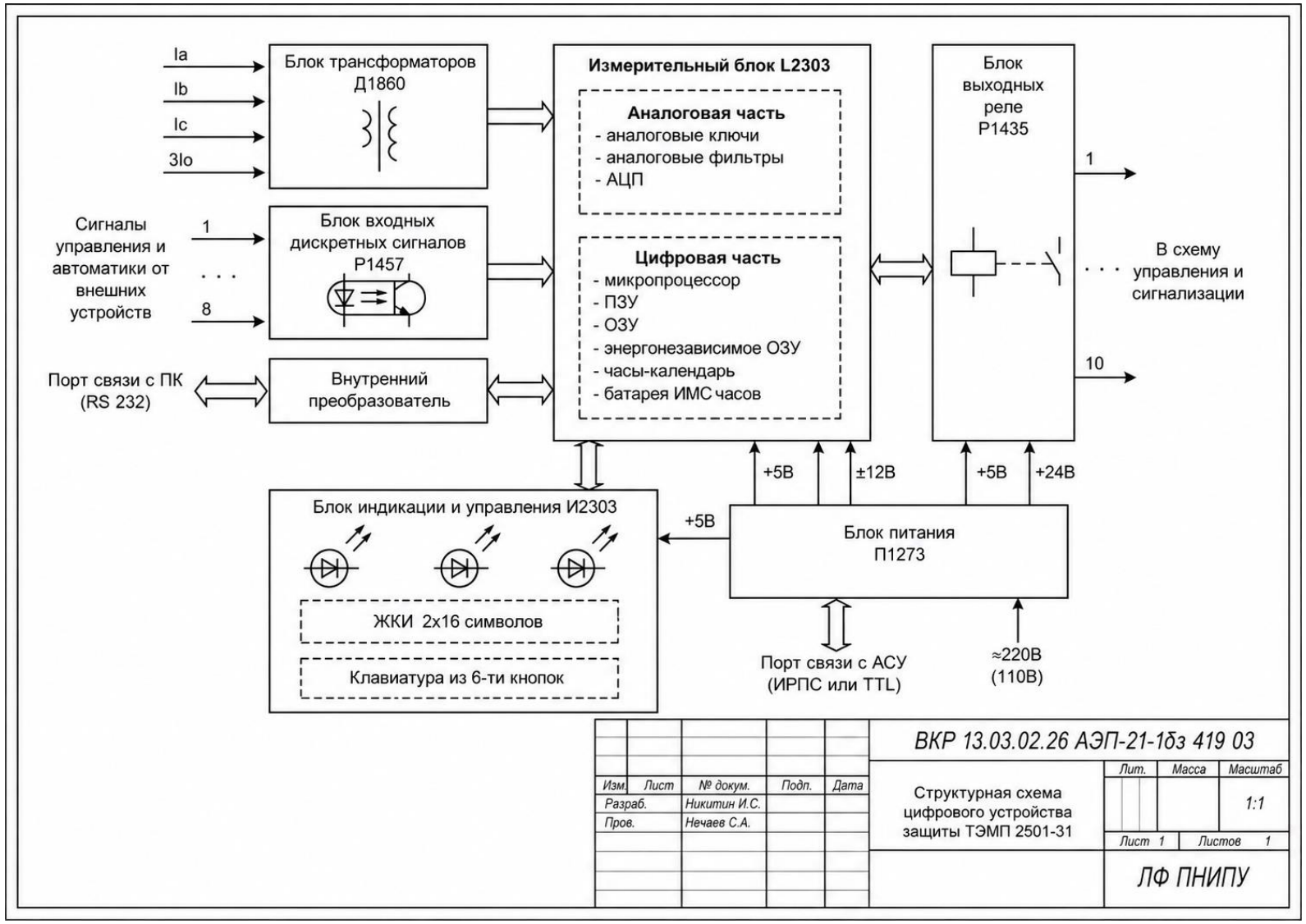


Рисунок В.1 – Структурная схема цифрового устройства защиты ТЭМП 2501-31

## Приложение Г

## Схема №4

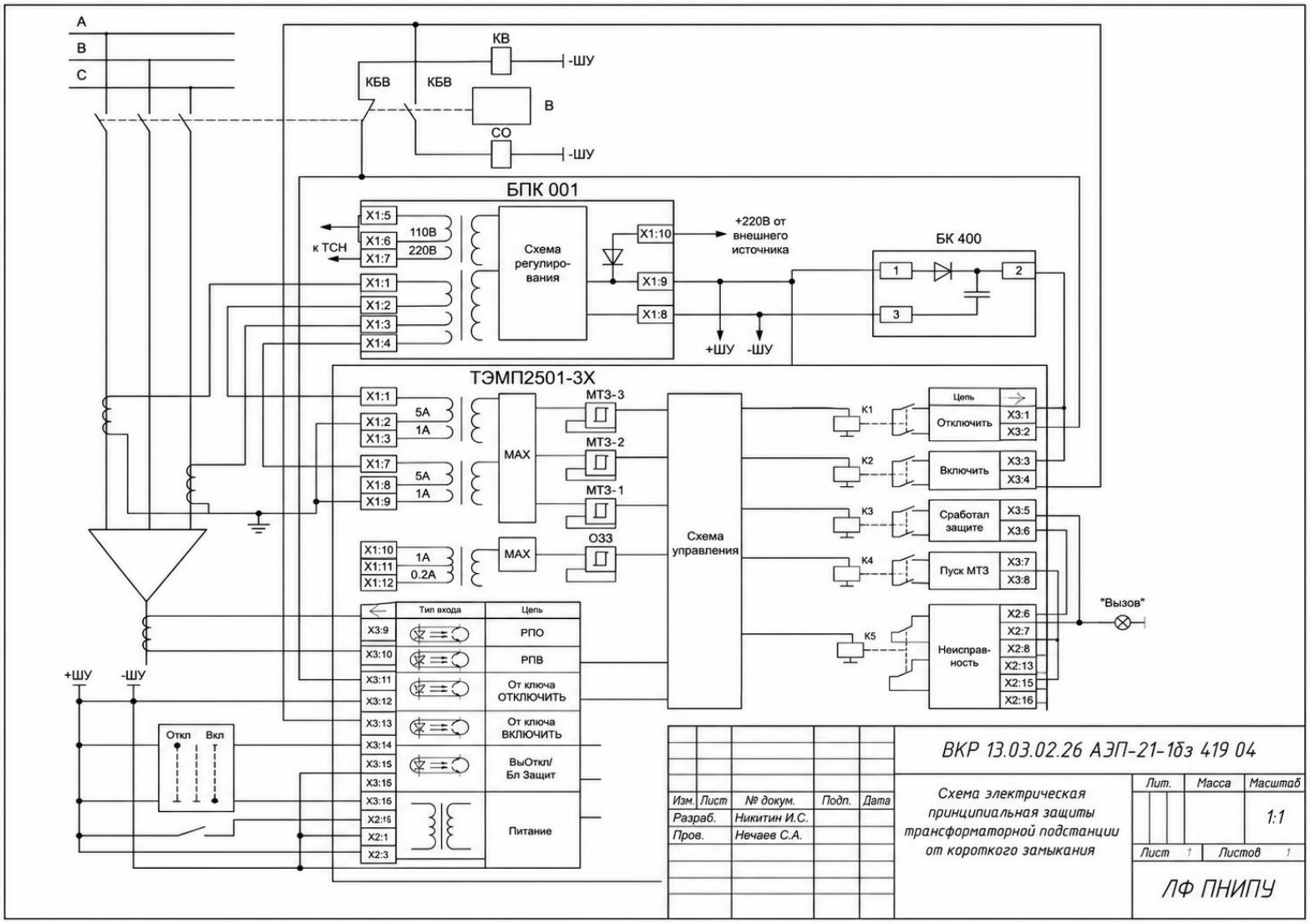


Рисунок Г.1 – Схема электрическая принципиальная защиты трансформаторной подстанции от короткого замыкания