

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 комплексов

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:

**«Модернизация подстанции Калино с переходом с электромеханической
защиты на микропроцессорную»**

Студент: _____ В.П. Долматов
(подпись, дата)

Группа: АЭП21-1 боз

Состав ВКР:

1. Пояснительная записка на _____ стр.
2. Графическая часть на _____ листах.
3. Электронный носитель с материалами ВКР.

Руководитель: _____ Ст. преподаватель кафедры ОНД В.А. Комаренко
(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 комплексов»

Профиль: Автоматизированный электропривод и робототехнические комплексы Кафедра: Обще-
научных дисциплин

УТВЕРЖДАЮ

и.о. зав. кафедрой ОНД

К.В. Кондратьева

«03» Марта 2026 г.

ЗАДАНИЕ на выпускную квалификационную работу

Фамилия, имя, отчество: Долматова Виктора Петровича

Группа: АЭП21-1 боз

Начало выполнения работы: 05.февраля 2026 года

Срок предоставления на кафедру: 11 июня 2026 года

Защита работы на заседании ГЭК: 22 июня 2026 года

1. Выпускная квалификационная работа на тему: «Модернизация подстанции Калино с переходом с электромеханической защиты на микропроцессорную».

2. Исходные данные к работе: Проектная документация на подстанцию «Калино», технические паспорта электрооборудования, результаты расчётов токов короткого замыкания для сети 500кВ, нормативно-техническая документация (ПУЭ, ГОСТ Р, СТО ПАО «Россети»), рекомендации производителей микропроцессорных устройств РЗА (ООО НПП «ЭКРА», НТЦ «Механотроника»), материалы диспетчерских служб (ОДУ Урала, Пермское РДУ).

3. Содержание пояснительной записки:

Введение. Обоснование необходимости реконструкции релейной защиты подстанции «Калино» в связи с длительным сроком эксплуатации, моральным и физическим старением оборудования.

Формулировка цели работы (разработка технических решений по замене электромеханических защит на микропроцессорные комплексы РЗА). Определение задач: анализ существующего состояния РЗА, выбор оборудования, расчёт уставок, технико-экономическое обоснование.

Основная часть:

Глава 1. Описание ОРУ и РЗА, находящейся в работе на ПС «Калино». Краткая характеристика подстанции как системного объекта ПАО «Россети». Анализ состава устройств РЗА ВЛ 500 кВ, ВЛ 220 кВ и шиносоединительного выключателя 220 кВ. Техническое состояние оборудования: электромеханическая база, срок службы более 50 лет, частичная модернизация 2017 года (только ПГРЭС-1 и ПГРЭС-2). Вывод о необходимости полной реконструкции.

Глава 2. Технические требования для РЗА на микропроцессорной базе для ВЛ 500 кВ. Общие требования и выбор уставок устройств РЗА (расчёт токов КЗ, принципы выбора дистанционных и токовых защит). Общие технические требования к терминалам РЗА (цепи тока, напряжения, питание, дискретные входы, коммутация). Анализ и выбор оборудования: изменение нормативной и политической ситуации (импортозамещение, прекращение поставок западного оборудования), обзор отечественных производителей (ЭКРА, Релематика, Механотроника, РАДИУС Автоматики),

сравнительный анализ функций, вывод о выборе оборудования ЭКРА. Технические требования к защитам ВЛ 500 кВ (продольная дифференциальная, дифференциально-фазная, дистанционная, токовая нулевой последовательности), к УРОВ, АПВ, АУВ.

Глава 3. Расчёты уставок релейных защит. Расчёт нагрузки вторичных обмоток ТТ 500 кВ. Расчёт уставок дифференциально-фазной защиты ВЛ «Калино – Буйская» (пусковые органы, проверка чувствительности). Расчёт уставок ОАПВ. Расчёт уставок дифференциальной защиты 500 кВ.

Заключение. Краткое изложение решённых задач и полученных результатов: обоснована необходимость реконструкции, сформулированы технические требования, выбран комплекс РЗА производства ООО НПП «ЭКРА», выполнены расчёты уставок, подтверждена чувствительность защит. Практическая значимость работы — обеспечение надёжного, быстродействующего и селективного функционирования РЗА подстанции после реконструкции, снижение эксплуатационных издержек. Дополнительные указания: нет

4. Основная литература:

- ГОСТ 7.32-2017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.
- Е.Н. Хаматнурова, Ю.А. Чурсина, Методические указания по выполнению выпускных квалификационных работ для студентов всех направлений, реализуемых кафедрой.
- Правила устройства электроустановок (ПУЭ-7). – 7-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2020. – 512 с.
- Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. — М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2024.
- СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам релейной защиты и автоматики / ПАО «ФСК ЕЭС».
- Чернобровов, Н. В. Релейная защита : учебник. — 5-е изд. — М. : Энергоатомиздат, 2018.
- Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита. — М. : Энергоатомиздат, 2017.
- Овчаренко, Н. И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем. М. : Издательский дом МЭИ, 2016.
- Техническая документация ООО НПП «ЭКРА»: терминалы серии БЭ2502, руководства по эксплуатации.

Руководитель ВКР _____ Ст. преподаватель кафедры ОНД В.А. Комаренко
(подпись, дата)

Задание получил _____ В.П. Долматов
(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	01.11.25	09.11.25	
2	Написание ВКР.	20/30	10.11.25	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	03.06.26	04.06.26	
5	Представление ВКР на проверку заведующему кафедрой	10/85	11.06.26	12.06.26	
6	Защита на заседании ГЭК	7/92	22.06.26	23.06.26	

Руководитель ВКР _____ Ст. преподаватель кафедры ОНД В.А Комаренко
(подпись, дата)

«С календарным графиком ознакомлен» _____ В.П. Долматов
(подпись, дата)

Содержание

Введение.....	3
Перечень сокращений.....	4
Глава 1. Описание ОРУ и РЗА находящейся в работе на ПС Калино.....	6
1.1 Краткая характеристика предприятия и его деятельности.....	6
1.2 Состав устройств РЗА ВЛ 500 кВ.....	6
1.3 Состав устройств РЗА ВЛ 220кВ.....	9
1.4.Состав устройств РЗА ШСВ 220 кВ.....	10
1.5 Анализ технического состояния подстанции.....	10
1.6 Вывод по главе 1.....	10
Глава 2 Технические требования для РЗА на МП базе для ВЛ 500кВ.....	12
2.1 Общие требования и выбор уставок устройств РЗА.....	12
2.2 Общие технические требования к терминалам РЗА.....	
2.3 Общие требования к выбору оборудования.....	16
Изменение нормативной и политической ситуации.....	
2.3.2. Отечественные производители оборудования РЗА.....	17
2.3.3 Сравнительный анализ функциональных возможностей.....	17
2.3.4 Выводы по выбору оборудования.....	19
2.4 Технические требования к терминалам защит ВЛ 500 кВ.....	20
2.4.1 Комплектация защит ВЛ 500кВ	20
2.5 Вывод по главе 2.....	35
Глава 3. Расчеты уставок релейных защит.....	36
3.1 Расчет номинальной нагрузки вторичных обмоток ТТ 500кВ.....	36
3.2 Результаты расчета уставок РЗА.....	37
Заключение.....	56
Список использованных источников.....	58

ВВЕДЕНИЕ

Модернизация систем релейной защиты является многогранной задачей, включающей выбор принципиальных схем электрических соединений, определение состава электротехнического оборудования, его рациональное размещение, выполнение необходимых расчётов, а также поиск оптимальных пространственных и компоновочных решений как для отдельных узлов, так и для объекта в целом.

Ввиду продолжительного периода эксплуатации, физического износа и морального устаревания действующего оборудования, а также его несоответствия актуальным нормативным требованиям и условиям безопасной эксплуатации, на подстанции «Калино» возникает необходимость в комплексной реконструкции устройств релейной защиты.

С этой целью были определены и рассчитаны токи короткого замыкания — такие токовые нагрузки, при которых электрооборудование и токоведущие части оказываются в наиболее тяжёлых аварийных режимах. Полученные значения токов КЗ в дальнейшем служат основой для подбора электротехнических аппаратов, выбора способов ограничения аварийных токов, а также для определения параметров срабатывания (уставок) релейной защиты и устройств противоаварийного управления.

В рамках данной работы проведена оценка возможных эксплуатационных режимов в сети напряжением 500/220 кВ как при штатной работе, так и в период выполнения реконструктивных мероприятий.

К числу ключевых задач, решаемых при реконструкции релейной защиты, относятся:

- повышение быстродействия защитных устройств;
- обеспечение более высокой надёжности и устойчивости функционирования;
- исключение различного рода отказов в работе защит;
- сокращение объёмов и периодичности технического обслуживания;
- уменьшение ежегодных эксплуатационных расходов и снижение экономического ущерба, связанного с заменой оборудования, исчерпавшего свой ресурс.

Перечень сокращений

АПВ	Автоматическое повторное включение
АСН	Автоматика снижения напряжения
АСУТП	Автоматизированная система управления технологическими
АСУ	Автоматизированная система управления
АУВ	Автоматика управления выключателем
ВОЛС	Волоконно-оптическая линия связи
ВЧ	Высокочастотный
ВЧТО	Высокочастотное телеотключение
ДЗ	Дистанционная защита
ДЗЛ	Дифференциальная защита линии
ДЗШ	Дифференциальная защита шин
ЗМН	Защита минимального напряжения
МТЗ	Максимальная токовая защита
ОМП	Устройство определения места повреждения
ПА	Противоаварийная автоматика
ПУЭ	Правила устройства электроустановок
РАС	Регистратор аварийных событий и процессов
РЗА	Релейная защита и автоматика
УПАСК	Устройство передачи аварийных сигналов и команд
УРОВ	Устройство резервирования при отказе выключателя
ФСК-	Федеральная сетевая компания единой энергетической системы
ЕЭС	
ШСВ	Шиносоединительный выключатель
ЧАПВ	Частотное автоматическое повторное включение
НДЗ	Направленная дистанционная защита
ДЗ	Дистанционная защита
ТЗНП	Токовая защита нулевой последовательности
МТО	Максимальная токовая отсечка

ОАПВ	Однократное автоматическое повторное включение
ЗНР	Защита нулевой последовательности
АЛАР	Автоматика ликвидации асинхронного режима
ФОСШ	Фиксация отключения системы (шин)
ФТКЗ	Фиксация тяжести короткого замыкания
ФОЛ	Фиксация отключения линии
АУВ	Автоматика управления выключателем.
ТАПВ	Трехфазное автоматическое повторное включение
ОАПВ	Однофазное автоматическое повторное включение
ЗНФР	Защита от неполнофазного режима
ЗНФ	Защита от непереключения фаз
ПВЗУ	Приемопередатчик высокочастотной защиты универсальный

Глава 1. Описание ОРУ и РЗА находящейся в работе на ПС Калино

1.1 Краткая характеристика предприятия и его деятельности

Территориально подстанция 500 кВ Калино расположена в Чусовском районе Пермского края и является объектом транспортной электрической сети 500 кВ, ПАО «Россети» – Пермское предприятие МЭС выполняя роль системной подстанции 500 кВ, которая оказывает услуги по транспорту и трансформации электрической мощности и электроэнергии на Федеральный оптовый рынок электроэнергии и мощности. По межсистемным линиям 500 кВ, связывающим подстанцию Калино с подстанциями 500 кВ Тагил и Буйская, осуществляя обмен мощностью между энергосистемами ОЭС Урала – Пермской, Башкирской, Свердловской и Удмуртской. Присоединение подстанции Калино к сети 500 кВ осуществляется по четырём ВЛ 500 кВ.

Одновременно подстанция Калино является также источником электроснабжения потребителей на розничном рынке Пермского Края, обеспечивая поставки электроэнергии по линиям электропередачи, подключённым к ОРУ 220 кВ и 110 кВ. Подстанция Калино является основным источником электроснабжения Чусовского промышленного района. По сети 220 кВ электрическая мощность передаётся также в Свердловскую область. От подстанции Калино отходят шесть ВЛ 220 кВ и восемь ВЛ 110 кВ.

На данный момент подстанция Калино на напряжение 500/220 кВ имеет следующие защиты и автоматику:

1.2 Состав устройств РЗА ВЛ 500 кВ

1) В состав устройств РЗА ВЛ 500 кВ ППРЭС1 входят:

Микропроцессорные терминалы производства ООО НПП «ЭКРА», а также устройства, выполненные на электромеханической базе.

Для защиты ВЛ 500 кВ Пермская ГРЭС – Калино №1 используются следующие

щие устройства:

микропроцессорные терминалы и устройства на электромеханической базе:

- Комплект РЗА №1 ВЛ 500 кВ Пермская ГРЭС – Калино №1 (НДЗ, ДЗ, ТЗНП, МТО, ОАПВ, ЗНР);
- Комплект РЗА №2 ВЛ 500 кВ Пермская ГРЭС – Калино №1 (ДЗЛ, ДЗ, ТЗНП, МТО, ОАПВ, ЗНР);

Комплект РЗА №3 ВЛ 500 кВ Пермская ГРЭС – Калино №1 (ДЗЛ, ДЗ, ТЗНП, МТО, ОАПВ, ЗНР);

- панели автоматики управления выключателем.
- ТАПВ – автоматика повторного включения;
- УРОВ – устройство резервирования при отказе выключателя;
- ОМП («Бреслер») – прибор определения места повреждения;
- АУРА – регистратор аварийных событий;
- ЗНПФ – защита от непереключения фаз;
- ПРМ КЕДР 2,0 188, ПРД АКА-356 – устройства передачи аварийных сигналов и команд (УПАСК);
- МКПА – микропроцессорный комплекс противоаварийной автоматики с функциями АЛАР, ФОСШ, ФТКЗ, ФОЛ.

2) В состав устройств РЗА ВЛ 500 кВ ПГРЭС2 входят:

Микропроцессорные терминалы производства ОО НПП «ЭКРА», а также устройства, выполненные на микроэлектронной и электромеханической базе.

Для защиты ВЛ 500 кВ Пермская ГРЭС – Калино №2 используются следующие устройства:

- микропроцессорные терминалы:
- Комплект РЗА №1 ВЛ 500 кВ Пермская ГРЭС – Калино №2 (НДЗ, ДЗ, ТЗНП, МТО);
- Комплект РЗА №2 ВЛ 500 кВ Пермская ГРЭС – Калино №2 (ДЗЛ, ДЗ, ТЗНП, МТО);
- Комплект РЗА №3 ВЛ 500 кВ Пермская ГРЭС – Калино №2 (ДЗЛ, ДЗ, ТЗНП, МТО);

- Комплект РЗА ВВ1 (ВВ2) (АУВ, УРОВ, ТАПВ, ОАПВ, ЗНФР, ЗНФ);
- ОМП («Бреслер») – прибор определения места повреждения;
- АУРА – регистратор аварийных событий;
- МКПА – микропроцессорный комплекс противоаварийной автоматики.

3) В состав устройств РЗА ВЛ 500 кВ Тагил входят:

- ДФЗ 503 с ВЧ постом - дифференциально-фазная защита с ВЧ приемопередатчиком типа ПВЗУ-Е;
- ДЗ 503 – дистанционная защита;
- ТЗНП (33) – токовая защита нулевой последовательности (защита от замыканий на землю);
- МФО – междуфазная токовая отсечка;
- УПКЦ – устройство высокочастотного телеотключения;
- АПВ 503 – автоматика повторного включения;
- ОМП – приборы определения места повреждения;
- АУРА – регистратор аварийных событий;
- УРОВ – устройство резервирования при отказе выключателей;
- ЗНФР – защита от неполнофазного режима;
- ЗНПФ – защита от непереключения фаз;
- ППРЗ – подменные панели резервных защит;
- МКПА – микропроцессорный комплекс противоаварийной автоматики.

4) В состав устройств РЗА ВЛ 500 кВ Буйская входят:

- ДФЗ 503 с ВЧ постом - дифференциально-фазная защита с ВЧ приемопередатчиком типа ПВЗУ;
- ДЗ 503 – дистанционная защита;
- ТЗНП (33) – токовая защита нулевой последовательности (защита от замыканий на землю);
- МФО – междуфазная токовая отсечка;
- УПАСК – устройство передачи и приёма сигналов противоаварийной автоматики и релейной защиты;
- АПВ 503 – автоматика повторного включения;

- АУРА – регистратор аварийных событий;
- ИМФ – индикатор микропроцессорный фиксирующий
- УРОВ – устройство резервирования при отказе выключателей;
- ЗНФР – защита от неполнофазного режима;
- ЗНПФ – защита от непереключения фаз;
- МКПА – микропроцессорный комплекс противоаварийной автоматики;
- ППРЗ – подменные панели резервных защит.

Все устройства РЗА ВЛ 500кВ находятся в управлении диспетчера ОДУ Урала

Все устройства релейной защиты и автоматики должны быть включены в работу

1.3 Состав устройств РЗА ВЛ 220кВ

- ДФЗ с ВЧ постом типа ДФЗ-201 – дифференциально-фазная защита с ВЧ приемопередатчиком;
- ДЗ – дистанционная защита типа ЭПЗ-1636;
- ТЗНП (ЗЗ) – токовая защита нулевой последовательности (защита от замыканий на землю);
- МФТО – междуфазная токовая отсечка;
- АПВ – автоматическое повторное включение;
- ОМП – приборы определения места повреждения;
- АУРА – регистратор аварийных событий;
- УРОВ – устройство резервирования при отказе выключателей;
- ЗНПФ – защита от непереключения фаз;
- АПАХ – автоматика прекращения асинхронного хода;
- АРЛ – автоматика разгрузки линии;
- ФОЛ – фиксация отключенной линии.

Все устройства РЗА ВЛ 220кВ находятся в управлении диспетчера Пермского РДУ.

Все устройства релейной защиты и автоматики должны быть включены в ра-

боту.

1.4 Состав устройств РЗА ШСВ 220 кВ

- 1) Двухступенчатая токовая защита от междуфазных замыканий:
- 2) Земляная 3-х ступенчатая направленная токовая защита:
- 3) Ускорение защит:
 - а) II ступень м/ф защиты;
 - б) II ступень земляной защиты.
- 4) АПВ:
 - а) с контролем синхронизма между ТН 220 кВ 1 и 2СШ 220 кВ;
 - б) с контролем отсутствия напряжения на 1 или на 2СШ 220 кВ.

1.5 Анализ технического состояния подстанции

Подстанция «Калино» введена в эксплуатацию в 1964 году (класс напряжения 220/110/10 кВ). В 1975 году введено в работу ОРУ 500 кВ. Устройства РЗА размещены в зданиях ОПУ 220 кВ и ОПУ 500 кВ. Панели защиты в обоих пунктах управления выполнены на электромеханической базе. Срок их службы превышает 50 лет, что привело к моральному и физическому старению оборудования. В 2017 году произведена частичная замена основных защит воздушных линий 500 кВ ПГРЭС-1 и ПГРЭС-2 — они переведены на микропроцессорную элементную базу. Полномасштабная реконструкция остальных устройств РЗА до настоящего времени не выполнялась.

1.6 Вывод по главе 1

В результате анализа технического состояния подстанции «Калино» установлено, что объект введён в эксплуатацию в 1964 году, а с 1975 года функционирует ОРУ 500 кВ. Устройства релейной защиты и автоматики размещены в двух пунктах управления (ОПУ 220 кВ и ОПУ 500 кВ). Оборудование РЗА выполнено на электромеханической элементной базе, его фактический срок службы превышает пять десятилетий, что привело к полному моральному и физическому износу.

В главе проведён анализ существующей релейной защиты до замены, описа-

ны работающие на подстанции защиты. В соответствии с заданием на проектирование будем рассматривать основные технические решения по замене устаревшего оборудования и совершенствованию применяемых защит.

Глава 2. Технические требования для РЗА на МП базе для ВЛ 500

2.1 Общие требования и выбор уставок устройств РЗА

Для выбора принципов защиты и уставок защит в проекте выполнены расчеты токов короткого замыкания для различных режимов работы и мест повреждения.

При расчёте уставок устройств РЗА ЛЭП предполагалось следующее:

- дистанционные органы, в составе резервных защит линий, используются в основном для защиты от междуфазных повреждений. При этом дистанционные органы от КЗ на землю рекомендуется использовать также и для первых ступеней, уставки которых выбираются по условию отстройки от однофазных КЗ в конце защищаемой зоны с учётом нагрузки и не требуют дополнительного согласования с защитами смежных элементов сети;

- дистанционные органы остальных ступеней защиты от КЗ на землю должны быть выведены из действия (если такие функции есть - зависит от производителя терминала), а функции резервирования при КЗ на землю возлагаются на токовые направленные защиты нулевой последовательности (ТНЗНП);

- в качестве защиты от замыкания на землю (ТНЗНП) рассмотрено использование многоступенчатой токовой защиты, входящей в состав терминалов, включаемой на утроенный ток нулевой последовательности.

В связи с тем, что универсальных методик расчетов РЗ для программно-технических средств различных производителей не существует, в качестве аналога для расчетов основных (дифференциальных защит) приняты системы РЗА отечественного производства на базе шкафов ООО НПП «ЭКРА» (далее - защиты «ЭКРА»).

Проведенные расчёты защит ВЛ показали следующее:

1) Дифференциально-фазные ВЧ защиты линий (ДФЗ), ДЗЛ.

Для оценки чувствительности рассмотрено использование шкафов защиты «ЭКРА», в которых наряду с традиционными пусковыми органами тока используются также пусковые органы, реагирующие на аварийные составляющие

токов прямой (I1) и обратной (I2) последовательностей (ДФЗ).

Результаты расчета приведены в таблице 7

Выполненные расчеты показали, что регламентированная чувствительность основных пусковых органов (ПО), органа манипуляции (ОМ) и реле сопротивления обеспечивается.

ПО по разности фазных токов вводить в работу нецелесообразно, ввиду его неудовлетворительной чувствительности к КЗ в конце ВЛ.

2) Дистанционные защиты линий (ДЗ).

Результаты расчета приведены в таблице 7

Защита входит в комплект резервных защит терминалов у всех разработчиков РЗА, имеет от трёх до шести ступеней у разных производителей.

Расчеты подтверждают, что обеспечивается необходимый уровень защиты линий от междуфазных КЗ.

3) Токовые защиты линий.

Токовая направленная защита нулевой последовательности от замыканий на землю (ТНЗНП) входит в комплект резервных защит терминалов, имеет от четырех до семи ступеней, реле направления мощности нулевой последовательности.

Результаты расчета приведены в таблице 7

4) Дальнее резервирование элементов сети 500кВ.

В данном проекте при выборе ориентировочных уставок была проанализирована возможность выполнения дальнего резервирования резервными защитами смежных элементов сети. Дальнее резервирование рассматриваемых резервных защит ВЛ в основном обеспечивается при поочередном каскадном действии защит и УРОВ.

Дальнее резервирование в ряде случаев технически выполнить сложно. Поскольку все элементы сети 500кВ имеют надежное ближнее резервирование и УРОВ, то отдельные исключительные случаи не обеспечения дальнего резервирования допускаются согласно ПУЭ (п. 3.2.17.)

Расчет уставок выполнен в соответствии с действующими нормативны-

ми документами, руководящими указаниями по выбору уставок РЗА и рекомендациями фирмы ООО НПП «ЭКРА».

Выбранные уставки соответствуют техническим возможностям реле.

Результаты расчета токов КЗ и уставок устройств РЗА приведены в таблице 7

2.2 Общие технические требования к терминалам РЗА

Все устройства РЗА должны быть выполнены с использованием микропроцессорных (МП) устройств, характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Общие технические требования к терминалам РЗА

Наименование требования или функции	Необходимое значение
1 Входные цепи тока устройств:	
1.1 Номинальный фазный ток, А	1 или 5
1.2 Длительно допустимый ток (термическая стойкость)	$2 \times I_{ном}$
1.3 Допустимый ток в течение 1 с (термическая стойкость)	$100 \times I_{ном}$
1.4 Диапазон рабочих токов	$(0,1-30) \times I_{ном}$
1.5 Максимальное потребление мощности на фазу при $I_{ном}$, В·А	0,5
1.6 Корректная работа устройств при КЗ в защищаемой зоне с периодической составляющей до $30 I_{ном}$ и апериодической составляющей с постоянной времени до 0,3 с обеспечивается при токовой погрешности ТТ не более 50% в установившемся режиме активной нагрузки	Выполняется
2 Входные цепи напряжения устройств:	
2.1 Номинальное линейное напряжение, В	100
2.2 Длительно допустимое напряжение (термическая стойкость)	$1,5 \times U_{ном}$
2.3 Допустимое напряжение в течение 1 с	$2,5 \times U_{ном}$
2.4 Длительно допустимое напряжение $3U_0$	$1,5 \times U_{ном}$
2.5 Допустимое напряжение $3U_0$ в течение 1 с	$2,5 \times U_{ном}$
2.6 Диапазон рабочих напряжений	$(0,001-1,5) \times U_{ном}$
2.7 Максимальное потребление мощности на фазу при $U_{ном}$, В·А	<0,5
2.8 Максимальное потребление мощности по цепи $3U_0$ при $U_{ном}$, В·А	<1
3 Частотные характеристики:	
3.1 Номинальная частота сети, Гц	50

Наименование требования или функции	Необходимое значение
3.2 Диапазон рабочих частот	(0,95–1,05) от номинала
4 Питание цепей оперативного постоянного тока:	
4.1 Номинальное напряжение оперативного питания, В	220
4.2 Допустимый диапазон изменения напряжения питания	(0,8–1,1) от $U_{ном}$
4.3 Потребляемая мощность в нормальном режиме (без КЗ), Вт	<20
4.4 Потребляемая мощность в аварийном режиме (при КЗ), Вт	<2 × $P_{ном}$
4.5 Допустимый уровень пульсаций напряжения питания	≤6% от среднего значения
4.6 Подача напряжения обратной полярности не приводит к повреждению устройства	Выполняется
5 Дискретные (бинарные) входы:	
5.1 Номинальное постоянное напряжение на входе, В	220
5.2 Диапазон рабочих напряжений на входе	(0,8–1,1) от $U_{вх.ном}$
5.3 Напряжение срабатывания входа, В	158–170
5.4 Коэффициент возврата	≥0,95
5.5 Минимальный пусковой ток входа (допускается затухание), мА	50
6 Коммутация цепей постоянного тока:	
6.1 Коммутируемое напряжение, В	250
6.2 Способность размыкать ток 1/0,4/0,2/0,15 А при напряжении 48/110/220/250 В соответственно (постоянная времени $L/R \leq 40$ мс)	Выполняется
6.3 Параметры контактов, коммутирующих цепи включения и отключения выключателей:	
6.3.1 Максимальный ток замыкания до 10 А, длительность, с	1,0
6.3.2 Максимальный ток замыкания до 30 А, длительность, с	0,2
6.3.3 Длительно допустимый ток, А	5
6.4 Коммутационная способность выходных реле (цепи внешней сигнализации): не менее 30 Вт в цепях постоянного тока с индуктивной нагрузкой ($L/R \leq 0,02$ с) при напряжении до 250 В и токе до 2 А	Выполняется
7 Функциональные требования к терминалам:	
7.1 Наличие программируемой логики для взаимодействия между различными функциями защиты, автоматики, управления и контроля, а также с внешними устройствами	Обязательно
7.2 Поддержка синхронизации по времени от внешнего источника (при отсутствии протокола МЭК 61850 — через отдельный вход)	Выполняется

Наименование требования или функции	Необходимое значение
7.3 Наличие непрерывной встроенной диагностики	Выполняется
7.4 Возможность переключения групп уставок по дискретным входным сигналам	Выполняется
7.5 Наличие световой и контактной сигнализации: срабатывание на отключение и неисправность	Выполняется

2.3 Общие требования к выбору оборудования

Для установки на ПС 500 кВ «Калино» могут рассматриваться микропроцессорные устройства как российских, так и зарубежных производителей. При этом оборудование должно иметь аттестацию ПАО «Россети» (ранее — ОАО «ФСК ЕЭС») и быть допущено к применению на объектах электросетевого комплекса Российской Федерации.

В соответствии с действующими нормативными документами, в частности рекомендациями по технологическому проектированию подстанций (п. 9.4), приоритет при проектировании отдаётся устройствам РЗА отечественного производства. Применение оборудования иностранного производства допускается только при наличии соответствующего технико-экономического обоснования.

2.3.1 Изменение нормативной и политической ситуации

С 2022 года произошли существенные изменения в области импортозамещения в электроэнергетике. Крупнейшие заказчики (включая ПАО «Россети») взяли курс на максимальное использование оборудования российского производства. По состоянию на 2024–2025 годы доля импорта в закупках релейной защиты и автоматики снизилась до менее 10%, причём оставшийся импорт составляют только поставки из «дружественных» стран.

Большинство западных компаний (Siemens, ABB, General Electric, ALSTOM) прекратили поставки нового оборудования в Россию или существенно ограничили своё присутствие на российском рынке. Техническая поддержка ранее поставленного оборудования западных производителей затруднена или полностью отсутствует.

Таким образом, при проектировании реконструкции ПС 500 кВ «Калино» в настоящее время целесообразно и экономически обосновано ориентироваться исключительно на оборудование российских производителей.

2.3.2 Отечественные производители оборудования РЗА

На территории Российской Федерации функционирует ряд предприятий, выпускающих современные микропроцессорные устройства РЗА. Ключевыми производителями, чье оборудование допущено к применению ПАО «Россети», являются:

1. ООО НПП «ЭКРА» (г. Чебоксары) — один из лидеров рынка, выпускающий полную линейку терминалов для защит линий, трансформаторов, шин, а также автоматики управления выключателями. Оборудование широко применяется на объектах 110–750 кВ.
2. АО «Релематика» (ранее — «ИЦ «Бреслер»»), г. Чебоксары) — крупный производитель комплексов РЗА для распределительных сетей и генерации.
3. НТЦ «Механотроника» (г. Санкт-Петербург) — пионер в создании цифровых устройств РЗА (серии БМРЗ), один из ведущих поставщиков защит и противоаварийной автоматики.
4. АО «РАДИУС Автоматика» — предприятие полного цикла, выпускающее терминалы и шкафы РЗА для подстанций до 220 кВ.
5. ГК «АНТРАКС» — производитель устройств серии «А-Сигнал» для защиты распределительных сетей.
6. Чебоксарский электроаппаратный завод (ЧЭАЗ) — выпускает микропроцессорные терминалы серии «Микрон».
7. Группа «Росэлектроника» (совместно с НИПОМ) — разработана защищённая система РЗА на базе микропроцессора «Эльбрус», предназначенная для критически важных объектов.

2.3.3 Сравнительный анализ функциональных возможностей

В таблице 2 представлен сравнительный анализ реализации функций РЗА, требуемых проектом, на оборудовании различных производителей. При заполнении

таблицы учтена текущая рыночная ситуация (отсутствие новых поставок от западных вендоров).

Таблица 2 - Анализ реализации функций РЗА на аппаратуре отечественных производителей

Наименование функций устройств	ООО НПП «ЭКРА»	АО «Релематика» (Бреслер)	НТЦ «Механотроника»	АО «РАДИУС Автоматика»
Дифференциально-фазная защита ВЛ 500 кВ	Есть	Есть	Есть	Нет
Дифференциальная защита ВЛ 500 кВ (продольная)	Нет	Нет	Есть	Нет
Комплект ступенчатых защит ВЛ 500 кВ	Есть	Есть	Есть	Нет
Автоматика управления выключателем 500 кВ, АПВ, УРОВ	Есть	Есть	Есть	Нет
Дифференциальная защита шин 500 кВ с торможением	Есть	Есть	Есть	Нет
Дифференциальная защита ВЛ 220 кВ	Есть	Есть	Есть	Есть
Комплект ступенчатых защит ВЛ 220 кВ	Есть	Есть	Есть	Есть
Автоматика управления выключателем 220 кВ, АПВ, УРОВ	Есть	Есть	Есть	Есть
Дифференциальная защита шин 220 кВ	Есть	Есть	Есть	Есть
Комплект ступенчатых защит СВ 220 кВ	Есть	Есть	Есть	Есть

Примечание к таблице: в связи с прекращением поставок и отсутствием технической поддержки, оборудование фирм Siemens, ABB, General Electric, ALSTOM не рассматривается в качестве рекомендуемого для нового проектирования на объектах ПАО «Россети». Приведённые в таблице данные актуальны на 2025–2026 годы.

2.3.4 Выводы по выбору оборудования

На основе проведённого анализа можно сделать следующие выводы:

1. Приоритет российского оборудования: в условиях политики импортозамещения и санкционных ограничений оборудование западных производителей не может быть рекомендовано к применению при реконструкции ПС «Калино».
2. Достаточность функционала: ведущие российские производители (ООО НПП «ЭКРА», АО «Релематика», НТЦ «Механотроника») предлагают полный спектр устройств РЗА для всех классов напряжения (500/220/110 кВ), полностью покрывающий требования проекта.
3. Техническая поддержка: отечественные компании располагают на территории РФ сервисными, учебными центрами и заводами-изготовителями, что обеспечивает оперативное сопровождение и гарантийное обслуживание.
4. Рекомендация к применению: в качестве базового оборудования для реконструкции ПС «Калино» рекомендуется принять комплексы РЗА производства ООО НПП «ЭКРА» и/или НТЦ «Механотроника» как наиболее распространённые на объектах ПАО «Россети» и имеющие наибольший опыт эксплуатации в классе напряжения 500 кВ.

На основании выбора терминала в графической части приведена структурная схема релейной защиты и автоматики ВЛ 500 кВ на базе терминала ЭКРА

2.4 Технические требования к терминалам защит ВЛ 500 кВ

С обеих сторон линии 500 кВ «Калино – Тагил» в состав комплекса РЗА входят:

- продольная дифференциальная защита линии;
- первый комплект ступенчатых защит (КСЗ) дополняется телеускорением, для передачи разрешающих сигналов используется высокочастотный канал (ВЧ);

– второй комплект КСЗ также оснащается телеускорением, но с применением волоконно-оптической линии связи (ВОЛС).

- устройство резервирования отказа выключателя УРОВ;
- устройство автоматического повторного включения;
- автоматика управления выключателем.

Комплекс РЗА ВЛ 500 кВ Калино – Буйская со стороны ПС Калино состоит из следующих устройств:

- дифференциально-фазная защита;
- два комплекта ступенчатых защит. Первый комплект КСЗ

предусматривается с телеускорением с использованием разрешающих сигналов по ВЧ каналу;

- устройство резервирования отказа выключателя;
- устройство автоматического повторного включения;
- автоматика управления выключателем.

2.4.1 Комплектация защит ВЛ 500кВ

Дифференциально-фазная защита имеет:

– пусковые измерительные органы (ИО), реагирующие на составляющие токов прямой, обратной и нулевой последовательностей и напряжения обратной последовательности;

– пусковые ИО, реагирующие на аварийные составляющие векторов токов прямой и обратной последовательностей;

– комбинированный ИО тока ($I_2 + I_0$);

– ИО разностей фазных токов;

– ИО приращения вектора разностей фазных токов;

– компенсацию емкостного тока линии в органе управления высокочастотного приемопередатчика;

– возможность осуществлять однофазное и трехфазное отключение с использованием собственных избирателей поврежденной фазы;

– возможность сравнивать сигналы, сформированные по концам ВЛ с

использованием высокочастотного канала по ВЛ;

- возможность автоматической блокировки ДФЗ при неисправности ВЧ канала;
- орган контроля погасания дуги подпитки (ОКПД);
- орган выявления успешности включения (ОВУВ);
- блокировку при неисправности цепей напряжения;
- встроенную логику избирателей поврежденных фаз;
- возможность записи тока усилителя мощности ВЧ передатчика и тока приемника.

Для обеспечения взаимодействия полукомплектов ДФЗ должны использоваться высокочастотные каналы связи.

Технические требования к продольной дифференциальной защите приведены в таблице 3.

Дифференциальная защита линии имеет:

- формировать на каждом из концов рабочую геометрическую и арифметическую суммы токов, обеспечивая одинаковую чувствительность комплектов на обоих концах ЛЭП;
- осуществлять передачу сигнала отключения выключателя противоположного конца линии с запретом АПВ при поступлении на дискретный вход терминала сигнала от внешнего устройства УРОВ;
- осуществлять через электрические выходы (X21 и/или G703) обмен данными обоих концов ВЛ с помощью ВОЛС;
- иметь блокировку защиты при неисправности ВОЛС;
- выполнять функции терминала ступенчатых защит;
- осуществлять трехфазное и однофазное отключение с использованием собственных избирателей поврежденной фазы и соответствующий пуск АПВ и УРОВ;
- осуществлять трехфазное отключение с запретом ТАПВ при ручном включении и включении от ТАПВ на устойчивое КЗ;

- иметь возможность непосредственного воздействия на выходную логику терминала от сигналов внешних защит;

- иметь функции ОМП с двухсторонним синхронным замером параметров.
- блокировку при неисправности цепей напряжения;
- встроенную логику избирателей поврежденных фаз.

Технические требования к терминалу дифференциально-фазной защиты линии приведены в таблице 4.

Дистанционная защита имеет:

- независимое регулирование параметров срабатывания каждого измерительного органа и его органов выдержки времени;

- встроенную логику избирателей поврежденных фаз;
- устройство блокировки при неисправности цепей напряжения;
- телеускорение отдельных ступеней;
- блокировку при качаниях;
- возможность изменения направленности одной из ступеней.

Первая ступень дистанционной защиты должна использоваться для всех видов КЗ.

Для действия при междуфазных КЗ дистанционная защита дополняется междуфазной токовой отсечкой (МФТО), которая вводится в работу оперативным путем при исчезновении цепей напряжения.

Токовая направленная защита нулевой последовательности имеет:

- возможность вывода направленности любой ступени;
- функцию автоматического и оперативного ускорения и выбора ускоряемых ступеней;

- возможность вывода любой ступени в цикле ОАПВ.

Для ликвидации неполнофазного режима предусматривается защита от неполнофазного режима с контролем непереключения фаз выключателя и отстроенную от цикла ОАПВ.

Для обеспечения требований ближнего резервирования предусматривается:

- включение устройств основной и резервной защит по токовым цепям на

разные сердечники трансформаторов тока;

- питание основных и резервных устройств РЗ оперативным током от разных аккумуляторных батарей;

- воздействие защит на два электромагнита отключения. Цепи отключения от защит до электромагнитов отключения должны проходить по разным трассам.

Так как на отходящей линии 500 кВ устанавливается по два трансформатора напряжения, представляется возможность разделения основных и резервных защит по цепям напряжения, с возможностью оперативного перевода с одного ТН на другой.

Технические требования к комплекту ступенчатых защит приведены в таблице 5.

Защита ВЛ в цикле ОАПВ

Дифференциально-фазная защита сохраняет свою работоспособность в неполнофазном режиме в цикле ОАПВ.

Дополнительно для защиты ВЛ при неуспешном ОАПВ отключившейся фазы рекомендуется использовать измерительный орган минимального сопротивления (далее ИО РС) Z_{min} , реагирующий на замер $Z = U_{откл.ф.} / (I_{откл.ф.} + K_{комп} I_0)$, где $K_{комп} = (Z_0 - Z_1) / Z_1$.

ИО РС вводится в работу только в момент повторного включения линии на время, определяемое временем включения, срабатывания РС и повторного отключения.

Для защиты неповрежденных фаз ВЛ в цикле ОАПВ от однофазных КЗ необходимо использовать токовую защиту неотключенных фаз, действующую при КЗ на отключение трех фаз выключателя с контролем срабатывания от избирателя поврежденной фазы.

Результаты расчета приведены в таблице 8.

Устройство резервирования при отказе выключателя

Устройство резервирования при отказе выключателя (УРОВ) предусматривается индивидуально для каждого выключателя 500 кВ.

Устройство резервирования при отказе выключателя имеет:

- пофазный пуск;
- пофазный контроль наличия тока;
- повторное отключение поврежденной фазы («действие на себя») без выдержки времени;
- действие на отключение трех фаз выключателей по истечении выдержки времени через выходные реле смежных элементов с запретом АПВ, пуск ВЧ сигнала № 1 и остановом передатчика ДФЗ;
- сброс выдержки времени по факту исчезновения тока.

Реализация УРОВ предусматривается в терминале автоматики управления выключателем.

Автоматическое повторное включение

ВЛ 500 кВ защищают в нормальном режиме постоянно включенные три терминала защиты:

- терминал основной защиты ДФЗ с ВЧ-каналом, либо ДЗЛ;
- терминал резервной защиты КСЗ 1 с использованием телеускорения;
- терминал резервной защиты КСЗ 2 с использованием телеускорения (для ВЛ 500 кВ на Тагил КСЗ 2 с телеускорением).

Уставки и логика работы терминалов резервных защит КСЗ 1 и КСЗ 2 одинаковы.

В каждом терминале защиты (ДФЗ, ДЗЛ, КСЗ 1, КСЗ 2) предусматривается критерий избирателя поврежденной фазы. Выбор фазы в терминалах защит обеспечивается при действии защиты без выдержки времени. Каждый из терминалов имеет логику однофазного и трехфазного отключения.

Выходные цепи отключения каждого из трех терминалов защит действуют на отключение выключателей, пофазный пуск УРОВ и АПВ (ОАПВ) терминалов управления выключателей.

Реализация функции АПВ предусматривается в терминале автоматики управления выключателями 500 кВ.

Функции трехфазного и однофазного автоматического повторного включения должны устанавливаться на каждом выключателе и иметь:

- однократность действия;
- действие на включение выключателя по факту готовности выключателя линии и устройства АПВ;
- использование БТАПВ не предполагается;
- запрет ТАПВ при неуспешном автоматическом включении одной фазы (неуспешное ОАПВ);
- запрет ТАПВ второго выключателя при неуспешном ТАПВ выключателя, включаемого первым;
- возможность реализации ТАПВ выключателя с увеличенной выдержкой времени после неуспешного ОАПВ;
- оперативный ввод/вывод ОАПВ/ТАПВ, изменения алгоритма контролирующих факторов ТАПВ посредством местного и дистанционного доступа;
- разные органы выдержки времени ТАПВ для линии и шин (при использовании автоматического опробования системы шин).

ОАПВ выполняет свои функции только при одновременном пуске с обеих сторон ВЛ.

Устройство однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) во взаимодействии с комплектами релейной защиты выполняет следующие функции:

- При неустойчивых однофазных коротких замыканиях происходит отключение исключительно повреждённой фазы с последующей её автоматической подачей под напряжение;

- В случае устойчивого однофазного повреждения сначала отключается аварийная фаза, а спустя определённую выдержку времени — обе неповреждённые фазы;

- При любых многофазных замыканиях, включая ситуации, когда однофазное КЗ переходит в междуфазное с участием земли, а также при возникновении повреждений на неотключённых фазах линии, производится отключение всех трёх фаз. Вопрос о дальнейшем действии трёхфазного АПВ (ТАПВ) решается на этапе разработки рабочей документации с учётом согласования с заинтересованными сторонами;

- При неудачном цикле ОАПВ (когда после повторного включения на той же фазе в интервале набора готовности выключателя снова возникает однофазное КЗ) выполняется трёхфазное отключение с блокировкой ТАПВ. Если же после успешного ОАПВ в течение того же интервала повреждение возникает на другой фазе, то последующее ОАПВ разрешается.

Технические требования к устройству резервирования отказа выключателя, устройству АПВ и автоматики управления выключателя 500кВ приведены в таблице 6.

Таблица 3 - Технические требования к продольной дифференциальной защите линий 500 кВ

Наименование функции или параметра	Необходимое значение
1 Требования к продольной дифференциальной защите (ДЗЛ)	
1.1 На каждом конце линии обеспечивается пофазное формирование геометрической и арифметической суммы токов с применением волоконно-оптического канала связи. Чувствительность комплектов на обоих концах ВЛ одинакова	Да
1.2 При однофазных КЗ на землю выполняется пофазное отключение выключателей, при других видах повреждений — трёхфазное. Одновременно формируются сигналы пуска УРОВ и АПВ	Да
1.3 При включении на устойчивое однофазное КЗ, а также при любом повреждении на линии, возникшем после подачи команды на включение отключившейся фазы и до момента готовности АПВ к повторному действию, выполняется трёхфазное отключение с блокировкой ТАПВ	Да
1.4 Трёхфазное отключение с последующим действием ТАПВ выполняется при междуфазных КЗ на линии, при переходе однофазного замыкания в междуфазное, а также при возникновении повреждения на неотключённых фазах	Да
1.5 При неуспешном опробовании ЛЭП напряжением (включение на КЗ) выполняется трёхфазное отключение с запретом ТАПВ	Да
1.6 Предусмотрена возможность блокировки ДЗЛ при неисправности волоконно-оптической линии связи (ВОЛС)	Да
1.7 Обеспечивается компенсация ёмкостных токов линии электропередачи	Да
1.8 Выполняется синхронизация работы устройств на противоположных концах линии	Да
1.9 Обмен данными между концами ВЛ осуществляется через электрические цифровые порты связи по оптоволоконному каналу. Параметры: скорость передачи — не менее 64 кбит/с, время срабатывания — не более 30 мс. Дополнительно предусматриваются	Да, время не более 30 мс

Наименование функции или параметра	Необходимое значение
электрические цифровые выходы (X21 и/или G703) с аналогичной скоростью обмена	

Таблица 4 - Технические требования к терминалу дифференциально-фазной защиты линии 500 кВ

Наименование требования или функции	Необходимое значение
1 Требования к дифференциально-фазной защите (ДФЗ)	
1.1 Обеспечивается сопоставление фаз токов, сформированных на разных концах линии, с применением высокочастотного канала связи (ВЧКС), организованного по фазе ВЛ и работающего на единой частоте	Да
1.2 Имеются пусковые и отключающие измерительные органы, реагирующие на составляющие токов обратной, прямой и нулевой последовательности	Да
1.3 Защита должна корректно действовать при любых видах КЗ в пределах защищаемой зоны и не срабатывать при внешних повреждениях, качаниях, неполнофазных режимах, реверсе мощности, асинхронном ходе, несинхронных включениях, одностороннем питании без КЗ, а также при отключении трёхфазных КЗ на соседних элементах и неисправностях цепей напряжения	Да
1.4 В качестве канала связи используется ВЧ канал по фазе линии	Да
1.5 Предусмотрен автоматический запуск ВЧ передатчика при обнаружении неисправности ДФЗ	Да
1.6 Обеспечивается возможность блокировки ДФЗ с обоих концов ВЛ при неисправности ВЧ канала, в том числе при появлении помехи длительностью не менее 90 мс	Да
1.7 Имеются измерительные органы сопротивления	Да
1.8 Выполняется компенсация ёмкостного тока линии в токовых пусковых органах и в органе манипуляции ВЧ передатчика	Да
1.9 Реализована логика выбора повреждённых фаз	Да
1.10 Обеспечивается пофазное или трёхфазное отключение с использованием измерительных органов собственного терминала, а также соответствующий пуск УРОВ	Да
1.11 Имеется устройство блокировки при неисправностях в цепях переменного напряжения (БНН)	Да
1.12 При оперативном выводе ОАПВ выполняется перевод на отключение трёх фаз	Да
1.13 Предусмотрена функция определения места повреждения	Да

Наименование требования или функции	Необходимое значение
(ОМП)	
2 Требования к однофазному автоматическому повторному включению (ОАПВ)	
2.1 Контроль готовности выключателя: выполняется цикл «отключить — включить — отключить»	Да
2.2 Диапазон регулирования выдержки времени ОАПВ, с	не менее 0,1–10
2.3 После выполнения повторного включения АПВ возвращается в состояние готовности через заданное время (диапазон регулирования), с	не менее 15–60
2.4 Алгоритмы функционирования АПВ	
2.4.1 Однократное ОАПВ при пофазном действии защит или при возникновении «цепи несоответствия»	Да
2.4.2 Однократное ОАПВ; при неуспешном включении — запрет АПВ	Да

Таблица 5 - Технические требования к комплекту ступенчатых защит

Наименование требования или функции	Необходимое значение
1 Дистанционная защита (ДЗ) от междуфазных повреждений	
1.1 Число ступеней:	
- для защиты от междуфазных КЗ	не менее 3
- для защиты от всех видов КЗ	не менее 1
1.2 Форма характеристики срабатывания дистанционных измерительных органов	многоугольная
1.3 Возможность изменения направленности для одной из ступеней	Да
1.4 Диапазон настройки сопротивлений срабатывания ступеней, Ом/фазу	0,1–400
1.5 Диапазон настройки выдержек времени ступеней, с	0–10
1.6 Настройка уставок сопротивления для каждой ступени	независимая
1.7 Настройка выдержек времени для каждой ступени	независимая
1.8 Запуск элементов выдержки времени каждой ступени	только от собственных измерительных органов
1.9 Минимальный ток точной работы	не более $0,1 \times I_{ном}$
1.10 Возможность ввода/вывода дистанционных измерительных органов (для междуфазных КЗ и КЗ на землю), а также отдельных ступеней в целом	программная, независимая

Наименование требования или функции	Необходимое значение
1.11 Блокировка при качаниях	для любой ступени
1.12 Блокировка защиты на заданное пользователем время при обнаружении качаний и их развитии	Да
1.13 Определение повреждённых фаз	Да
1.14 Отключение одной или трёх фаз с соответствующим пуском УРОВ и АПВ	Да
1.15 Отключение одной фазы от быстродействующих ступеней	Да
1.16 Использование собственной логики выбора фаз для внешних устройств	Да
1.17 Логика телеускорения защиты:	
- тип передаваемого сигнала	разрешающие сигналы
- используемая среда передачи	ВОЛС
- используемая среда передачи	ВЧКС
1.18 Отсутствие «мёртвой зоны» при всех видах КЗ, включая включение линии на трёхфазное КЗ	Да
1.19 Автоматическое ускорение (диапазон регулирования выдержки времени действия одной из ступеней при включении линии под напряжение), с	0–5
1.20 Блокировка от внешних и/или внутренних сигналов	для любой ступени
1.21 Оперативное ускорение от внешнего сигнала (диапазон регулирования выдержки времени действия одной из ступеней), с	0–5
2 Токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП)	
2.1 Количество ступеней	не менее 4
2.2 Диапазон регулирования независимых выдержек времени ступеней, с	0–10
2.3 Диапазон регулирования токов срабатывания $3I_0$ (в долях от $I_{ном}$):	
- 1-я ступень	$(0,5–25) \times I_{ном}$
- 2-я ступень	$(0,2–15) \times I_{ном}$
- 3-я ступень	$(0,1–2) \times I_{ном}$
- 4-я ступень	$(0,05–2) \times I_{ном}$
2.4 Программная возможность ввода/вывода направленности действия	для любой ступени
2.5 Изменение направленности действия на «обратную»	не менее чем для одной ступени

Наименование требования или функции	Необходимое значение
2.6 Отключение одной фазы	от быстродействующих ступеней
2.7 Запуск элементов выдержки времени каждой ступени	от собственных измерительных органов и органа направления мощности
2.8 Оперативное ускорение от внешнего сигнала (диапазон регулирования выдержки времени), с	0–5
2.9 Автоматическое ускорение при включении линии под напряжение (диапазон регулирования выдержки времени), с	0–5
2.10 Блокировка от внешних/внутренних сигналов в неполнофазном режиме цикла ОАПВ	для любых ступеней
2.11 Вывод направленности от внешних/внутренних сигналов в неполнофазном режиме цикла ОАПВ	для любой ступени
2.12 Автоматическая блокировка при бросках тока намагничивания	для любой ступени
2.13 Логика телеускорения защиты:	
- тип передаваемого сигнала	разрешающие сигналы
- используемая среда передачи	ВОЛС
- используемая среда передачи	ВЧКС
3 Максимальная токовая защита (МТЗ)	
3.1 Пофазная токовая отсечка (диапазон регулирования уставки)	$(0,5–20) \times I_{ном}$
3.2 Токовая защита:	
3.2.1 Количество ступеней	не менее 2
3.2.2 Диапазон регулирования уставок токовых органов	не менее $(0,5–10) \times I_{ном}$
3.2.3 Диапазон регулирования выдержек времени, с	не менее 0,1–10
3.2.4 Действие на отключение	трёхфазное
3.2.5 Программная возможность ввода/вывода	Да
4 Защита от неполнофазного режима	
4.1 Наличие выдержки времени на отключение трёх фаз с запретом АПВ и подача команды отключения и запрета АПВ на противоположный конец ВЛ	Да
4.2 Диапазон регулирования выдержки времени, с	0–10
4.3 Срабатывание при наличии сигнала непереключения фаз	$(0,1–0,5) \times$

Наименование требования или функции	Необходимое значение
выключателя и его отключенном положении, вызывающем протекание тока $3I_0$, с контролем несимметрии вторичных токов (специальным органом или органом тока нулевой последовательности). Порог срабатывания регулируется	Ином
5 Функция определения места повреждения (ОМП)	Да
6 Требования к комплекту ступенчатых защит (КСЗ)	
6.1 Выполнение пофазного отключения при однофазных КЗ на землю и трёхфазного — при других видах повреждений. Возможность оперативного и программного перевода на трёхфазное отключение при всех видах КЗ с пуском УРОВ и выбором алгоритма АПВ	Да
6.2 Непосредственное воздействие сигналов внешних защит на выходную логику терминала (при их пофазном или трёхфазном действии)	Да
6.3 Трёхфазное отключение с запретом ТАПВ при включении на устойчивое однофазное КЗ (неуспешное ОАПВ), а также при любых КЗ, возникших после подачи команды на включение отключившейся фазы до момента готовности АПВ к повторному действию	Да
6.4 Трёхфазное отключение с последующим ТАПВ при междуфазных КЗ, при переходе однофазного КЗ в междуфазное, а также при повреждении на неотключённых фазах	Да
6.5 Возможность блокировки всех функций, склонных к ложным или излишним срабатываниям, при любых неисправностях цепей напряжения (КЗ или обрыв цепей ТН)	Да
6.6 Формирование взаимного ускорения защит противоположных концов ВЛ:	
- количество команд	не менее 4
- использование контактных выходов для аппаратуры связи	по ВЧКС
- использование цифровых электрических выходов (G703) для аппаратуры связи	по ВОЛС
- время передачи по ВЧ каналу, мс	не более 30
7 Функция однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ)	
7.1 Контроль готовности выключателя: выполнение цикла «отключить — включить — отключить»	Да
7.2 Диапазон регулирования выдержки времени ОАПВ, с	не менее 0,1–10
7.3 Возврат АПВ в состояние готовности после повторного включения через заданное время (диапазон регулирования), с	не менее 15–60
7.4 Алгоритмы работы АПВ:	
7.4.1 Однократное ОАПВ при пофазном действии защит или при возникновении «цепи несоответствия»	Да

Наименование требования или функции	Необходимое значение
7.4.2 Однократное ОАПВ; при неуспешном включении — запрет АПВ	Да

Таблица 6 - Технические требования к устройству резервирования отказа выключателя, устройству АПВ и автоматики управления выключателя 500кВ

Требование или функция	Необходимое значение
1. Функции автоматического повторного включения (АПВ)	
1.1 Контроль состояния выключателя: отработка последовательности «отключение — включение — отключение»	Да
1.2 При исправном выключателе, готовом АПВ и пофазном срабатывании защит запускается ОАПВ с заданной задержкой. На время неполнофазного режима формируется блокировка соответствующих защит	Да
1.3 Диапазон задания выдержки времени ОАПВ, с	0,1–10
1.4 При исправном выключателе, готовности АПВ, пусковом сигнале от защит (или по цепи несоответствия) и наличии разрешающих сигналов дополнительных функций включение происходит с заданной задержкой (диапазон), с	0,1–10
1.5 Возможность запрета АПВ внешними устройствами. Восстановление готовности АПВ после снятия сигнала блокировки через заданное время (диапазон), с	1–60
1.6 После выполнения повторного включения АПВ возвращается в состояние готовности через установленный интервал (диапазон), с	15–60
1.7 Варианты алгоритмов АПВ	
1.7.1 Однократное ОАПВ (при пофазном действии защит) или однократное ТАПВ (при трёхфазном действии защит), а также при появлении «цепи несоответствия»	Да
1.7.2 Однократное ОАПВ; при неудачном включении — блокировка АПВ	Да
1.7.3 Однократное ТАПВ при любых видах КЗ (или при появлении «цепи несоответствия»)	Да
1.7.4 Возможные сочетания алгоритмов ТАПВ:	
- с контролем отсутствия U на линии и наличия U на шинах	Да
- с контролем отсутствия U на шинах и наличия U на линии	Да
- с контролем симметрии напряжений и наличия синхронизма	Да
- с улавливанием синхронизма	Да
- без контроля	Да
1.8 Условия для срабатывания АПВ	

Требование или функция	Необходимое значение
1.8.1 Отсутствие напряжения на линии и шинах (диапазон настройки)	$(0,1-1,0) \times U_{ном}$
1.8.2 Наличие симметричного напряжения на линии и шинах (диапазон настройки)	$(0,5-1,2) \times U_{ном}$
1.8.3 Наличие или улавливание синхронизма сравниваемых напряжений с контролем параметров (диапазон настройки):	
- допустимая разность модулей	$(0,05-0,5) \times U_{ном}$
- допустимый угол (при контроле синхронизма)	$5^{\circ}-75^{\circ}$
- допустимая частота скольжения (для контроля синхронизма), Гц	0,05–0,3
- допустимая частота скольжения (для улавливания синхронизма), Гц	0,05–2,0
- опережение команды включения при улавливании синхронизма, с	0,1–2,0
1.9 Полуавтоматическое оперативное включение линии под нагрузку с контролем наличия или улавливания синхронизма	Да
1.10 Оперативный выбор режима АПВ: «ведущий» (первый включаемый выключатель) или «ведомый» (второй включаемый выключатель)	Да
1.11 Формирование сигнала «неуспешное АПВ» для запрета АПВ ведомого выключателя	Да
1.12 Оперативный ввод/вывод ОАПВ и ТАПВ, изменение алгоритма контроля ТАПВ с местного или удалённого доступа	Да
2. Автоматика управления выключателем (АУВ)	
2.1 АУВ выполняет трёхфазное включение выключателя по команде «Включить» с ключа или при срабатывании ТАПВ	Да
2.2 Обеспечивается подхват цепи электромагнита включения (ЭМВ) на время протекания тока. Разрыв цепи — блок-контактом выключателя	Да
2.3 При включении на КЗ выключатель переводится в отключённое состояние, цепь включения блокируется на всё время действия сигнала (защита от многократных включений)	Да
2.4 АУВ обеспечивает трёхфазное отключение от защит воздействием на ЭМО1 и ЭМО2	Да
2.5 АУВ выполняет трёхфазное отключение по команде «Отключить» с ключа или при срабатывании ЗНФ (воздействие на ЭМО1 и ЭМО2)	Да
2.6 Обеспечивается подхват цепи электромагнитов отключения на время протекания тока. Разрыв цепи — блок-контактом выключателя	Да
2.7 Фиксация включённого состояния выключателя (КQC) с	Да

Требование или функция	Необходимое значение
возвратом только по команде отключения (КСТ). При отключении от РЗА состояние сохраняется. При сигнале об отключённом состоянии фиксируется «несоответствие» и формируется пуск ТАПВ	
2.8 Защита электромагнитов управления от длительного тока и выдача сигнала на их обесточивание. Выдержка времени (не менее), с	1,0
2.9 Пофазный контроль исправности цепей ЭМО1 и ЭМО2 (при включённом выключателе) и цепей ЭМВ (при отключённом выключателе)	Да
2.10 При обрыве цепей отключения или включения, отсутствии срабатывания ЗНФ или пропадании оперативного тока — сигнал неисправности цепей управления	Да
2.11 Сигнализация: снижение давления элегаза в выключателе и ТТ, неисправность обогрева выключателя, неисправность завода пружины, срабатывание блокировки включения/отключения, срабатывание ЗНФ	Да
2.12 Блокировка включения при малом заводе пружины; блокировка включения и отключения при низком давлении элегаза (включая ручное управление)	Да
2.13 Возможность отключения выключателя ключом управления при неисправности терминала АУВ	Да
2.14 Выдача в противоаварийную автоматику и РАС сигналов о прохождении импульсов отключения каждого электромагнита отключения (ЭМО1, ЭМО2) фаз А, В, С	Да
3. Устройство резервирования при отказе выключателя (УРОВ)	
3.1 Контроль положения фаз выключателя специальными токовыми органами. Время возврата УРОВ при размыкании максимального первичного тока и наличии затухающего тока во вторичных цепях ТТ	не более 20 мс
3.2 Приём пофазных или трёхфазных пусковых сигналов от внешних/внутренних защит с подхватом на время существования тока в УРОВ	Да
3.3 Запоминание принятых сигналов, с	0,5–0,6
3.4 Диапазон задания таймеров, с	0,1–0,4
3.5 Диапазон задания токовых органов УРОВ	$(0,1–2,0) \times I_{ном}$
3.6 Повторное отключение без выдержки времени (действие «на себя»)	Да
3.7 При пуске УРОВ от защит и токе выше уставки, после заданной задержки формируются: трёхфазное отключение смежных выключателей, запрет АПВ отказавшего и смежных	Да

Требование или функция	Необходимое значение
выключателей, телеотключение и запрет АПВ на противоположном конце ВЛ (по имеющимся каналам)	
3.8 Возврат таймеров УРОВ при успешном отключении выключателя (по возврату токовых органов)	Да
4. Защита от непереключения фаз (ЗНФ)	
4.1 Защита фиксирует неполнофазное включение выключателя и выдаёт сигнал на отключение включившихся фаз. Выдержка времени регулируется, с	0,1–0,2
4.2 В цикле ОАПВ защита выводится из действия на всё время неполнофазного режима	Да

2.5 Вывод по второй главе

На основании проведённого анализа отечественных и зарубежных производителей, а также с учётом требований импортозамещения и прекращения поставок западного оборудования, для реконструкции ПС 500 кВ «Калино» выбраны микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики отечественной фирмы ООО НПП «ЭКРА». Предусматриваемые проектом устройства РЗА выполнены на современной микропроцессорной базе. Они обладают высоким быстродействием, гибкими характеристиками срабатывания (включая многоугольную характеристику дистанционных органов), широким диапазоном выбора уставок (токовых, временных, сопротивлений), наличием нескольких групп уставок с возможностью оперативного переключения по дискретным сигналам, а также встроенными функциями непрерывной диагностики, регистрации аварийных событий и определения места повреждения на линии.

Глава 3. Расчеты уставок релейных защит

3.1. Расчет номинальной нагрузки вторичных обмоток ТТ 500кВ

Расчет сопротивления жил кабелей выполнен исходя из следующих условий.

Длина кабелей до ОРУ 500 кВ - 450 метров. Сечение жил кабелей токовых цепей принято 2,5 мм², медь. Номинальный вторичный ток на стороне 500кВ - 1 А.

$R_{каб} = \rho * L / s = 0,0175 * 450 / 2,5 = 3,15 \text{ Ом}$. С учетом сопротивления в контактах 0,05 Ом $R_{каб} = 3,2 \text{ Ом}$.

Активная составляющая нагрузки на фазу $P = I_n^2 * R_{каб} = 1 * 3,2 = 3,2 \text{ Вт}$.

В соответствии с каталожными данными различных фирм - производителей современных цифровых программно-технических средств РЗА, АСУТП мощность нагрузки токовых цепей цифровых устройств защиты и измерений не превышает 3 Вт на фазу, т.е. основную нагрузку на ТТ составляет сопротивление кабелей.

Полная ориентировочная номинальная нагрузка на трансформаторы тока 500 кВ составляет 6,2 ВА на фазу.

3.2 Результаты расчета уставок РЗА

Таблица 7. расчет уставок дифференциально-фазной защиты ВЛ 500 кВ Калино-Буйская

Параметр величины	Расчетное условие	Наименование	Обозначение	Расчетная формула	Со стороны ПС Калино		Со стороны ПС Буйская	
					Числовое значение расчетной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Исходные данные	Номинальное напряжение рассчитываемой ВЛ, кВ		U _{ном}		-	500	-	500
	Полное сопротивление пря- мой последовательности ВЛ, Ом		Z _л		-	91,2	-	91,2
	Первичное напряжение ТН, В		U _{тн}		-	500000	-	500000
	Вторичное напряжение ТН, В		U _{тн (втор)}		-	100	-	100
	Коэффициент трансформации ТН	K _{тн}			-	(500000/100)	-	(500000/100)
						5000		5000
	Первичный ток ТТ ПС (А), (Б), А		I _{тт}		-	2000	-	2000
	Вторичный ток ТТ ПС (А), (Б), А		I _{тт (втор)}		-	1	-	1
	Коэффициент трансформации ТТ ПС (А), (Б)	K _{тт}			-	(2000/1)	-	(2000/1)
						2000		2000
	Максимальный ток нагрузки, А		I _{нагр макс}		-	1200	-	1200
	Минимальный ток на концах ВЛ при КЗ(3) в конце зоны		I КЗ мин		-	2408	-	1764
	Фазный множитель		-		√3	1,732	√3	1,732
	Математический символ				√	-	√	-
ВЫБОР УСТАВОК ПУСКОВЫХ ОРГАНОВ ПО ТОКАМ I ₂ и I _л (ПО I ₂ , ПО I _л)								
I _{ср} ПО I ₂ бл	По условию отстройки от тока небаланса, опре- деляемого погрешно- стями ТТ, частотными небалансами фильтров обратной последова- тельности (ОП) и по- грешностями их настрой- ки, а также небалансами нагрузочного режима сети. В устройстве осуществле- на компенса- ция емкост- ного тока	Погрешность ТТ (ГОСТ 7746-2001)	ε	В соответ- ствии с рекомен- дациями "ЭКРА"	-	0,01	-	0,01
		Частотная за- висимость фильтра ОП	K _f		-	0,23	-	0,23
		Частотный небаланс фильтра ОП	Δf		-	2,0	-	2,0
		Погрешность настройки фильтра ОП	ΔΦ		-	0,005	-	0,005
		Небаланс нор- мального ре- жима	I _{2нр}		-	0,02	-	0,02

Параметр величины	Расчетное условие	Наименование	Обозначение	Расчетная формула	Со стороны ПС Калино		Со стороны ПС Буйская	
					Числовое значение расчетной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
		Суммарный коэффициент небаланса	Кнб	$K_{нб} = \sqrt{(\epsilon/3)^2 - (K_f \cdot \Delta f / f_{ном})^2 + \Delta \Phi^2 + I_{2н}^2 / p^2}$	$\sqrt{(0,01/3)^2 + (0,23 \cdot 2/50)^2 + (0,005)^2 + (0,02)^2}$	0,0214	$\sqrt{(0,01/3)^2 + (0,23 \cdot 2/50)^2 + (0,005)^2 + (0,02)^2}$	0,0214
		Расчетный ток небаланса, А (втор)	I2 нб расч	$I_{2нб\ расч} = K_{нб} \cdot I_{ном}$	$0,0214 \cdot 1,0$	0,0214	$0,0214 \cdot 1,0$	0,0214
		Коэффициент отстройки	Котс		-	1,3	-	1,3
		Коэффициент возврата	Кв		-	0,95	-	0,95
		Расчетный ток срабатывания, А (вт)	Iср ПО I2бл'	$I_{ср\ ПО\ I2бл} \geq K_{отс} \cdot I_{2нб\ расч}$	$1,3 \cdot 0,0214 / 0,95$	0,029	$1,3 \cdot 0,0214 / 0,95$	0,029
	По условию согласования с Iср ПО I2 бл(пк)-противоположного полуконспекта.	Коэффициент токораспределения	Кток	$K_{ток} = I(Б) / I(А)$	-	1,0	-	1,0
		Номинальный ток комплекта (А), (Б)	Iном бл(пк)	при условии: $I_{тт\ бл(пк)} > I_{тт\ бл}$	-	-	-	-
		Расчетный ток срабатывания, А (вт)	Iср ПО I2бл"	$I_{ср\ ПО\ I2\ бл(пк)} \cdot K_{ток} \cdot (I_{тт\ бл(пк)} / I_{тт\ бл})$	$0,029 \cdot 1,00 \cdot 2000 / 2000$	0,029	$0,03 \cdot 1,00 \cdot 2000 / 2000$	0,03
	Диапазон уставок (о.е.)				-	$0,025 \div 0,5$	-	$0,025 \div 0,5$
	Принятая уставка	Ток срабатывания Iср ПО I2 бл (о.е.)	Iср ПО I2бл	Iср ПО I2бл (о.е.)	-	0,05	-	0,05
		Ток срабатывания, А (втор)		$I_{ср\ ПО\ I2бл\ (втор)} = I_{ср\ ПО\ I2бл\ (о.е.)} \cdot I_{тт}$	$0,05 \cdot 1$	0,05	$0,05 \cdot 1$	0,05
Iср ПО I2от	По условию согласования с Iср ПО I2 бл "своего" полуконспекта защиты	Коэффициент отстройки	Котс		$1,5 \div 2,0$	2,0	$1,5 \div 2,0$	2,0
		Расчетный ток срабатывания, (о.е.)	Iср ПО I2от'	$I_{ср\ ПО\ I2от} = K_{отс} \cdot I_{ср\ ПО\ I2бл}$	$2,0 \cdot 0,05$	0,1	$2,0 \cdot 0,05$	0,1

Параметр величины	Расчетное условие	Наименование	Обозначение	Расчетная формула	Со стороны ПС Калино		Со стороны ПС Буйская	
					Числовое значение расчетной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
	По условию согласова- ния с I _{ср} ПО I2 бл проти- воположно- го полуком- плекта за- щиты	Коэффициент отстройки	Котс		1,5÷2,0	2,0	1,5÷2,0	2,0
		Коэффициент токораспреде- ления	Кток	$K_{ток} = I(B) / I(A)$	-	1,0	-	1,0
		Расчетный ток срабатывания, (о.е.)	I _{ср} ПО I2от"	$I_{ср} ПО I2_{от(пк)} * K_{ток} * (I_{тт} от(пк) / I_{тт} от)$	$2,0 * 1,0 * 0,05 * 2000 / 2000$	0,1	$2,0 * 1,0 * 0,00 * 0 / 2000$	0,0
	Диапазон уставок (о.е.)				-	0,05÷1,0	-	0,05÷1,0
	Принятая уставка	Ток срабаты- вания ПО I2 от (о.е.)	I _{ср} ПО I2от		-	0,1	-	0,1
		Ток срабаты- вания, А (втор)		I _{ср} ПО I2 от (втор) = ПО I2от(о.е.) * I _{тт} (втор)	0,10*1	0,1	0,10*1	0,1
		Ток срабаты- вания, кА (перв)		I _{ср} ПО I2от(перв) = ПО I2от(втор) * K _{тт} / 1000	$0,10 * (2000 / 1) / 1000$	0,2	$0,10 * (2000 / 1) / 1000$	0,2
Уср ПО U26л	По условию отстройки от небалансов, определяе- мых погреш- ностями ТН, частотными небалансами фильтров обратной последова- тельности (ОП) и по- грешностями их настрой- ки, а также небалансами нагрузочного режима сети (Рекоменда- ции "ЭКРА")	Коэффициент отстройки	Котс		-	1,3	-	1,3
		Коэффициент возврата	Кв		-	0,9	-	0,9
		Небаланс по- грешности ТН, В (втор)	U2нб		-	1,23	-	1,23
		Небаланс несимметрии сети, В (втор)	U2нр		-	0,0	-	0,0
		Небаланс фильтра ОП, В (втор)	U2нф		-	0,02	-	0,02
		Напряжение срабатывания блокирующе- го РН по U2, В (втор)	Уср РН U26л	$U_{ср} РН U26л \geq K_{отс} / K_{в} * (U2_{нб} + U2_{нр} + U2_{нф})$	$1,3 / 0,9 * (1,23 + 0,0 + 0,02)$	1,81	$1,3 / 0,9 * (1,23 + 0,0 + 0,02)$	1,81
	Диапазон уставок, В (втор)				-	2,0÷6,0	-	2,0÷6,0
	Принятая уставка	Напряжение срабатывания, В (втор)	Уср ПО U26л		-	2,0	-	2,0
		Напряжение срабатывания, кВ (перв)		Уср ПО U26л(перв) = Уср ПО	$2,0 * (500000 / 100) / 1000$	10,0	$2,0 * (500000 / 100) / 1000$	10,0

Параметр величины	Расчетное условие	Наименование	Обозначение	Расчетная формула	Со стороны ПС Калино		Со стороны ПС Буйская	
					Числовое значение расчетной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
Уср ПО U2om	По условию согласования с Уср ПО U2 бл	Коэффициент отстройки	Котс		1,5÷2,0	2,0	1,5÷2,0	2,0
		Напряжение срабатывания отключающего РН по U2, В (втор)	Уср РН U2om	Iср ПО I2om=Комс *Уср ПО U2бл	2,0*2,0	4,0	2,0*2,0	4,0
	Диапазон уставок (о.е.)				-	4,0÷12,0	-	4,0÷12,0
	Принятая уставка	Напряжение срабатывания, В (втор)	Уср ПО U2om		-	4,0	-	4,0
		Напряжение срабатывания, В (перв)		Уср ПО U2om(перв)= Уср ПО U2om(втор) *KmH	4,0*(500000/ 100)/1000	20,0	4,0*(500000/1 00)/1000	20,0
К вын ТН	Коэффици- ент "выноса ТН" на для ПО U2-К- I2 для заме- ра по кон- цам ВЛ с учетом ее емкостной составляю- щей	Рекомен- довано (ПУ вып №9) "вы- носить" замер на середину ВЛ	К вын ТН		-	0,5	-	0,5
	Диапазон уставок				-	0,0÷1,0	-	0,0÷1,0
	Принятая уставка		К вын ТН		-	0,5	-	0,5
ПРОВЕРКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЗАЩИТЫ								
Кч I2(1) Кч I2(1,1)	Проверка чувствитель- ности защи- ты по Iср ПО I2 от при КЗ б расчетной точке. При разном со- ставе рабо- тающего оборудова- ния (в пер- вичных ве- личинах) Для избежа- ния лишних пусков защи- ты при внешних КЗ Кч должен быть равен Кч=2,0 ("ЭКРА")	Нормальный режим сети (вс ё включено)						
		КЗ на проти- воположных шинах ВЛ	КЗ ВЛ		-	-	-	-
		Расчётная ве- личина I2 при K(1)	I2(1)рас		-	0,81	-	0,73
		Чувствитель- ность по току I2	K(1)	K(1)=I2(1) рас/Iср ПО I2от	0,81/0,20	4,05	0,73/0,20	3,63
		Расчётная ве- личина I2 при K(1,1)	I2(1,1)рас		-	0,96	-	1,05
		Чувствитель- ность по току I2	K(1,1)	K(1,1)=I2(1, 1)рас/Iср ПО I2от	0,96/0,20	4,80	1,05/0,20	5,27
		Отключена ВЛ 500 кВ Калино-Пермская-ГРЭС(1 цепь), АТГ-3 ПС Калино						
		КЗ на проти- воположных шинах ВЛ	КЗ ВЛ		-	-	-	-

Параметр величины	Расчетное условие	Наименование	Обозначение	Расчетная формула	Со стороны ПС Калино		Со стороны ПС Буйская	
					Числовое значение расчетной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
	Расчётная величина тока при- ведена без учета ем- костью компенса- ции (Учет компенса- ции повы- шает вели- чину Кч)	Расчётная ве- личина I2 при K(1)	I2(1)рас		-	0,77	-	0,70
		Чувствитель- ность по току I2	K(1)	$K(1)=I2(1)_{рас}/I_{ср} ПО I2_{от}$	0,77/0,20	3,87	0,70/0,20	3,49
		Расчётная ве- личина I2 при K(1,1)	I2(1,1)рас		-	0,92	-	1,08
		Чувствитель- ность по току I2	K(1,1)	$K(1,1)=I2(1,1)_{рас}/I_{ср} ПО I2_{от}$	0,92/0,20	4,58	1,08/0,20	5,40
		Отключена ВЛ 500 кВ Буйская-КАГРЭС, АТП-3 ПС Буйская						
		КЗ на проти- воположных шинах ВЛ	КЗ ВЛ		-	-	-	-
		Расчётная ве- личина I2 при K(1)	I2(1)рас		-	0,77	-	0,52
		Чувствитель- ность по току I2	K(1)	$K(1)=I2(1)_{рас}/I_{ср} ПО I2_{от}$	0,77/0,20	3,85	0,52/0,20	2,61
		Расчётная ве- личина I2 при K(1,1)	I2(1,1)рас		-	1,01	-	0,75
		Чувствитель- ность по току I2	(1,1)	$K(1,1)=I2(1,1)_{рас}/I_{ср} ПО I2_{от}$	1,01/0,20	5,04	0,75/0,20	3,74
Кч U2(1) Кч U2(1,1)	Проверка чувстви- тельности защиты по Уср ПО U2от при при КЗ В расчетной точке (в первичных величинах)	Нормальный режим сети (всё включено)						
		КЗ на проти- воположных шинах ВЛ	КЗ ВЛ			-		-
		Расчётная ве- личина U2 при K(1)	U2(1)рас			15,47		12,67
		Чувствитель- ность по току I2	K(1)	$K(1)=[U2(1)_{рас}+K_{вын} * Z_{л} * I2(1)]/U_{ср} ПО I2_{от}$	$(15,47+0,5*91,2*0,77)/20,0$	2,53	$(12,67+0,5*91,2*0,52)/20,0$	1,82
		Расчётная ве- личина U2 при K(1,1)	U2(1,1)рас		-	18,35	-	18,41
		Чувствитель- ность по току I2	K(1,1)	$K(1)=[U2(1,1)_{рас}+K_{вын} * Z_{л} * I2(1,1)]/U_{ср} ПО I2_{от}$	$(18,35+0,5*91,2*1,01)/20,0$	3,21	$(18,41+0,5*91,2*0,75)/20,0$	2,63

Параметр величины	Расчетное условие	Наименование	Обозначение	Расчетная формула	Со стороны ПС Калино		Со стороны ПС Буйская	
					Числовое значение расчетной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
I _{ср} ПО Лл бл	По условию отстройки от максималь- ного тока нагрузки в месте защи- ты	Коэффициент надежности	Кн		-	1,1	-	1,1
		Коэффициент возврата	Кв		-	0,9	-	0,9
		Расчетный ток срабатывания, (о.е.)	I _{ср} ПО Лл бл'	$I_{ср\text{ ПО Лл бл}} \geq K_n/K_v * \sqrt{3} * I_{\text{нагр макс/Лтт}}$	1,1/0,9*√3*12 00/2000	1,27	1,1/0,9*√3*1 200/2000	1,27
	По условию согласования с I _{ср} ПО Лл бл(пк)- противопо- ложного комплекта защиты	Коэффициент токораспреде- ления	Кток	$K_{\text{ток}}=I(Б)/I(A)$	-	1,0	-	1,0
		Номинальный ток комплекта (А), (Б)	I ном бл(пк)	при усло- вии: I _{тт} бл(пк)>I _{тт} бл	-	-	-	-
		Расчетный ток срабатывания, (о.е.)	I _{ср} ПО Лл бл"	$I_{ср\text{ ПО Лл бл(пк)}} * K_{\text{ток}} * (I_{\text{тт бл(пк)}}/I_{\text{тт бл}})$	1,27*1,0*200 0/2000	1,27	1,27*1,0*200 0/2000	1,27
	Диапазон уставок (о.е.)				-	0,2÷4,0	-	0,2÷4,0
	Принятая уставка	Ток срабаты- вания I _{ср} ПО Лл бл (о.е.)	I _{ср} ПО Лл бл	I _{ср} ПО Лл бл (о.е.)	-	1,27	-	1,27
		Ток срабаты- вания, А (втор)		$I_{ср\text{ ПО Лл бл(втор)}} = I_{ср\text{ ПО Лл бл}} * I_{\text{тт бл(пк)}}/I_{\text{тт бл(втор)}}$	1,27*1	1,27	1,27*1	1,27
I _{ср} ПО Лл от	По условию согласования с I _{ср} ПО Лл бл "своего" полуком- плекта защи- ты	Коэффициент отстройки	Котс		1,5÷2,0	1,5	1,5÷2,0	1,5
		Расчетный ток срабатывания, (о.е.)	I _{ср} ПО Лл от'	$I_{ср\text{ ПО Лл от}} = K_{\text{отс}} * I_{ср\text{ ПО Лл бл}}$	1,5*1,27	1,91	1,5*1,27	1,91
	По условию согласования с I _{ср} ПО Лл от(пк)- противопо- ложного комплекта защиты	Коэффициент отстройки	Котс		1,5÷2,0	1,5	1,5÷2,0	1,5
		Коэффициент токораспреде- ления	Кток	$K_{\text{ток}}=I(Б)/I(A)$	-	1,0	-	1,0
		Расчетный ток срабатывания, (о.е.)	I _{ср} ПО Лл от"	$I_{ср\text{ ПО Лл от(пк)}} * K_{\text{ток}} * (I_{\text{тт бл(пк)}}/I_{\text{тт бл(втор)}}$	1,5*1,0*1,27* 2000/2000	1,91	1,5*1,0*1,27* 2000/2000	1,91
	По чувстви- тельности к току 3-х фазного КЗ	Коэффициент чувствитель- ности	Кч	1,7÷2,0	-	1,7	-	1,7

Параметр величины	Расчетное условие	Наименование	Обозначение	Расчетная формула	Со стороны ПС Калино		Со стороны ПС Буйская	
					Числовое значение расчетной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
	на ВЛ в зоне действия	Расчетный ток срабатывания, (о.е.)	Иср ПО Илот'''	Иср ПО Ил от≤Ikз МИН*√3/Кч/	2408*√3/1,7/2 000	1,23	1764*√3/1,7/ 2000	0,90
	Диапазон уставок (о.е.)					0,4÷8,0	-	0,4÷8,0
Принятая уставка	Ток срабаты- вания Иср ПО Ил от (о.е.)	Иср ПО Ил бл	Иср ПО Ил от (о.е.)		2,54	-	2,54	
	Ток срабаты- вания, А (втор)		Иср ПО Ил от (втор)=Иср ПО Ил от (о.е.)*Itт	2,5*1	2,54	2,5*1	2,54	
ВЫБОР УСТАВОК ПУСКОВЫХ ОРГАНОВ ПО ПРИРАЩЕНИЯМ ТОКОВ I1 и I2 (ПО DI1, ПО DI2)								
Иср ПО DI2 бл	По условию максималь- ной чув- ствительно- сти	Расчётный ток срабатывания (Рекомендова- но "ЭКРА")	Иср ПО DI2 бл	Иср ПО DI2 бл≥0,025*I ном		0,25		0,25
	Диапазон уставок (о.е.)				При Iном=1,0	0,02÷1,5	При Iном=1,0	0,02÷1,5
	Принятая уставка (о.е.)				-	0,25	-	0,25
Иср ПО DI2 от	По условию согласова- ния с Иср ПО DI2 бл противопо- ложного полуком- плекта за- щиты	Коэффициент отстройки	Котс		1,5÷2,0	2,0	1,5÷2,0	2,0
		Расчётный ток срабатывания	Иср ПО DI2 от	Иср ПО DI2 от=Котс*I ср ПО DI2 бл(п/к)	2,0*0,25	0,5	2,0*0,00	0,5
	Диапазон уставок (о.е.)				При Iном=1,0	0,04÷2,5	При Iном=1,0	0,04÷2,5
	Принятая уставка (о.е.)				-	0,5	-	0,5
Иср ПО DI1 бл	По условию согласования с Иср ПО DI2 бл	Коэффициент отстройки	Котс		-	4,0	-	4,0
		Расчётный ток срабатывания	Иср ПО DI1 бл	Иср ПО DI1 бл=Котс*Iс р ПО DI2 бл	4,0*0,25	1,0	4,0*0,25	1,0
	Диапазон уставок (о.е.)				При Iном=1,0	0,08÷3,0	При Iном=1,0	0,08÷3,0
	Принятая уставка (о.е.)				-	1,0	-	1,0
Иср ПО DI1 от	По условию согласования с Иср ПО DI2 бл	Коэффициент отстройки	Котс		-	4,0	-	4,0
		Расчётный ток срабатывания	Иср ПО DI1 от	Иср ПО DI1 от=Котс*I ср ПО DI2 от	4,0*0,50	2,0	4,0*0,50	2,0
	Диапазон уставок (о.е.)				При Iном=1,0	0,16÷5,0	При Iном=1,0	0,16÷5,0
	Принятая уставка (о.е.)				-	2,0	-	2,0

Параметр величины	Расчетное условие	Наименование	Обозначение	Расчетная формула	Со стороны ПС Калино		Со стороны ПС Буйская	
					Числовое значение расчетной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
ВЫБОР УСТАВОК ОРГАНА МАНИПУЛЯЦИИ (ОМ) И ОРГАНА СРАВНЕНИЯ ФАЗ (ОСФ)								
К фильтра	По обеспече- нию пре- имуществен- ного сравне- ния фаз для K(1.1)	Коэффициент запаса	Kзап		-	1,5	-	1,5
		Ток ПП, А (перв)	I K ^(1.1)		-	1555	-	361,00
		Ток ОП, А (перв)	I2 K ^(1.1)		-	960	-	174,00
		Расчетный коэффициент фильтра	K расч'	$K > K_{зап} * [I1 K^{(1.1)} / I2 K^{(1.1)}]$	$1,5 * 1555 / 960$	2,43	$1,5 * 361 / 174$	3,11
	Проверка влияния нагрузки при K ⁽¹⁾ (упрощен- но)	Ток ОП, А (перв)	I2 K(1)		-	809	-	726
		Расчетный коэффициент фильтра	K расч"	$K > K_{зап} * [I_{нагр} / I2 K^{(1)}]$	$1,5 * 1200 / 809$	2,22	$1,5 * 1200 / 726$	2,48
	Предвари- тельно вы- бранный K		-		-	10	-	10
	Проверка чувствитель- ности ОМ ВЧ передат- чика. (Дол- жен быть Kч≥1,3)	Расчет приближенный, без учета углов при токах I1 и I2			-	-	-	-
		Эквивалент- ный ток ОП, А (втор)	I2 экв	$I2_{экв} = [I2 K^{(1.1)} - I1 K^{(1.1)} / K] / K_{тт}$	$(960 - 1555 / 10) / (200 / 0,1)$	0,40	$(174 - 361 / 10) / (2000 / 1)$	0,07
		Ток полной манипуляции, А (втор)	I2 п манип	I2 п манип=Iср ПО I2 бл (автомати- чески)	-	0,05	-	0,05
		Коэффициент чувствитель- ности	Kч	$Kч = I2_{экв} / I_{ср} ПО I2 бл$	0,40/0,05	7,89	0,07/0,05	1,35
	Диапазон уставок				-	6÷10	-	6÷10
	Принятая уставка		-		-	10	-	10
в1	Компесация емкостного тока линии прямой по- следователь- ности	(Удельная первичная величина)	-		-	3,77	-	3,77
	Диапазон уставок, (*10 ⁻⁶) сим/км, (перв)				-	0,0÷50,0	-	0,0÷50,0
	Принятая уставка, (* 10-6) сим/км, (перв)		B1		-	3,77	-	3,77

Параметр величины	Расчетное условие	Наименование	Обозначение	Расчетная формула	Со стороны ПС Калино		Со стороны ПС Буйская	
					Числовое значение расчетной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
Угол бло- кировки	Угол блоки- ровки при- нимается:		фбл	для корот- ких ВЛ,	-	±50	-	±50
				для средней протяжен-	-	±60	-	±60
				для длин- ных ВЛ	-	±70	-	±70
	Диапазон уставок (град)				-	50÷70	-	50÷70
	Принятая уставка (град)		фбл	для сред- ней протя- женности ВЛ	-	±57	-	±57
ВЫБОР УСТАВОК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ (ИО) СОПРОТИВЛЕНИЯ (ИПФ)								
К ум	Замер на ИО сопротивления равен $Z_{\phi}=U_{\phi}/I_{\phi}+K_{ум}*(K1*3I_{\phi}+K2*3I_{\phi}$ параллельной ВЛ); K1 и K2 вычисляются тер- миналом по заданным удельным параметрам ВЛ							
	Коэффици- ент степени компенсации токов нуле- вой последо- вательности	Для отстройки от излишнего срабатывания ИПФ неповреждённой фазы при близких однофазных КЗ через переходное сопротивление При неиспользовании ОАПВ1 принимается К ум=1,0 (Рекомендовано "ЭКРА")						
	Диапазон уставок				-	0,0÷1,0	-	0,0÷1,0
	Принятая уставка		К ум		(ориенти- ровано)	0,5	(ориенти- ровано)	0,5
Хипф Хипфк фЗ	По чувстви- тельности к КЗ в конце зоны дей- ствия защи- ты	Коэффициент запаса	Кзап		1,5÷2,0	1,6	1,5÷2,0	1,6
		Сопротивление прямой послед ВЛ	X1ВЛ		-	91,2	-	91,2
		Расчетная уставка ИПФ, Ом (перв)	Хипф, Хипфк	Хипф=Хип фк≥Кзап*X 1ВЛ	1,6*91,2	145,92	1,6*91,2	145,92
	По отстрой- ке от расчет- ной макси- мальной нагрузки, Ом/ф	Коэффициент отстройки	К отс		-	1,2	-	1,2
		Расчетная нагрузка	Хнагр расч	Хнагр расч=0,9*U ном ф/Инагр	0,9*500000/√ 3/1200	216,51	0,9*500000/√ 3/1200	216,51
		Коэффициент надежности	Кн		-	1,25	-	1,25
		Коэффициент возврата	Кв		-	1,05	-	1,05
		Ориенти- ровочный "Коси- нус φ"	cosφ	cos(φмч- φнагр)	-	0,95	-	0,95
		Расчетная уставка ИПФ, Ом (перв)	Хипф, Хипфк	Хипф≤Zнагр р расч/Кн*Кв *cos(φмч-	216,51/1,25*1, 05*0,95	172,78	216,51/1,25*1, 05*0,95	172,78
	Диапазон уставок, Ом/ф (втор)				-	5,0÷500,0	-	5,0÷500,0

Параметр величины	Расчетное условие	Наименование	Обозначение	Расчетная формула	Со стороны ПС Калино		Со стороны ПС Буйская	
					Числовое значение расчетной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
	Принятая уставка, Ом/ф (перв)		Хипф (перв)		-	150,0	-	150,0
	Принятая уставка, Ом/ф (втор)		Хипф (втор)	Хипф (втор)=Хип ф (перв)/(К _{тн} / К _{тт})	150,0/((50000 0/100)/(2000/1))	60,0	150,0/((50000 0/100)/(2000/1))	60,0
	Диапазон уставок, град				-	91,0÷179	-	91,0÷179
	Принятая уставка, град		φ3		Определяет- ся нагрузкой	115,0	Определяет- ся нагрузкой	115,0
Хипф1 φ2	Уставка по смещению X уст ипф вы- бирается минимально возможной с учетом от- стройки от расчетной максималь- ной нагрузки (перв), Ом	Коэффициент отстройки	Котс		-	0,1	-	0,1
		Расчетная уставка ИПФ1 (втор), Ом	Хипф1	Хипф1≥Кот с*Хипф (втор)	0,1*60,0	6,0	0,1*60,0	6,0
	Диапазон уставок, Ом/ф (втор)				-	1,0÷250,0	-	1,0÷250,0
	Принятая уставка, Ом/ф (втор)		Х уст ипф1		Определяет- ся нагрузкой	6,0	Определяет- ся нагрузкой	6,0
	Диапазон уставок, град				-	-89÷89	-	-89÷89
	Принятая уставка, град		φ2		Определяет- ся нагрузкой	-15,0	Определяет- ся нагрузкой	-15,0
	φ1	Угол линии	Угол макси- мальной чув- ствительности	φ1	(в биапазоне 45÷89 град) рассчитывается устройством автоматически по заданным параметрам ВЛ			
Runф	Определяет- ся возмож- ным актив- ным сопро- тивлением в	В зависимости от проводимо- сти грунта по трассе ВЛ, Ом (перв)	Рипф	Рекомендо- вано "ЭКРА"	Runф=10÷30	30,0	Рипф=10÷30	30,0
	Диапазон уставок, Ом/ф (втор)				-	1,0÷250,0	-	1,0÷250,0
	Принятая уставка, Ом/ф (втор)		Рипф	Рипф (втор)=Рип ф (перв)/(К _{тн} / К _{тт})	30,00/((5000 00/100)/(200 0/1))	12,0	30,00/((5000 00/100)/(200 0/1))	12,0

Параметр величины	Расчетное условие	Наименование	Обозначение	Расчетная формула	Со стороны ПС Калино		Со стороны ПС Буйская	
					Числовое значение расчетной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
Рипфк	Определяет- ся возмож- ным актив- ным сопро- тивлением в месте повре- ждения при $K^{(1)}$, то есть R земли	В зависимости от проводимо- сти грунта по трассе ВЛ, Ом (перв)	Рипфк	Рекомендо- вано "ЭКРА"	$R_{ипфк}=10 \div 30$	30,0	$R_{un0K}=10 \div 30$	30,0
	Должно вы- полняться условие $R_{уст\ ипфк} \leq R_{уст\ ипф}$ (требование разработчи- ка)	$R_{уст\ ипфк} \leq 30$ Ом (перв)	-		-	25,0	-	25,0
	Диапазон уставок, Ом/ф (втор)				-	1,0÷250,0	-	1,0÷250,0
	Принятая уставка, Ом/ф (втор)		Рипфк(втор)	$R_{ипфк(втор)} = R_{ипфк(перв)} / (K_{тн} / K_{тт})$	$25,00 / ((5000 / 100) / (200 / 1))$	10,0	$25,00 / ((5000 / 100) / (200 / 1))$	10,0
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПУСКОВЫЕ ОРГАНЫ И РЕЛЕ								
ПО Io	Фиксация "КЗ на зем- лю"	Номинальный ток, А (втор)	Ином		-	1,0	-	1,0
		Пусковой ор- ган тока нуле- вой последова- тельности, А (втор)	ПО Io	$ПО\ Io = 5 * I_{ном}$	Не регулиру- ется ("ЭКРА")	5,0	Не регулиру- ется ("ЭКРА")	5,0
ПО РТ выкл.ф	Блокирова- ние выход- ных сигналов ИО сопро- тивления	Пусковой ор- ган макси- мального тока фазы, А (втор)	ПО РТ выкл.ф	$РТ\ выкл.ф = 0,04 * I_{ном}$	Не регулиру- ется ("ЭКРА")	0,04	Не регулиру- ется ("ЭКРА")	0,04
БНН	Реагирует на обрыв фаз цепей напряжения	Блокировка цепей напря- жения	БНН	Срабатыва- ет при сни- жении напряжения в обной из фаз на 7,5 В (втор)	-	-	-	-
ПО Uмин.ф	Для исклю- чения отказа БНН при повреждении цепей Y_{Δ}	Пусковой ор- ган минималь- ного напряже- ния фазы, В (втор)	ПО Uмин.ф	-	Не регулиру- ется ("ЭКРА")	7,5	Не регулиру- ется ("ЭКРА")	"7,5

Параметр величины	Расчетное условие	Наименование	Обозначение	Расчетная формула	Со стороны ПС Калино		Со стороны ПС Буйская	
					Числовое значение расчетной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
ПО U _{макс,ф}	Контроль разновременности включения фаз выключа- теля	Пусковой ор- ган макси- мального напряжения фазы	ПО U _{макс.ф}	ПО U=0,85*U _н ом фазн=0,85* 100/√3=49	Не регулиру- ется ("ЭКРА")	49,0	Не регулиру- ется ("ЭКРА")	49,0
Т задерж ДФЗ	Для обеспе- чения селек- тивности бействия ДФЗ	Время за- держки на срабатывание ДФЗ при внешних КЗ	Т задерж ДФЗ	Окончательно определяется при наладке защиты и в.ч.канала				
	Диапазон уставок, с				-	0,01÷0,05	-	0,01÷0,05
	Принятая уставка, с		Т задерж ДФЗ		(ориентиро- вочно)	0,02	(ориентиро- вочно)	0,02
Выводы: 1. Выбранные уставки входят в предлагаемый диапазон устройства РЗ								
2. Чувствительность защиты обеспечивается								
3. Уставки рассчитаны по рекомендациям разработчика ЭКРА								

Таблица 8 – расчет уставок ОАПВ ВЛ 500 кВ на Буйскую

Параметр Величины	Расчетное условие	Наименова- ние	Обозначение	Расчетная формула	В сторону ПС Буйская		В сторону ПГРЭС	
					Числовое зна- чение расчет- ной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Исходные данные	Номинальное напряжение рассчитываемой ВЛ, кВ		U _{ном}		-	500	-	500
	Полное сопротивление прямой последовательности ВЛ, Ом		Z _л		-	91,2	-	30,04
	Первичное напряжение ТН, В		U _{тн}		-	500000	-	500000
	Вторичное напряжение ТН, В		U _{тн (втор)}		-	100	-	100
	Коэффициент трансформа- ции ТН	K _{тн}			-	(500000/100)	-	(500000/100)
						5000		5000
	Первичный ток ТТ ПС (А), (Б), А		I _{тт}		-	2000	-	2000
	Вторичный ток ТТ ПС (А), (Б), А		I _{тт (втор)}		-	1	-	1
	Коэффициент трансформа- ции ТТ ПС (А), (Б)	K _{тт}			-	(2000/1)	-	(2000/1)
						2000		2000
	Максимальный ток нагруз- ки, А		I _{нагр макс}		-	1200	-	1500
	Фазный множитель		-		√3	1,732	√3	1,732
ВЫБОР УСТАВОК ИЗБИРАТЕЛЕЙ ФАЗ								
K _{ум}	Замер на ИО сопротивления равен $Z_{\phi} = U_{\phi}/I_{\phi} + K_{ум} * (K_1 * 3I_o + K_2 * 3I_o \text{ параллельной ВЛ})$; K ₁ и K ₂ вычисляются терминалом по заданным удельным параметрам ВЛ							
	Коэффици- ент степени компенсации токов нуле-	Для отстройки от излишнего срабатывания ИПФ неповреждённой фазы при близких однофазных КЗ через переходное сопротивление При неиспользовании ОАПВ1 принимается K _{ум} =1,0 (Рекомендовано "ЭКРА")						
	Диапазон уставок				-	0,0÷1,0	-	0,0÷1,0
	Принятая уставка		K _{ум}		(ориентировоч- но)	0,5	(ориентиро- вочно)	0,7
Хипф Хипфк ф3	По чувстви- тельности к КЗ в конце зоны дей- ствия защиты	Коэффици- ент запаса	K _{зап}		1,5÷2,0	1,5	1,5÷2,0	1,5
		Сопротивле- ние прямой послед ВЛ	X _{1ВЛ}		-	91,2	-	30,04
		Расчетная уставка ИПФ, Ом/ф (перв)	Хипф	Хипф=Хип фк≥K _{зап} *X 1ВЛ	1,50*91,20	136,80	1,50*30,04	45,06
	По отстройке от расчетной максималь- ной нагрузки (перв)	Коэффици- ент отстрой- ки	K _{отс}		-	1,2	-	1,2
		Расчетная нагрузка	X _{нагр расч}	X _{нагр расч} =0,9*U ном ф/I _{нагр}	0,9*500000/√3/ 1200	216,51	0,9*500000/√ 3/1500	173,21
		Коэффици- ент надежно- сти	K _н		-	1,25	-	1,25

Параметр Величины	Расчетное условие	Наименова- ние	Обозначение	Расчетная формула	В сторону ПС Буйская		В сторону ПГРЭС		
					Числовое зна- чение расчет- ной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина	
		Коэффици- ент возврата	Кв		-	1,05	-	1,05	
		Ориентиро- вочный "Ко- синус φ"	cos(φмч- фнагр)		-	0,90	-	0,90	
		Расчетная уставка ИПФ, Ом/ф (перв)	Хипф	$\text{Хипф} \leq \frac{Z_{\text{нагр}}}{K_n \cdot K_v} \cdot \cos(\phi_{\text{мч-фнагр}})$	216,51/1,25*1,0 5*0,90	163,68	173,21/1,25*1, 05*0,90	130,95	
	Диапазон уставок, Ом/ф (втор)				При Iном=1,0 А	5,0÷500,0	При Iном=1,0 А	5,0÷500,0	
	Принятая уставка, Ом/ф (перв)		Хипф (перв)		-	150,0	-	50,0	
	Принятая уставка, Ом/ф (втор)		Хипф (втор)	Хипф (втор)=Хип ф	150,0/(5000/200 0)	60,0	50,0/(5000/20 00)	20,0	
	Диапазон уставок, град				-	91,0÷179	-	91,0÷179	
	Принятая уставка, град		φ3		Определяется нагрузкой	115,0	Определяет- ся нагрузкой	115,0	
	Хип ф1	Уставка по смещению X уст ипф выбирается минимально возможной с учётом от- стройки от расчетной максималь- ной нагруз- ки	Коэффици- ент отстрой- ки	Котс		-	0,1	-	0,1
			Расчетная уставка ИПФ1, Ом/ф (втор)	Хипф1	$\text{Хипф1} \geq \text{Ко-тс} \cdot \text{Хипф(втор)}$	0,1*60,0	6,0	0,1*20,0	2,0
			-		-	-	-	-	
Диапазон уставок, Ом/ф (втор)					При Iном=1,0 А	1,0÷250,0	При Iном=1,0 А	1,0÷250,0	
Принятая уставка, Ом/ф (втор)		X уст ипф1		-	6,0	-	2,0		
Диапазон уставок, град				-	-89÷89	-	-89÷89		
Принятая уставка, град		φ2		Определяется нагрузкой	-15,0	Определяет- ся нагрузкой	-15,0		
φ1		Угол линии	Угол макси- мальной чув- ствительно- сти	φ1	(в диапазоне 45÷89 град) рассчитывается устройством автоматически по заданным параметрам ВЛ				
Рипф	Определяется возможным активным сопротивле- нием в месте повреждения при K ⁽¹⁾ , то есть R земли	В зависимо- сти от про- водимости грунта по трассе ВЛ, Ом (перв)	Рипф	Рекомен- довано "ЭКРА"	Рипф=10÷30	30,0	Рипф= 10÷30	30,0	

Параметр Величины	Расчетное условие	Наименова- ние	Обозначение	Расчетная формула	В сторону ПС Буйская		В сторону ПГРЭС	
					Числовое зна- чение расчет- ной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
	Диапазон уставок, Ом/ф (втор)				При $I_{ном}=1,0$ А	$1,0 \div 250,0$	При $I_{ном}=1,0$ А	$1,0 \div 250,0$
	Принятая уставка, Ом/ф (втор)		Рипф (втор)	$R_{ипф(втор)} = R_{ипф(перв)} / (K_{тн} / K_{тт})$	$30,0 / (5000 / 2000)$	12,0	$30,0 / (5000 / 2000)$	12,0
R уст ипфк	Определяется возможным активным сопротивле- нием в месте повреждения при $K^{(1)}$, то есть R земли	В зависимо- сти от прово- димости грунта по трассе ВЛ, Ом (перв)	Рипфк	Рекомен- довано "ЭКРА"	$R_{ипфк} = 10 \div 30$	30,0	$R_{ипфк} = 10 \div 30$	30,0
	Должно вы- полняться условие $R_{уст ипфк} \leq R_{уст ипф}$ (требование разра- ботчика)	$R_{уст ипфк} \leq 30$ Ом (перв)	-		-	25,0	-	25,0
	Диапазон уставок, Ом/ф (втор)				При $I_{ном}=1,0$ А	$1,0 \div 250,0$	При $I_{ном}=1,0$ А	$1,0 \div 250,0$
	Принятая уставка, Ом/ф (втор)		Рипфк(втор)	$R_{ипфк(втор)} = R_{ипфк(перв)} / (K_{тн} / K_{тт})$	$25,0 / (5000 / 2000)$	10,0	$25,0 / (5000 / 2000)$	10,0
ВЫБОР УСТАВОК ОДНОФАЗНОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ (ОАПВ)								
I _{ср} ПО РТОП	Для кратко- временного ввода на самостоя- тельное дей- ствие ИПФ отключив- шейся фазы в цикле ОАПВ; пуск при м/ф КЗ	Коэффици- ент запаса	K _{зап}		-	1,2		1,2
		Коэффици- ент возврата	K _в		-	0,9		0,9
		Ток нессим- метрии нагрузки	I _{2 нес}	$I_{2 нес} = 0,2 * I_{ном}$	-	0,2		0,2
		Расчётный ток РТОП	I _{ср РТОП}	$I_{ср РТОП} \geq K_{зап} * I_{2 нес} / K_{в}$	$1,2 * 0,2 / 0,9$	0,3	$1,2 * 0,2 / 0,9$	0,3

Параметр Величины	Расчетное условие	Наименова- ние	Обозначение	Расчетная формула	В сторону ПС Буйская		В сторону ПГРЭС	
					Числовое зна- чение расчет- ной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
	Диапазон уставок, (о.е.)				При $I_{ном}=1,0$ А	0,1÷0,3	При $I_{ном}=1,0$ А	0,1÷0,3
	Принятая уставка, (о.е.)		Иср РТОП		-	0,3	-	0,3
Иср ПО РТНП	Для выявления К(1) Блокирует действие ОАПВ на отключение трёх фаз. С торможени- ем от фазно- го тока	Коэффици- ент запаса	Кзап		-	1,2	-	1,2
		Коэффици- ент возврата	Кв		-	0,9	-	0,9
		Ток несим- метрии нагрузки	$3I_o$ нес	$3I_o$ нес=0,15* $I_{ном}$	-	0,15	-	0,15
		Расчётный ток РТНП	Иср РТНП	$I_{ср РТНП} \geq K_{зап} * 3I_o$ нес/Кв	0,3*0,15/0,9	0,2		0,2
	Диапазон уставок, (о.е.)				При $I_{ном}=1,0$ А	0,05÷0,2	При $I_{ном}=1,0$ А	0,05÷0,2
	Принятая уставка, (о.е.)		Иср РТНП		-	0,2	-	0,2
Уср ПО РННП	Быстродей- ствующее реле для повышения надёжности выявления К(1)	Коэффици- ент запаса	Кзап		-	1,2	-	1,2
		Коэффици- ент возврата	Кв		-	0,9	-	0,9
		Напряжение несимметрии нагрузки	$3U_o$ нес	$3U_o$ нес=1,23%	При $U_{ном}=100,0$ В	1,23	При $U_{ном}=100,0$ В	1,23
		Расчётное напряжение РННП (втор)	Уср РННП	$U_{ср РННП} \geq K_{зап} * 3U_o$ нес/Кв	1,2*1,23/0,9	1,6	1,2*1,23/0,9	1,6
	Диапазон уставок, В (втор)				-	6,0÷15,0	-	6,0÷15,0
	Принятая уставка, В (втор)		Уср РННП		-	6,0	-	6,0
Кт ПО РТНП	Коэффици- ент тормо- жения быст- родействую- щего реле	$K_t РТНП=0,1$ (о.е.)	-	По рекоменд ации разработч ика ("ЭКРА")	-	0,1	-	0,1
	Диапазон уставок, (о.е.)				-	0,0÷0,15	-	0,0÷0,15
	Принятая уставка, (о.е.)		Кт РТНП		-	0,1	-	0,1
Иср БТ	Блокирует выходные сигналы ПО РТНП и ПО РННП при многофаз- ных КЗ	Коэффици- ент запаса	Кзап		-	1,2	-	1,2
		Коэффици- ент возврата	Кв		-	0,9	-	0,9

Параметр Величины	Расчетное условие	Наименова- ние	Обозначение	Расчетная формула	В сторону ПС Буйская		В сторону ПГРЭС	
					Числовое зна- чение расчет- ной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
		Ток несим- метрии нагрузки	3I _{о нес}	3I _{о нес} =0,5*I _{н ом}	-	0,5	-	0,5
		Расчѐтный ток БТ	I _{ср БТ}	I _{ср РТНП} ≥Kзап*3I _{о нес/Кв}	1,2*0,5/0,9	0,7	1,2*0,5/0,9	0,7
	Диапазон уставок, (о.е.)				При I _{ном} =1,0 А	2,5÷5,0	При I _{ном} =1,0 А	2,5÷5,0
	Принятая уставка, (о.е.)		I _{ср БТ}		-	2,5	-	2,5
I _{ср РТНП_ОКП Д}	Орган кон- троля пога- сания дуги	Коэффици- ент запаса	Kзап		-	1.2	-	1,2
		Коэффици- ент возврата	Kв		-	0,9	-	0,9
		Ток несим- метрии	3I _{о нес}	3I _{о нес} =0,15*I	-	0,15	-	0,15
		Расчѐтный ток РТНП_ОКП Д	I _{ср РТНП_ОКПД}	I _{ср РТНП_ОК ПД} ≥Kзап*3 I _{о нес/Кв}	1,2*0,15/0,9	0,2	1,2*0,15/0,9	0,2
	Диапазон уставок, (о.е.)				При I _{ном} =1,0 А	0,1÷0,25	При I _{ном} =1,0 А	0,1-5÷0,25
	Принятая уставка, (о.е.)		I _{ср РТНП_ОКПД}		-	0,2	-	0,2
Уср ПО РН1_ОКПД Уср ПО НЧ ОКПД	Орган кон- троля пога- сания дуги На ВЛ есть ШР - вводят- ся 1, 2 каналы ОКПД	Первый кан- ал ПО напряжения для ВЛ с шунтирую- щим реакто- ром	Уср ПО РН1_ОКПД	Имеет не- регулируе- мую устав- ку, вклю- чен на компенси- рованное на середи- ну ВЛ напряже- ние отклю- чѐнной фазы, В (втор)	-	25,0	-	25,0
		Второй канал ПО напряже- ния реагиру- ет на низко- частотные составляю- щие напря- жения от- ключѐнной фазы	Уср ПО НЧ_ОКПД	Имеет не- регулируе- мую устав- ку. Имеет дополни- тельную задержку на выходе 0,15 с, В (втор)	-	3,0	-	3,0

Параметр Величины	Расчетное условие	Наименова- ние	Обозначение	Расчетная формула	В сторону ПС Буйская		В сторону ПГРЭС	
					Числовое зна- чение расчет- ной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
Уср ПО РН_ОВУВ	Орган выяв- ления успеш- ности вклю- чения фазы на "первом конце" ВЛ	-	Уср ПО РН_ОВУВ	Имеет не- регулируе- мую устав- ку, вклю- чен на компенси- рованное на середи-	-	40,0	-	40,0
Уср ПО РННП_ОВУВ	Орган бло- кирования канала ОВУВ	Необходим для ВЛ с высокой степенью компенсации емкости ли- нии	Уср ПО РННП_ОВУ В	Имеет не- регулируе- мую устав- ку, вклю- чен на компенси- рованное на проти- вополож-	-	50,0	-	50,0
ОАПВ-РП (на "первом конце" ВЛ)	Расчетная пауза ОАПВ (Время де- ионизации среды, готов- ность приво- да выключа- теля)	Длина ВЛ, км	L		-	91,2	-	30,0
		"Удельное" время де- ионизации, с/км	t		-	0,004	-	0,004
		Полное время деионизации среды, с	tΣ	$t\Sigma = t * L$ (эм- пирическая формула)	0,004*91,2	0,36	0,004*30,0	0,12
		Время запа- са, с	Δt		-	0,4	-	0,4
		Расчетная пауза ОАПВ	T РП	$T РП = t\Sigma + \Delta t$	0,365+0,4	0,76	0,120+0,4	0,52
	Диапазон уставок, с				-	0,5÷5,0	-	0,5÷5,0
	Принятая уставка, с		ОАПВ-РП	(без учета tBB)	-	0,80	-	0,52
ОАПВ-АП (на "первом конце" ВЛ)	Адаптивная бестоковая пауза ОАПВ	Задержка от момента фиксации команды отключения фазы, с	t1		-	0,1	-	0,1
	(Допускается ведение в действие ОАПВ-РП или ОАПВ- АП на конце ВЛ, включа- емым пер- вым)	Дополни- тельная за- держка на пуск ОКПД или ОВУВ, с	t2		-	0,1	-	0,1
		Выдержка от момента срабатыва- ния ОКПД или ОВУВ, с	t3		0,15 или 0,05	0,15	0,15 или 0,05	0,05

Параметр Величины	Расчетное условие	Наименова- ние	Обозначение	Расчетная формула	В сторону ПС Буйская		В сторону ПГРЭС	
					Числовое зна- чение расчет- ной формулы	Величина	Числовое значение расчетной формулы	Величина
		Выдержка времени на срабатыва- ние ОКПД или ОВУВ, с	t4	Величина выдержки времени набирается автомати- чески, кон- тролируя погасание дуги	0,5÷3,0	0,5	0,5÷3,0	0,5
		Вероятная пауза ОАПВ- АП	T АП	T АП=tΣ=t1+t 2+t3+t4 (ориенти- ровочно)	0,1+0,1+0,15+0 ,5	0,85	0,1+0,1+0,05+0 ,50	0,75
Вывод: 1. Выбранные уставки входят в предлагаемый диапазон								

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе проведён анализ существующей релейной защиты и автоматики 500кВ, выполненной на электромеханической базе. В связи с длительным сроком эксплуатации, моральным и физическим старением оборудования, а также несоответствием современным нормам и условиям эксплуатации, на ПС «Калино» требуется проведение полной реконструкции релейной защиты.

В соответствии с заданием на проектирование были рассмотрены основные технические решения по замене устаревших защит 500/220 кВ на современное микропроцессорное оборудование. При этом действующие нормативные документы (в частности, приказ Минэнерго России от 30 июня 2003 г. № 288 «Рекомендации по технологическому проектированию подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ», СО 153-34.20.187-2003, п. 9.4) рекомендуют при проектировании применять устройства РЗА отечественного производства, допуская применение иностранного оборудования только при наличии технико-экономического обоснования.

С учётом политики импортозамещения, а также прекращения поставок и технической поддержки со стороны западных производителей (Siemens, ABB, General Electric, ALSTOM), в качестве базового оборудования для реконструкции выбраны микропроцессорные устройства отечественной фирмы ООО НПП «ЭКРА». Данное оборудование полностью соответствует требованиям ПАО «Россети», имеет необходимые аттестации и широко применяется на объектах 110–750 кВ.

Выбранные устройства обладают высоким быстродействием, гибкими характеристиками срабатывания (включая многоугольную характеристику дистанционных органов), широким диапазоном выбора уставок (токовых, временных, сопротивлений), наличием нескольких групп уставок с возможностью оперативного переключения, а также встроенными функциями непрерывной диагностики и регистрации аварийных событий.

Всё это позволяет выполнить основные задачи реконструкции релейной защиты:

- увеличение быстродействия;
- улучшение надёжности и работоспособности;
- повышение чувствительности (в том числе для обеспечения дальнего резервирования);
- повышение селективности защит;
- отсутствие различных отказов;
- минимизация технического обслуживания;
- снижение ежегодных издержек и ущерба при замене оборудования, выработавшего свой срок.

Все перечисленные улучшения релейной защиты позволят избежать серьёзных повреждений оборудования и существенно снизить величину ущерба от перерывов в электроснабжении потребителей.

Список использованных источников

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. — М. : Издательство НЦ ЭНАС, 2024. — Раздел 3. Защита и автоматика. — Глава 3.2. Релейная защита .
2. ГОСТ Р 58669-2019. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях. — М. : Стандартиформ, 2019 .
3. СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам релейной защиты и автоматики / ПАО «ФСК ЕЭС». — М., 2017 (с изменениями от 11.12.2019) .
4. Чернобровов, Н. В. Релейная защита : учебник для техникумов / Н. В. Чернобровов. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 2018. — 672 с.
5. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. — М. : Энергоатомиздат, 2017. — 536 с.
6. Овчаренко, Н. И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем : учебник / Н. И. Овчаренко. — М. : Издательский дом МЭИ, 2016. — 512 с.
7. Голубев, М. Л. Расчет токов короткого замыкания и выбор оборудования : учеб. пособие / М. Л. Голубев. — М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — 84 с.
8. ООО НПП «ЭКРА». Терминалы релейной защиты и автоматики серии БЭ2502 А0103 и БЭ2502 А1102 : руководство по эксплуатации. — Чебоксары, 2023.
9. ООО НПП «ЭКРА». Программное обеспечение EKRASMS : руководство пользователя. — Чебоксары, 2023.
10. Исследовательский центр «Бреслер». Рекомендации по расчету уставок для линий 500 кВ (Электронный ресурс), 2018