

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Цифровые технологии в электроэнергетике

(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Реконструкция ПС 220 кВ в части замены микроэлектронных устройств РЗА на микропроцессорные

Обучающийся

Д.Л. Корняков

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, А.Н. Черненко

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

А.В. Прошина

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

В бакалаврской работе рассмотрены вопросы реконструкции подстанции 220 кВ Северная в части замены микроэлектронных устаревших устройств РЗА на микропроцессорные. Дана краткая характеристика подстанции, установленного на ней оборудования и положения подстанции в энергосистеме.

Рассмотрено текущее состояние реализации защит обходного выключателя 220 кВ, защиты и автоматики секционного выключателя 220 кВ, защиты и автоматики воздушных линий 110 кВ Северная - Городская и Северная – Кожва и выбраны для установки новые шкафы с МП терминалами. Рассмотрены вопросы организации цепей переменного напряжения шинных трансформаторов напряжения 220 и 110 кВ. Определён перечень сигналов регистратора аварийных событий. Определен перечень производителей шкафов РЗА, продукция которых может быть использована при реализации технических решений данной работы. Выполнена проверка пригодности трансформаторов тока и даны рекомендации по их замене. Выполнены расчёты параметров срабатывания ступенчатых защит воздушной линии 110 кВ Северная – Городская.

Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки объёмом 63 страницы, содержит 7 таблиц и 10 рисунков. Список используемых источников содержит 23 наименования, в том числе 5 на английском языке. Графическая часть работы состоит из шести листов, выполненных на формате А1.

Annotation

The bachelor's thesis examines the issues of reconstruction of the 220 kV Severnaya substation in terms of replacing obsolete microelectronic relay protection and automation devices with microprocessor ones. A brief description of the substation, the equipment installed on it, and the position of the substation in the power system is given. The current state of implementation of the 220 kV bypass switch protection, 220 kV sectional switch protection and automation, 110 kV Severnaya - Gorodskaya and Severnaya - Kozhva overhead lines protection and automation is considered, and new cabinets with MP terminals are selected for installation. The issues of organizing AC circuits of 220 and 110 kV busbar voltage transformers are considered. A list of emergency event recorder signals is determined. A list of relay protection and automation cabinet manufacturers is determined, whose products can be used in the implementation of technical solutions in this work. The suitability of current transformers is checked and recommendations for their replacement are given. Calculations of the tripping parameters of the step protections of the 110 kV Severnaya-Gorodskaya overhead line have been performed. The bachelor's thesis consists of an explanatory note of 63 pages, contains 7 tables and 10 figures. The list of sources used contains 23 names, including 5 in English. The graphic part of the work consists of six sheets, made in A1 format.

Содержание

Введение.....	6
Перечень сокращений и обозначений.....	9
1 Релейная защита и автоматика.....	12
1.1 Защита и автоматика ОМВ 220.....	12
1.2 Защита и автоматика СМВ 220.....	14
1.3 Защита и автоматика ВЛ 110 кВ Северная – Городская с отпайкой на ПС ЖБИ (ВЛ-120).....	18
1.4 Защита и автоматика ВЛ 110 кВ Северная – Кожва с отпайками (ВЛ- 121).....	21
1.5 Организация цепей переменного напряжения шинных ТН 220 кВ.....	25
1.6 Организация цепей переменного напряжения шинных ТН 110 кВ.....	25
1.7 Питание оперативным током оборудования РЗА.....	26
1.8 Регистрация аварийных событий	26
1.9 Размещение шкафов РЗА.....	27
1.10 Управление и автоматизация подстанции.....	30
1.11 Сигнализация.....	31
2 Анализ реализации функций РЗА на оборудовании разных производителей	33
3 Проверка пригодности трансформаторов тока	34
3.1 Проверка ТТ на 10 % погрешность	34
3.2 Проверка ТТ на предельно допустимую погрешность	36
3.3 Проверка по условию отсутствия опасных перенапряжений во вторичных цепях ТТ	38
3.4 Определение времени до насыщения трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий.....	39
4 Расчет параметров срабатывания ступенчатых защит ВЛ 110 кВ Северная – Городская с отпайкой на ПС ЖБИ (ВЛ-120).....	48
4.1 Дистанционная защита (ДЗ).....	48

4.1.1 Первая ступень ДЗ	48
4.1.2 Вторая ступень ДЗ	49
4.1.3 Третья ступень ДЗ.....	51
4.1.4 Оценка дальнего резервирования	52
4.1.5 Углы наклона характеристик срабатывания реле сопротивления	53
4.2 Токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП)	54
4.3 Токовая отсечка (ТО).....	54
4.4 Аварийная МТЗ	54
Заключение	58
Список используемой литературы	61

Введение

ПС 220 кВ Северная является действующей электрической подстанцией, расположенной в Республике Коми. Ее положение в энергосистеме ОЭС Северо-Запада показано на рисунке 1.

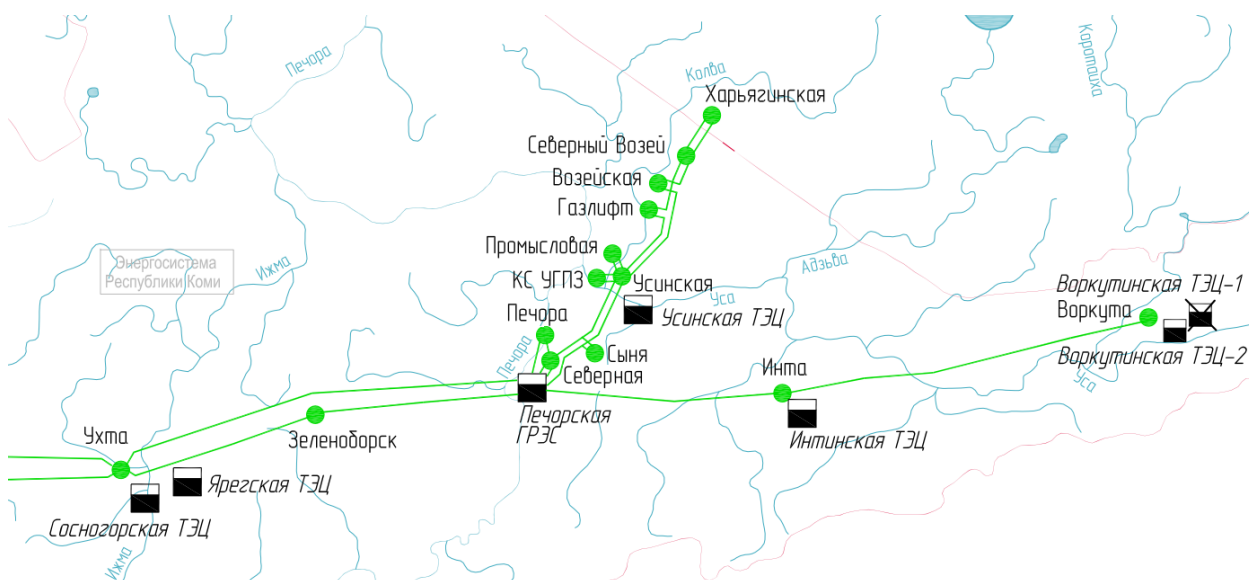


Рисунок 1 – Положение ПС Северная в энергосистеме ОЭС Северо-Запада

На подстанции установлены два силовых автотрансформатора типа АТДЦТН-63000/220/110/10 и два силовых трансформатора типа ТДТН-16000/110/35/10.

«Существующее ОРУ 220 кВ выполнено по схеме №220-12 «Одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин». К ОРУ 220 кВ подключены четыре ВЛ» [16]:

- ВЛ 220 кВ Печорская ГРЭС – Северная №1;
- ВЛ 220 кВ Печорская ГРЭС – Северная №2;
- ВЛ 220 кВ Северная – Усинская с отпайкой на ПС Сыня;
- ВЛ 220 кВ Северная – Печора.

В ячейках установлены:

- выключатели: У-220-1000/2000-25;

- разъединители: РНДЗ-1-220/1000ХЛ1, РНДЗ-2-220/1000ХЛ1;
- трансформаторы напряжения: НКФ-220-58У1;
- ограничители перенапряжений: ОПН-220/154-10(3) II УХЛ1.

Ошиновка ОРУ 220 кВ выполнена проводом АСО-400.

«Существующее ОРУ 110 кВ выполнено по схеме №110-13Н «Две рабочие и обходная система шин». К ОРУ 110 кВ подключены три ВЛ:

- ВЛ 110 кВ Северная – Западная с отпайкой на ПС ЖБИ (ВЛ-123);
- ВЛ 110 кВ Северная – Городская с отпайкой на ПС ЖБИ (ВЛ-120);
- ВЛ 110 кВ Северная – Кожва с отпайками (ВЛ-121)» [16].

В ячейках 110 кВ установлены:

- выключатели: МКП-110М-630-20;
- разъединители: РНДЗ-1-110/1000ХЛ1, РНДЗ-2-110/1000ХЛ1;
- трансформаторы напряжения: НКФ-110-58У1;
- ограничители перенапряжений: ОПН-110 ПНУХЛ1 [1].

Ошиновка ОРУ 110 кВ выполнена проводом АСО-400.

«Существующее ОРУ 35 кВ выполнено по схеме №35-9 «Одна рабочая секционированная выключателем система шин», распределительное устройство 10 кВ – ячейками типа К-12 в ЗРУ» [16].

Для электроснабжения потребителей собственных нужд на ПС установлены два трансформатора собственных нужд (ТСН) ТМ 630/10-0,4.

Оперативный ток постоянный – 220 В от аккумуляторной батареи. Для питания потребителей постоянного тока на ПС установлено аккумуляторная батарея типа СК-14, а также 2 устройства заряда-подзаряда типа ВАЗП 380/260-40/80-УХЛ4-1.

В настоящее время проводятся работы по замене масляных выключателей, отделителей и короткозамыкателей 110-220 кВ на следующих подстанциях:

- ПС 220 кВ Северная;
- ПС 220 кВ Северный Возей;
- ПС 220 кВ Сыктывкар;

- ПС 220 кВ Коноша;
- РП 220 кВ Первомайский;
- ПС 220 кВ Савино;
- ПС 220 кВ Возейская;
- ПС 220 кВ Зеленоборск.

В рамках указанных работ предусматривается замена силовых выключателей и трансформаторов тока присоединений ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ ПС Северная на выключатели с элегазовой изоляцией со встроенными трансформаторами тока, а также установка новых шкафов АУВ, УРОВ, ТАПВ. Выполнение рассматриваемых в данной работе технических решений (замена микроэлектронных устройств РЗА на микропроцессорные) будет возможно только после реализации вышеуказанных работ по замене выключателей.

Целью бакалаврской работы является обеспечение надежного функционирования ПС путем замены существующих морально устаревших устройств РЗА на новые микропроцессорные устройства типа ШЭТ.

Перечень сокращений и обозначений

«GOOSE – generic object oriented substation event (широковещательное объектно-ориентированное сообщение о событии на подстанции);

MMS – manufacturing message specification (спецификация производственного сообщения);

SV - sampled values (мгновенные значения);

ABP - автоматическое включение резерва;

АПВ - автоматическое повторное включение;

АППож - автоматика пуска пожаротушения;

АПТ - автоматика пожаротушения;

АРКТ - автоматика регулирования коэффициента трансформации;

АСУ ТП - автоматизированная система управления технологическим процессом;

АТ - автотрансформатор;

АУ - автоматическое ускорение;

АУВ - автоматика управления выключателем;

АЦП - аналогово-цифровой преобразователь;

БИ - блок испытательный;

БК - блокировка при качаниях;

БНН - блокировка при неисправности цепей напряжения;

БП - блок питания;

В - выключатель;

ВВ - высоковольтный ввод;

ВН - высшее напряжение;

ГЗ - газовая защита;

ДЗ - дистанционная защита;

ДЗфз - дистанционная защита от повреждений на землю;

ДЗфф - дистанционная защита от междуфазных повреждений» [4];

ДЗО - дифференциальная защита ошиновки;

ДЗТ - дифференциальная защита (авто)трансформатора;
ДЗШ - дифференциальная защита шин;
«ЗДЗ - защита от дуговых замыканий;
ЗНР - защита от неполнофазного режима;
ЗНФ - защита от непереключения фаз;
ЗП - защита от перегрузки;
ЗПО - защита от потери охлаждения;
ИТС - информационно-технологическая система;
ИЧМ - интерфейс человек-машина;
ИЭУ - интеллектуальное электронное устройство;
КА - коммутационный аппарат;
КИ - контроль изоляции;
КИВ - контроль изоляции вводов;
КНН - контроль наличия напряжения;
(К)ННЭ - (контроль) наличия(-е) напряжения на энергообъекте;
КННШ - контроль наличия напряжения на шинах;
КОН - контроль отсутствия напряжения;
(К)ОНЭ - (контроль) отсутствия(-е) напряжения на энергообъекте;
КП - контроллер присоединения;
КРУ - комплектное распределительное устройство;
КС - контроль синхронизма;
КСЗ - комплект ступенчатых защит;
КСН - контроль синхронизма и напряжения;
КЦТ - контроль цепей тока;
ЛРТ - линейный регулировочный трансформатор;
ЛЭП - линия электропередачи;
М/Д - местное/дистанционное;
МО - маслонаполненное оборудование;
МП - микропроцессорный;
МТЗ - максимальная токовая защита;

МТЗ/У - максимальная токовая защита с пуском по напряжению;
НП - нулевая последовательность;
ОАПВ - однофазное автоматическое повторное включение;
ОВ - обходной выключатель;
ОО - общая обмотка;
ОП - обратная последовательность;
ОРУ - открытое распределительное устройство;
ОС - оперативное состояние;
ОСШ - обходная система шин;
ОУ - оперативное ускорение;
ПС1 - предупредительная сигнализация первого уровня;
ПС2 - предупредительная сигнализация второго уровня;
РАС - регистрация аварийных событий;
РДУ - региональное диспетчерское управление;
РЗА - релейная защита и автоматика;
РЗН - резистор заземления нейтрали;
РПР - реле повторители положения разъединителей;
РТПО - токовое реле (орган) пуска охлаждения;
РУ - распределительное устройство;
РЩ - релейный щит;
СЗ - ступенчатые защиты;
Т(Н)ЗНП - токовая (направленная) защита нулевой последовательности;
УРОВ - устройство резервирования отказа выключателя;
ФК - функциональная клавиша;
ШАОТ - шкаф автоматического управления охлаждением трансформатора;
ШСВ - шиносоединительный выключатель;
ШЭТ - шкаф электротехнический типовой» [4].

1 Релейная защита и автоматика

1.1 Защита и автоматика ОМВ 220

Оборудование релейной защиты и автоматики управления обходного выключателя 220 кВ (ОМВ 220) выполнено на микроэлектронной и электромеханической элементной базе. Оборудование расположено в релейном зале ОПУ, состоит из:

- ступенчатые защиты (панель Р33);
- автоматика ОМВ 220 (панель Р32);
- РПР ОМВ 220 (панель Р36).

Кроме этого, согласно решениям, принятым в разделе документации «ПС 220 кВ Северная. Автоматика управления выключателями 220 кВ. Полные схемы» в рамках работ «Замена масляных выключателей, отделителей и короткозамыкателей 110-220 кВ на ПС 220 кВ Северная, ПС 220 кВ Северный Возей, ПС 220 кВ Сыктывкар, ПС 220 кВ Коноша, РП 220 кВ Первомайский, ПС 220 кВ Савино, ПС 220 кВ Возейская, ПС 220 кВ Зеленоборск», предусмотрена установка нового шкафа АУВ, УРОВ, ТАПВ ОМВ 220, выполненного на микропроцессорной элементной базе. Новый шкаф устанавливается на место существующей панели УРОВ-220 (панель Р34), которая полностью выводится из работы. При этом существующая панель автоматики ОМВ 220 (панель Р32) остается в работе, часть оборудования панели выводится из работы. Также, в рамках вышеуказанных работ предусматривается замена силового выключателя и трансформаторов тока.

Ступенчатые защиты ОМВ 220 выполнены на базе шкафа ШДЭ2801 и используются в качестве резервной защиты при замене ОМВ 220 выключателей следующих присоединений:

- ВЛ 220 кВ Северная – Печора;
- ВЛ 220 кВ Северная – Усинская с отпайкой на ПС Сыня;

- ВЛ 220 кВ Печорская ГРЭС – Северная №1;
- ВЛ 220 кВ Печорская ГРЭС – Северная №2;
- МВ-220 АТ-1;
- МВ-220 АТ-2.

При этом ДФЗ вышеуказанных ВЛ 220 кВ по цепям тока, напряжения и отключения переводятся на ОМВ 220. Также ступенчатые защиты ОМВ 220 используются при опробовании обходной системы шин 220 кВ.

На основании выводов предпроектного обследования, в данной работе предусматривается замена существующей панели ступенчатых защит ОМВ 220 (панель Р33) типа ШДЭ2801 на шкаф с МП терминалом из перечня типовых шкафов ПАО «ФСК ЕЭС». К установке предусматривается шкаф типа ШЭТ 251.02-0 (КСЗ, УРОВ, АУВ). Установка нового шкафа предполагается в релейном зале ОПУ на место, освободившееся после демонтажа существующей панели Р33.

Шкаф защит обходного выключателя 110-220 кВ (КСЗ, УРОВ, АУВ) типа ШЭТ 251.02- 0 для архитектуры I типа содержит следующие функции:

- «дистанционная защита линии (ДЗ);
- токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП);
- максимальная токовая защита (МТЗ);
- междуфазная токовая отсечка (МФТО);
- логика автоматического и оперативного ускорения ДЗ и ТНЗНП (АУ и ОУ);
- блокировка ступенчатых защит при качаниях (БК);
- блокировка при неисправности цепей переменного напряжения (БНН);
- определение места повреждения (ОМП);
- регистрация аварийных событий (РАС);
- устройство резервирования отказа выключателя (УРОВ);
- автоматическое повторное включение (АПВ);

- автоматика управления выключателем (АУВ)» [2].

Структурно-функциональная схема интеллектуального электронного устройства (ИЭУ) шкафа ШЭТ 251.02-0 приведена на рисунке 2.

1.2 Защита и автоматика СМВ 220

Оборудование релейной защиты и автоматики управления секционного выключателя 220 кВ (СМВ 220) выполнено на микроэлектронной и электромеханической элементной базе. Оборудование расположено в релейном зале ОПУ, состоит из [11]:

- ступенчатые защиты (панель Р39);
- автоматика СМВ 220 (панель Р35).

Кроме этого, согласно решениям, принятым в разделе документации «ПС 220 кВ Северная. Автоматика управления выключателями 220 кВ. Полные схемы» в рамках работ «Замена масляных выключателей, отделителей и короткозамыкателей 110-220 кВ на ПС 220 кВ Северная, ПС 220 кВ Северный Возей, ПС 220 кВ Сыктывкар, ПС 220 кВ Коноша, РП 220 кВ Первомайский, ПС 220 кВ Савино, ПС 220 кВ Возейская, ПС 220 кВ Зеленоборск», предусмотрена установка нового шкафа Р77 АУВ, УРОВ, ТАПВ СМВ 220, выполненного на микропроцессорной элементной базе. При этом существующая панель автоматики СМВ 220 (панель Р35) полностью выводится из работы.

Также, в рамках вышеуказанных работ предусматривается замена силового выключателя и трансформаторов тока.

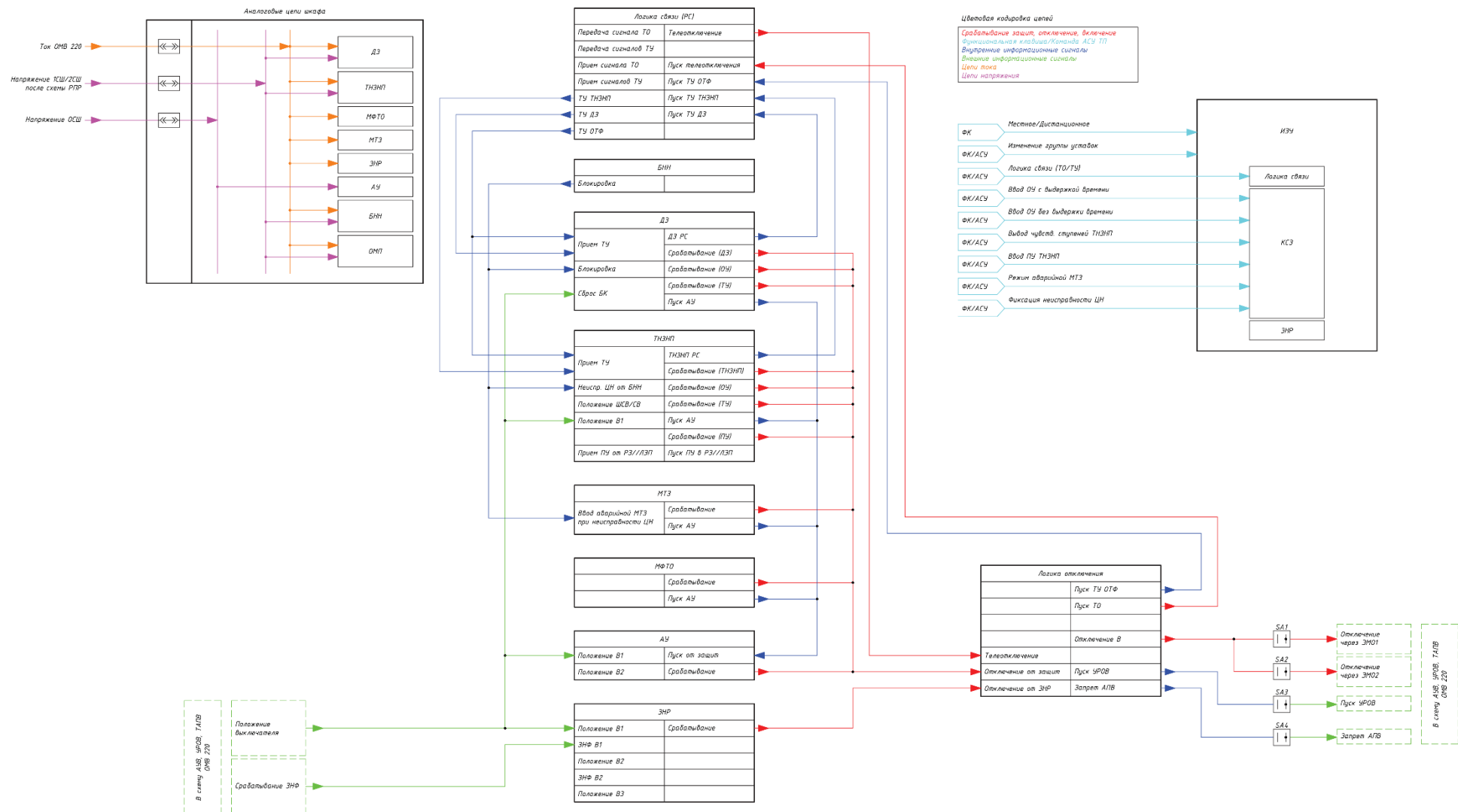


Рисунок 2 - Структурно-функциональная схема интеллектуального электронного устройства (ИЭУ) шкафа ШЭТ 251.02-0

На основании выводов предпроектного обследования, в настоящей работе предусматривается замена существующей панели ступенчатых защит СМВ 220 (панель Р39) типа ШДЭ2801 на шкаф с МП терминалом из перечня типовых шкафов ПАО «ФСК ЕЭС» [15]. К установке предусматривается шкаф типа ШЭТ 451.01-0 (КСЗ, УРОВ, АУВ). Установка нового шкафа предполагается в релейном зале ОПУ на место, освободившееся после демонтажа существующей панели Р39 (размещение вновь устанавливаемого шкафа будет уточнено на стадии рабочего проектирования после выбора производителя шкафа РЗА).

Шкаф защит шиносоединительного/секционного выключателя 110-220 кВ (КСЗ, УРОВ, АУВ) типа ШЭТ 451.01-0 для архитектуры I типа содержит следующие функции:

- «дистанционная защита линии (ДЗ);
- токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП);
- максимальная токовая защита (МТЗ);
- междуфазная токовая отсечка (МФТО);
- логика автоматического и оперативного ускорения ДЗ и ТНЗНП (АУ и ОУ);
- блокировка ступенчатых защит при качаниях (БК);
- блокировка при неисправности цепей переменного напряжения (БНН);
- защита от неполнофазного режима (ЗНР);
- регистрация аварийных событий (РАС);
- устройство резервирования отказа выключателя (УРОВ);
- автоматическое повторное включение (АПВ);
- автоматика опережающего деления сети (АОДС);
- автоматика управления выключателем (АУВ)» [14].

Структурно-функциональная схема интеллектуального электронного устройства (ИЭУ) шкафа ШЭТ 451.01-0 приведена на рисунке 3.

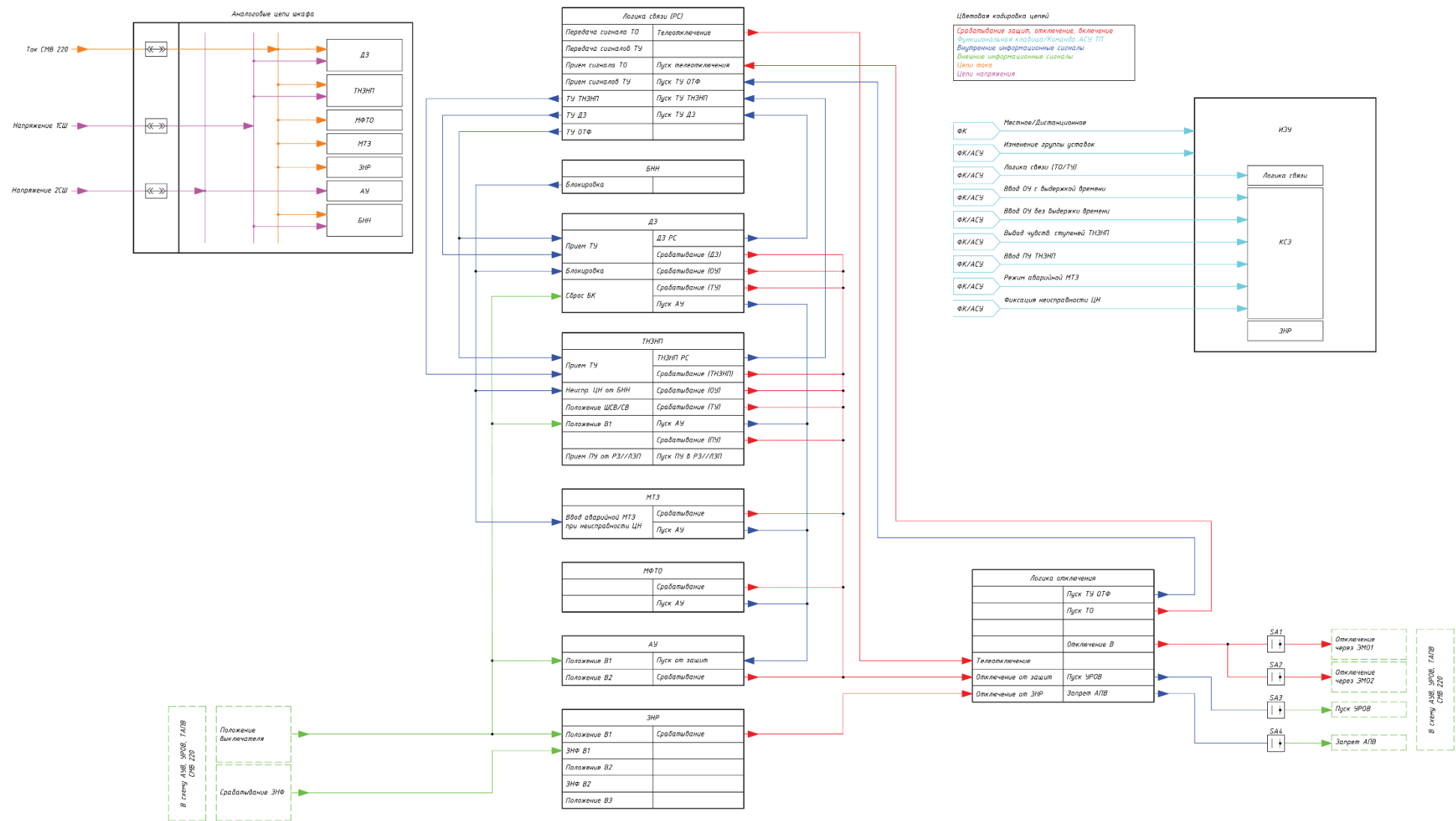


Рисунок 3 - Структурно-функциональная схема интеллектуального электронного устройства (ИЭУ) шкафа ШЭТ 451.01-0

1.3 Защита и автоматика ВЛ 110 кВ Северная – Городская с отпайкой на ПС ЖБИ (ВЛ-120)

Оборудование релейной защиты и автоматики управления выключателем ВЛ 110 кВ Северная – Городская с отпайкой на ПС ЖБИ (ВЛ-120) выполнено на микроэлектронной и электромеханической элементной базе. Оборудование расположено в релейном зале ОПУ, состоит из:

- «дифференциально-фазная защита (панель Р72);
- ступенчатые защиты (панель Р58);
- автоматика В-110 (панель Р59)» [18].

Кроме этого, согласно решениям, принятым в разделе документации «ПС 220 кВ Северная. Автоматика управления выключателями 220 кВ. Полные схемы» в рамках работ «Замена масляных выключателей, отделителей и короткозамыкателей 110-220 кВ на ПС 220 кВ Северная, ПС 220 кВ Северный Возей, ПС 220 кВ Сыктывкар, ПС 220 кВ Коноша, РП 220 кВ Первомайский, ПС 220 кВ Савино, ПС 220 кВ Возейская, ПС 220 кВ Зеленоборск», предусмотрена установка нового шкафа АУВ, УРОВ, ТАПВ МВ-110 ВЛ-120, выполненного на микропроцессорной элементной базе. Новый шкаф устанавливается на место резервной панели Р71. При этом существующая панель автоматики МВ-110 (панель Р59) полностью выводится из работы. Также, в рамках вышеуказанных работ предусматривается замена силового выключателя и трансформаторов тока.

Дифференциально-фазная защита (ДФЗ) типа ДФЗ-201М используется в качестве основной и позволяет отключать КЗ с обоих концов без выдержки времени при повреждении на всей длине линии. Защита состоит из двух полуккомплектов, которые размещены на обоих концах ВЛ. Каждый полуккомплект содержит релейную часть и элементы ВЧ тракта, посредством которого осуществляется связь между комплектами. При замене выключателя ВЛ-120 на ОМВ-110 ДФЗ по цепям тока, напряжения и отключения переводится на ОМВ-110.

«Ступенчатые защиты выполнены на базе шкафа ШДЭ2801 и используются в качестве резервной защиты для ВЛ-120. При замене выключателя ВЛ-120 на ОМВ-110 ступенчатые защиты ВЛ-120 выводятся из работы» [19]. В качестве резервной защиты для ВЛ-120 используются ступенчатые защиты ОМВ-110.

На основании выводов предпроектного обследования, настоящей работой предусматривается замена существующей панели ступенчатых защит ВЛ 110 кВ Северная – Городская с отпайкой на ПС ЖБИ (панель Р58) типа ШДЭ2801 на шкаф с МП терминалом из перечня типовых шкафов ПАО «ФСК ЕЭС». К установке предусматривается шкаф типа ШЭТ 220.08-0 (КСЗ РС). Установка нового шкафа предполагается в релейном зале ОПУ на место, освободившееся после демонтажа существующей панели Р58.

Шкаф ступенчатых защит ЛЭП 110-220 кВ типа ШЭТ 220.08-0 (КСЗ РС) для архитектуры I типа содержит следующие функции:

- «дистанционная защита линии (ДЗ);
- токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП);
- максимальная токовая защита (МТЗ);
- междупазная токовая отсечка (МФТО);
- логика автоматического и оперативного ускорения ДЗ и ТНЗНП (АУ и ОУ);
- блокировка ступенчатых защит при качаниях (БК);
- логика связи (ЛС);
- блокировка при неисправности цепей переменного напряжения (БНН);
- защита от неполнофазного режима (ЗНР);
- определение места повреждения (ОМП);
- регистрация аварийных событий (РАС)» [12].

Структурно-функциональная схема интеллектуального электронного устройства (ИЭУ) шкафа ШЭТ 220.08-0 приведена на рисунке 4.

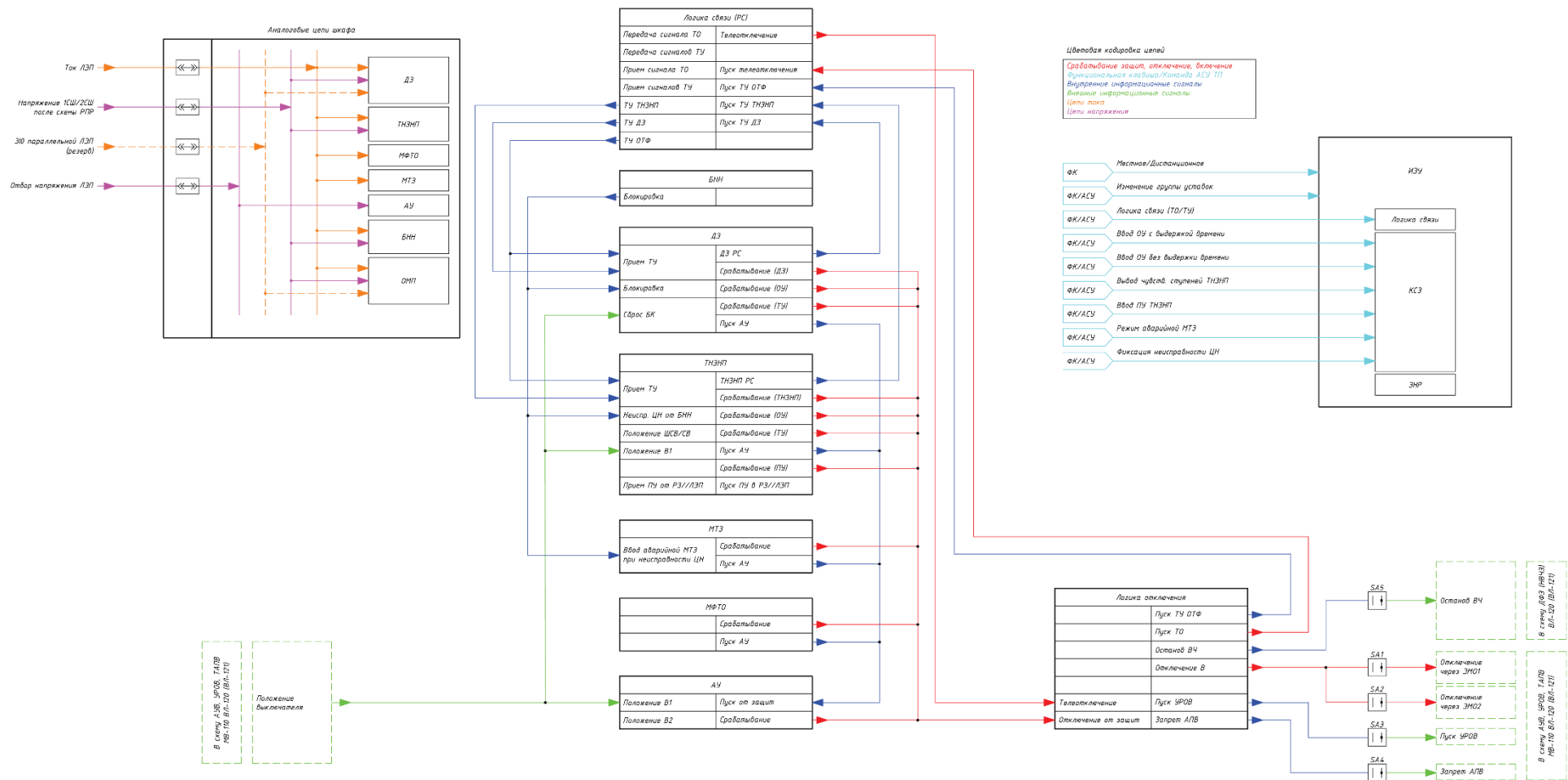


Рисунок 4 - Структурно-функциональная схема интеллектуального электронного устройства шкафа ШЭТ 220.08-0

1.4 Защита и автоматика ВЛ 110 кВ Северная – Кожва с отпайками (ВЛ-121)

Оборудование релейной защиты и автоматики управления выключателем ВЛ 110 кВ Северная – Кожва с отпайками выполнено на микроэлектронной и электромеханической элементной базе. Оборудование расположено в релейном зале ОПУ, состоит из:

- направленная ВЧ защита (панель Р61);
- ступенчатые защиты (панель Р60);
- автоматика В-110 (панель Р59).

Кроме этого, согласно решениям, принятым в разделе документации «ПС 220 кВ Северная. Автоматика управления выключателями 220 кВ. Полные схемы» в рамках работ «Замена масляных выключателей, отделителей и короткозамыкателей 110-220 кВ на ПС 220 кВ Северная, ПС 220 кВ Северный Возей, ПС 220 кВ Сыктывкар, ПС 220 кВ Коноша, РП 220 кВ Первомайский, ПС 220 кВ Савино, ПС 220 кВ Возейская, ПС 220 кВ Зеленоборск», предусмотрена установка нового шкафа АУВ, УРОВ, ТАПВ МВ-110 ВЛ-121, выполненного на микропроцессорной элементной базе. Новый шкаф устанавливается на место существующей панели автоматики МВ-110 ВЛ-120, МВ-110 ВЛ-121 (панель Р59), которая полностью выводится из работы.

Направленная ВЧ защита (ВЧЗ) типа ПДЭ2802 используется в качестве основной и позволяет отключать КЗ с обоих концов без выдержки времени при повреждении на всей длине линии. Защита состоит из двух полукомплектов, которые размещены на обоих концах ВЛ. Каждый полукомплект содержит релейную часть и элементы ВЧ тракта, посредством которого осуществляется связь между комплектами. ВЧ тракт образован по фазному проводу фазы «А» ВЛ-121. ВЧ приемопередатчик типа АВЗК-80, установленный в панели Р61, выполняет функции приема и передачи ВЧ сигналов между комплектами ВЧ

защиты. При замене выключателя ВЛ-121 на ОМВ-110 ВЧЗ по цепям тока, напряжения и отключения переводится на ОМВ-110.

«Ступенчатые защиты выполнены на базе шкафа ШДЭ2801 и используются в качестве резервной защиты для ВЛ-121. При замене выключателя ВЛ-121 на ОМВ-110 ступенчатые защиты ВЛ-121 выводятся из работы» [21]. В качестве резервной защиты для ВЛ-121 используются ступенчатые защиты ОМВ-110.

На основании выводов предпроектного обследования, настоящей работой предусматривается замена существующей панели ступенчатых защит ВЛ 110 кВ Северная – Кожва с отпайками типа ШДЭ2801 (панель Р60) и панели направленной ВЧ защиты типа ПДЭ2802 (панель Р61) на шкафы с МП терминалом из перечня типовых шкафов ПАО «ФСК ЕЭС». К установке предварительно предусматривается шкаф типа ШЭТ 220.08-0 вместо ШДЭ2801 и шкаф типа ШЭТ 220.04-0 с ВЧ ПП вместо ПДЭ2802. В составе шкафа типа ШЭТ 220.04-0 с ВЧ ПП предусмотрен ВЧ приемопередатчик, совместимый с АВЗК-80, например, ПВЗУ-Е или аналогичный.

Установка новых шкафов предполагается в релейном зале ОПУ на места, освободившееся после демонтажа существующих панелей Р60, Р61.

Шкаф ступенчатых защит ЛЭП 110-220 кВ типа ШЭТ 220.08-0 (КСЗ РС) для архитектуры I типа содержит следующие функции:

- «дистанционная защита линии (ДЗ);
- токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП);
- максимальная токовая защита (МТЗ);
- междуфазная токовая отсечка (МФТО);
- логика автоматического и оперативного ускорения ДЗ и ТНЗНП (АУ и ОУ);
- блокировка ступенчатых защит при качаниях (БК);
- логика связи (ЛС);

- блокировка при неисправности цепей переменного напряжения (БНН);
- защита от неполнофазного режима (ЗНР);
- определение места повреждения (ОМП);
- регистрация аварийных событий (РАС)» [9].

Структурно-функциональная схема интеллектуального электронного устройства (ИЭУ) шкафа ШЭТ 220.08-0 приведена на рисунке 4.

Шкаф ступенчатых защит ЛЭП 110-220 кВ типа ШЭТ 220.04-0 с ВЧ ПП (НВЧЗ + СЗ) для архитектуры I типа содержит следующие функции:

- «направленная высокочастотная защита (НВЧЗ);
- дистанционная защита линии (ДЗ);
- токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП);
- максимальная токовая защита (МТЗ);
- междуфазная токовая отсечка (МФТО);
- логика автоматического и оперативного ускорения ДЗ и ТНЗНП (АУ и ОУ);
- блокировка при неисправности цепей переменного напряжения (БНН);
- блокировка ступенчатых защит при качаниях (БК);
- логика связи (ЛС);
- защита от неполнофазного режима (ЗНР);
- определение места повреждения (ОМП);
- регистрация аварийных событий (РАС)» [9].

Структурно-функциональная схема интеллектуального электронного устройства (ИЭУ) шкафа ШЭТ 220.04-0 с ВЧ ПП приведена на рисунке 5.

1.5 Организация цепей переменного напряжения шинных ТН 220 кВ

Организация цепей напряжения шинных ТН 220 кВ выполнена на панели Р36 в помещении релейного зала ОПУ. На панели Р36 предусмотрены переключатели для ручного резервирования устройств РЗА по цепям ТН 220 кВ.

Ступенчатые защиты ОМВ 220 подключаются к цепям напряжения шинных ТН 220 кВ после цепей резервирования через схему РПР на панели Р36 в помещении релейного зала ОПУ.

Существующая схема организации цепей напряжения шинных ТН 220 кВ, а также схема организации цепей напряжения защит и автоматики ОМВ 220 не требует изменений.

В связи с тем, что нагрузка по цепям напряжения от вновь устанавливаемых шкафов защит значительно ниже нагрузки заменяемых панелей, проверка цепей напряжения не требуется.

1.6 Организация цепей переменного напряжения шинных ТН 110 кВ

Организация цепей напряжения шинных ТН 110 кВ выполнена на панели Р52 в помещении релейного зала ОПУ. На панели Р52 предусмотрены переключатели для ручного резервирования устройств РЗА по цепям ТН 220 кВ. Устройства защиты, автоматики, приборы учета и измерений присоединений 110 кВ подключаются к цепям напряжения ТН 110 кВ после цепей резервирования через схему РПР соответствующих присоединений 110 кВ.

Существующая схема организации цепей напряжения шинных ТН 110 кВ, схемы РПР присоединений 110 кВ не требует изменений.

В связи с тем, что нагрузка по цепям напряжения от вновь устанавливаемых шкафов защит ВЛ-120, ВЛ-121 значительно ниже нагрузки заменяемых панелей, проверка цепей напряжения не требуется.

1.7 Питание оперативным током оборудования РЗА

«Вновь устанавливаемые шкафы защит питаются от шин управления через автоматические выключатели, размещенные на панели У15 главного щита управления ОПУ» [3].

Номинальные характеристики автоматических выключателей и необходимость их замены уточняются после определения производителя устройств РЗА.

1.8 Регистрация аварийных событий

В релейном зале ОПУ на панели Р25, Р26, Р27 установлен регистратор аварийных событий типа ПАРМА, состоящий из блоков преобразователей аналоговых и дискретных сигналов и блоков регистрации. К блокам преобразователей подключены цепи тока присоединений 220 кВ и 110 кВ. Подключение дискретных сигналов от вновь устанавливаемых шкафов защит предусматривается к резервным входам существующего регистратора. Перечень дискретных сигналов, подлежащих регистрации, приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Сигналы РАС

Присоединение	Тип шкафа	Сигнал
ОМВ 220	ШЭТ 251.02-0	Срабатывание ДЗ
		Срабатывание ТЗНП
		Срабатывание ТО
		Пуск УРОВ
		Неисправность
СМВ 220	ШЭТ 451.01-0	Срабатывание ДЗ
		Срабатывание ТЗНП
		Срабатывание ТО
		Пуск УРОВ
		Неисправность

Продолжение таблицы 1

Присоединение	Тип шкафа	Сигнал
ВЛ 110 кВ Северная – Городская с отпайкой на ПС ЖБИ (ВЛ-120)	ШЭТ 220.08-0	Срабатывание ДЗ
		Срабатывание ТЗНП
		Срабатывание ТО
		Пуск УРОВ
		Неисправность
ВЛ 110 кВ Северная – Кожва с отпайками (ВЛ- 121)	ШЭТ 220.04-0 с ВЧ ПП	Срабатывание НВЧЗ
		Срабатывание ДЗ
		Срабатывание ТЗНП
		Срабатывание ТО
		Пуск УРОВ
		Неисправность
	ШЭТ 220.08-0	Срабатывание ДЗ
		Срабатывание ТЗНП
		Срабатывание ТО
		Пуск УРОВ
		Неисправность
Всего сигналов	-	26

Положение переключающих устройств в цепях отключения и пуска УРОВ, а также испытательных блоков в измерительных цепях тока и напряжения фиксируется в МП РЗА. Регистрация таких сигналов в автономном РАС не требуется.

1.9 Размещение шкафов РЗА

Вновь устанавливаемые шкафы защит располагаются в помещении релейного зала ОПУ взамен существующих панелей, подлежащих демонтажу.

Габаритные размеры шкафов приняты: 800×600×2200 (ширина × глубина × высота, включая цоколь 200 мм). Шкаф конструктивно выполнен двухстороннего обслуживания, передняя дверь обзорная из прозрачного материала (стекло).

Схемы расположения шкафов и панелей НКУ в помещении релейного зала здания ОПУ приведены на рисунке 6.

В таблице 2 приведен перечень панелей и шкафов в зале здания ОПУ.

Таблица 2 - Перечень панелей и шкафов в зале здания ОПУ

Щит	Обозначение панели/шкафа	Наименование панели/шкафа
Главный щит управления (ГЩУ)	У6	Центральная сигнализация
	У7	ВЛ-248, АТ-2, ВЛ-244
	У8	ОМВ 220, СМВ 220, ШСВ-110, ОМВ-110
	У9	ВЛ-245, АТ-1, ВЛ-243
	У10	ВЛ-120, ВЛ-121, ВЛ-123
	У11	Т-3
	У12	СВ-35, СВ-10
	У13	Т-4
	У14	ВЛ-12, ВЛ-13, ЭМБ
	У15	Автоматы защит
	Р1	ВЛ 248 - ВЧТО ПРМ 1
	Р2	ВЛ 248 - ВЧТО ПРМ2, рез. инвертор
	Р3	ПА - ВЧТО ПРМ ВЛ 243, 244
	Р4	ПА - ВЧТО ПРМ ВЛ 245
Релейный зал (РЗ)	Р16	ВЛ 243 - Авт. В 220 кВ, МТЗ
	Р17	ВЛ 243, ВЛ 244 - ПНДЗ
	Р18	ВЛ 243 - Земл. защ.
	Р19	АУВ, УРОВ, ТАПВ W1E (ВЛ-243) / АУВ, УРОВ, ТАПВ W5E (ВЛ-245)
	Р20	ВЛ 243 - ДФЗ
	Р21	ВЛ 244 - Авт. В 220 кВ, МТЗ
	Р22	Регистр, аварийных процессов 1, 2 СШ 110 кВ
	Р23	ВЛ 244 - Земл. защ.
	Р24	ВЛ 244 - ДФЗ
	Р25	Регистр, аварийных процессов 1, 2 СШ 110 кВ
	Р26	Регистр, аварийных процессов 2с 220 кВ
	Р27	Регистр, аварийных процессов 1с 220 кВ
	Р28	ВЛ 245 - ДФЗ
	Р29	ВЛ 245 - Рез. защ.
	Р30	ВЛ 245- Авт. В 220, ИМФ, ТО
	Р31	ПА
	Р32	Автоматика ОМВ 220
	Р33	КСЗ ОМВ 220
	Р34	АУВ, УРОВ, ТАПВ ОМВ 220
	Р35	АУВ, УРОВ, ТАПВ QAT2E, QAT2G
	Р36	РПР ОМВ 220, ТН-220 1с., ТН-220 2с.
	Р37	ДЗШ 220 кВ - переменный ток
	Р38	ДЗШ 220 кВ - постоянный ток
	Р39	КСЗ СМВ 220
	Р40	АУВ, УРОВ, ТАПВ QW3E (ВЛ-244) / АУВ, УРОВ, ТАПВ QW7E (ВЛ-248)
	Р41	ВЛ-248. Авт. В 220, защиты
	Р42	АТ-2- Авт. В 110 кВ, 33 110 кВ
	Р43	АТ-2- Авт. В 220 кВ, 33 220 кВ
	Р44	АТ-2 - Диф. защита

Продолжение таблицы 2

Щит	Обозначение панели/шкафа	Наименование панели/шкафа
Релейный зал (РЗ)	P45	АТ-2 - ЗОП, перегр., охлажд.
	P46	АТ-2. РПН. АТ-1
	P47	АТ-1 - Авт. В 110 кВ, 33 110 кВ
	P48	АТ-1 - Авт. В 220 кВ, 33 220 кВ
	P49	АТ-1- Лиф. защита
	P50	АТ-1- 30(1. перегр.. охлажд.
	P51	ОМВ-110- Защиты
	P52	ОМВ-110- авт., РПР Т-3, Т-А, ТН 110 кВ 1 и 2СШ
	P53	РОР В 110 кВ ВЛ-120, 121 123, АТ-1, АТ-2, 0В-110
	P54	АУВ, УРОВ, ТАПВ ОМВ-110
	P55	ЛЗШ 110 кВ - переменный ток
	P56	ЛЗШ 110 кВ - постоянный ток
	P57	ШСВ 110 кВ - Авт., защита
	P58	КПЗ ВЛ-120
	P59	АУВ, УРОВ, ТАПВ ОТЗО/ АУВ, УРОВ, ТАПВ МВ-110 ВЛ-121
	P60	КСЗ ВЛ-121
	P61	НВЧЗ+СЗ ВЛ-121
	P62	Т-3, Т-4 - Авт. В 10 кВ, РПН
	P63	Т-3 - Авт. В 35 кВ, МТЗ 35 кВ, 10 кВ, охл., перегр.
	P64	АУВ, УРОВ, ТАПВ QT3G / АУВ, УРОВ, ТАПВ QK1G
	P65	Т-3 - Диф. защита, МТЗ 10 кВ
	P66	Т-4 - Авт. В 35 кВ, МТЗ 35 кВ, 10 кВ, охл., перегр.
	P67	Т-3, Т-4- Авт. В 110 кВ, МТЗ 110 кВ
	P68	Т-4 - Диф. защита, МТЗ 10 кВ
	P69	ВЛ-12, ВЛ-13 - Авт. В 35 кВ, защита
	P70	СВ 10 кВ - Авт., защита, АЧР
	P71	АУВ, УРОВ, ТАПВ МВ-110 ВЛ-120 / АУВ, УРОВ, ТАПВ МВ-110 ВЛ-123
	P72	ВЛ-120 - ДФЗ
	P73	ВЛ-123 - Авт. В 110 кВ, защита
	P74	СВ 35 кВ - Авт., защ. ТН 35 кВ 1 С и 2 С
	P75	СМ РЗА
	P76	ШРОТ 110 кВ
	P77	АУВ, УРОВ, ТАПВ СМВ 220
	P78	АУВ, УРОВ, ТАПВ QAT1E, QAT1G
	ПА	ШРОТ 220 кВ

1.10 Управление и автоматизация подстанции

Для информирования персонала о неисправностях на подстанции, срабатывании защит и управления всеми коммутационными аппаратами в

ОПУ установлен главный щит управления (ГЩУ). На щите выполнена полная мнемосхема подстанции. Для отображения показаний с объекта и сигнализации о неисправностях на щите установлено следующее оборудование:

- ключи управления выключателями присоединений;
- измерительные приборы;
- сигнальная арматура положения коммутационных аппаратов подстанции;
- световые табло присоединений.

Вновь устанавливаемые шкафы защит включаются в существующую схему сигнализации подстанции.

1.11 Сигнализация

Для информирования персонала о неисправностях на подстанции, срабатывании защит в помещении ГЩУ установлена панель центральной сигнализации У6.

Центральная сигнализация предназначена для выявления ненормальных и аварийных режимов работы оборудования и отображения их на щите управления с помощью световой и звуковой сигнализации.

Вновь устанавливаемые шкафы защит включаются в существующую схему сигнализации подстанции.

Выводы по разделу.

В работе предусматривается замена существующей панели ступенчатых защит ОМВ 220 (панель Р33) типа ШДЭ2801 на шкаф с МП терминалом из перечня типовых шкафов ПАО «ФСК ЕЭС». К установке предусматривается шкаф типа ШЭТ 251.02-0 (КСЗ, УРОВ, АУВ). Установка нового шкафа предполагается в релейном зале ОПУ на место, освободившееся после демонтажа существующей панели Р33.

Существующая панель ступенчатых защит СМВ 220 (панель Р39) типа ШДЭ2801 заменяется на шкаф с МП терминалом типа ШЭТ 451.01-0 (КСЗ, УРОВ, АУВ). Установка нового шкафа предполагается также в релейном зале ОПУ.

Оборудование релейной защиты и автоматики управления выключателем ВЛ 110 кВ Северная – Городская с отпайкой на ПС ЖБИ (ВЛ-120), ВЛ 110 кВ Северная – Кожва с отпайками выполнено на микроэлектронной и электромеханической элементной базе.

Предусматривается замена существующих панелей ступенчатых защит ВЛ 110 кВ Северная – Городская с отпайкой на ПС ЖБИ (панель Р58), ВЛ 110 кВ Северная – Кожва с отпайками типа ШДЭ2801 (панель Р60) типа ШДЭ2801 на шкафы с МП терминалами типа ШЭТ 220.08-0 (КСЗ РС) и шкаф типа ШЭТ 220.04-0 с ВЧ ПП вместо ПДЭ2802. Установка новых шкафов предполагается в релейном зале ОПУ.

В связи с тем, что нагрузка по цепям напряжения от вновь устанавливаемых шкафов защит значительно ниже нагрузки заменяемых панелей, проверка цепей напряжения не требуется.

В релейном зале ОПУ на панели Р25, Р26, Р27 установлен регистратор аварийных событий типа ПАРМА, состоящий из блоков преобразователей аналоговых и дискретных сигналов и блоков регистрации. Подключение дискретных сигналов от вновь устанавливаемых шкафов защит предусматривается к резервным входам существующего регистратора.

Вновь устанавливаемые шкафы защит включаются в существующую схему сигнализации подстанции.

2 Анализ реализации функций РЗА на оборудовании разных производителей

К установке на подстанции 220 кВ Северная рекомендуются шкафы с МП терминалами отечественных фирм (имеющие ТУ), а также зарубежных фирм (имеющие аттестационное заключение утвержденные ПАО «ФСК ЕЭС» (ПАО «Россети»).

Функции РЗА вновь устанавливаемых шкафов возможно реализовать на базе оборудования производителей, представленных в таблице 3.

Таблица 3 – Варианты применения шкафов РЗА различных производителей

Производитель	Оборудование
АО «РТСофт»	ШЭТ 220.08-0
ООО НПП «ЭКРА»	ШЭТ 251.02-0
ООО НПП «Бреслер»	ШЭТ 451.01-0
ООО «Релематика»	ШЭТ 220.04-0 с ВЧ ПП
ООО «ИНБРЭС»	
ЗАО «ЧЭАЗ»	
ООО «УРАЛЭНЕРГОСЕРВИС»	
ООО «Прософт-Системы»	

На данный момент аттестации типовых шкафов ШЭТ нет ни у одного производителя оборудования РЗА. Производители, представленные в таблице, имеют действующую аттестацию ПАО «ФСК ЕЭС» (ПАО «Россети») на оборудование аналогичное применяемому в данной работе.

Выводы по разделу.

Определен перечень производителей шкафов РЗА продукция которых может быть использована при реализации технических решений, предложенных в данной работе.

3 Проверка пригодности трансформаторов тока

3.1 Проверка ТТ на 10 % погрешность

«Расчетная проверка на 10 % погрешность выполняется для максимального тока однофазного внешнего короткого замыкания с учетом фактического значения сопротивления нагрузки $Z_{н.факт.расч}$ определяемого длиной контрольного кабеля от ТТ до помещения релейных панелей (шкафов), его сечением и сопротивлением токовых входов микропроцессорных терминалов и/или сопротивлением обмоток реле электромеханических защит. В случае отсутствия информации о максимальном токе внешнего короткого замыкания, для выполнения проверки может быть использован ток короткого замыкания в зоне действия защиты, так как это условие является более жестким и в случае его выполнения трансформатор тока также может быть признан пригодным для целей РЗА» [17].

«Сопротивление нагрузки ТТ при однофазном коротком замыкании в случае подключения к одной вторичной обмотке нескольких терминалов определяется следующей формулой» [13]:

$$Z_{н.факт.расч} = \frac{2 \cdot \rho \cdot L}{S} + n \cdot R_p + R_{пер}, \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление меди равное $0,0175 \text{ Ом} \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}$;

L – длина контрольного кабеля, м;

S – сечение контрольного кабеля, мм^2 ;

R_p – сопротивление аналогового входа устройства РЗА, для ТТ с номинальным током 1 А принимается 0,5 Ом, для ТТ с номинальным током 5 А принимается 0,1 Ом;

n – количество устройств, подключенных к обмотке ТТ в соответствии со схемой ИТС;

$R_{\text{пер}}$ – сопротивление контактов, принимается равным 0,1 Ом» [17].

«Предельно допустимая кратность тока в классе точности 10Р при фактической расчетной нагрузке определяется по формуле» [17]:

$$K_{10\text{доп}} = K_n \cdot \frac{Z_{\text{ном}} + Z_{\text{ТТ}}}{Z_{\text{нагр.факт.расч.}} + Z_{\text{ТТ}}}, \quad (2)$$

где « $Z_{\text{ТТ}}$ – сопротивление вторичной обмотки трансформатора тока, для ТТ с номинальным током 1 А принимается 7 Ом, для ТТ с номинальным током 5 А принимается 0,4 Ом;

$Z_{\text{ном}}$ – номинальное сопротивление нагрузки вторичной обмотки ТТ в заданном классе точности;

K_n – номинальная предельная кратность ТТ в заданном классе точности» [17].

«Максимальная расчетная кратность ТТ при внешнем коротком замыкании определяется по формуле» [17]:

$$K_{\text{макс.внеш}} = \frac{I_{\text{макс.внеш}}}{I_{\text{ном}}}, \quad (3)$$

где « $I_{\text{макс.внеш}}$ – максимальный расчетный ток внешнего однофазного короткого замыкания;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный первичный ток ТТ» [17].

Полная погрешность ТТ не превышает 10 % при выполнении условия:
 $K_{10\text{доп}} > K_{\text{макс.внеш}}$.

Результаты проверки ТТ на 10 % погрешность представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты проверки ТТ на 10 % погрешность

Место установки и тип ТТ	Коэффициент трансформации ТТ	Номинальная предельная кратность ТТ K_n	Номинальная вторичная нагрузка $S_{ном}$, ВА	Длина контрольного кабеля L , м	Сечение контрольного кабеля S , mm^2	Фактическое расчетное значение нагрузки ТТ $Z_{н.факт.расч}$, Ом	Макс. ток внешнего КЗ $I_{макс.внеш.}$, кА	Предельно доп. кратность тока в классе точности, $K_{10доп}$	Максимальная расчетная кратность $K_{макс.внут}$	$K_{10доп} > K_{расч.макс}$
ОМВ 220. ТТ встроенные в выключатель ВЭБ-УЭТМ-220	600/5	40	10	190	6,0 *	1,29	10,52	18,92	17,53	Да
СМВ 220. ТТ встроенные в выключатель ВЭБ-УЭТМ-220	600/5	40	10	180	6,0 *	1,25	10,52	19,39	17,53	Да
ВЛ-120. ТТ встроенные в выключатель ВБ-110	600/5	40	10	190	6,0	1,25	4,97	19,39	8,28	Да
ВЛ-121. ТТ встроенные в выключатель ВБ-110	400/5	30	10	200	6,0	1,28	4,97	14,29	12,42	Да
Примечание: * – сечение контрольного кабеля было увеличено с 4 mm^2 до 6 mm^2 для обеспечения условия $K_{10доп} > K_{макс.внеш}$										

3.2 Проверка ТТ на предельно допустимую погрешность

«Проверка трансформаторов тока на предельно допустимую погрешность выполняется для максимального тока короткого замыкания в зоне действия защиты.

Максимальная расчетная кратность ТТ при коротком замыкании в зоне действия защиты определяется по формуле» [17]:

$$K_{\text{макс.внутр}} = \frac{I_{\text{макс.внутр}}}{I_{\text{ном}}}, \quad (4)$$

где « $I_{\text{макс.внутр}}$ – максимальный расчетный ток однофазного короткого замыкания в зоне действия защиты;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный первичный ток ТТ» [17].

«Обобщенный параметр $A_{\text{расч}}$, определяющий величину токовой погрешности по превышению предельно допустимой кратности тока в классе точности 10Р определяется по формуле» [17]:

$$A_{\text{расч}} = \frac{K_{\text{макс.внутр}}}{K_{10\text{доп}}}, \quad (5)$$

где « $K_{10\text{доп}}$ – предельно допустимая кратность тока в классе точности 10Р» [17].

«Предельно допустимая токовая погрешность при коротком замыкании в зоне действия защиты для микропроцессорных устройств составляет 50%, этой величине соответствует значение параметра $A=2,6$.

Токовая погрешность ТТ не превышает предельно допустимого значения при выполнении условия» [17]:

$$A_{\text{расч}} < 2,6.$$

Результаты проверки трансформаторов тока на предельно допустимую погрешность представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты проверки ТТ на предельно допустимую погрешность

Место установки и тип ТТ	Коэффициент трансформации ТТ	Макс. ток внешнего КЗ $I_{\text{макс.внеш}}, \text{кА}$	Предельно доп. кратность тока в классе точности, $K_{10\text{доп}}$	Максимальная расчетная кратность $K_{\text{макс.внут}}$	Обобщенный параметр $A_{\text{расч}}$	$A_{\text{расч}} < 2,6$
ОМВ 220. ТТ встроенные в выключатель ВЭБ-УЭТМ-220	600/5	10,52	18,92	17,53	0,93	Да
СМВ 220. ТТ встроенные в выключатель ВЭБ-УЭТМ-220	600/5	10,52	19,39	17,53	0,90	Да
ВЛ-120. ТТ встроенные в выключатель ВБ-110	600/5	4,97	19,39	8,28	0,43	Да
ВЛ-121. ТТ встроенные в выключатель ВБ-110	400/5	4,97	14,29	12,42	0,87	Да

3.3 Проверка по условию отсутствия опасных перенапряжений во вторичных цепях ТТ

«Напряжение во вторичных цепях ТТ при максимальном токе короткого замыкания определяется по формуле» [17]:

$$U_{\text{ТТрасч}} = \frac{I_{\text{макс.внутр}}}{K_{\text{ТТ}}} \cdot Z_{\text{н.факт.расч}}, \quad (6)$$

где « $K_{\text{ТТ}}$ – коэффициент трансформации трансформатора тока» [17].

«Значение напряжения на вторичных обмотках ТТ не должно превышать испытательного напряжения 1000 В. Трансформаторы тока удовлетворяют указанному требованию при выполнении условия: $U_{\text{ТТрасч}} < 1000$ » [17].

Результаты проверки трансформаторов тока по условию отсутствия опасных перенапряжений во вторичных цепях ТТ представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты проверки ТТ по условию отсутствия опасных перенапряжений во вторичных цепях ТТ

Место установки и тип ТТ	Коэффициент трансформации ТТ	Фактическое расчетное значение нагрузки ТТ $Z_{н.факт.расч}$, Ом	Макс. ток КЗ в зоне действия защиты, $I_{макс.внут}$, кА	Напряжение во вторичных цепях ТТ при макс. токе КЗ $U_{ТТрасч}$, В	$U_{ТТрасч} < 1000$
ОМВ 220. ТТ встроенные в выключатель ВЭБ-УЭТМ-220	600/5	1,29	10,52	113,2	Да
СМВ 220. ТТ встроенные в выключатель ВЭБ-УЭТМ-220	600/5	1,25	10,52	109,6	Да
ВЛ-120. ТТ встроенные в выключатель ВБ-110	600/5	1,25	4,97	51,8	Да
ВЛ-121. ТТ встроенные в выключатель ВБ-110	400/5	1,28	4,97	79,5	Да

3.4 Определение времени до насыщения трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий

Определение времени до насыщения трансформаторов тока выполнено в соответствии с ГОСТ Р 58669-2019 «Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях» [5].

«Расчет выполняется графическим методом по паспортным данным ТТ (п. 5.2 ГОСТ Р 58669-2019). $K_{н.р.}(t)$ определяется с использованием эквивалентной постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ (в соответствии с Г.4 ГОСТ Р 58669-2019)» [5].

Строятся временные диаграммы по формуле (Г.15 ГОСТ Р 58669-2019)

$$K_{n.p.}(t) = \sin \alpha \cdot \cos \vartheta \cdot e^{-\frac{t}{T_{p.i}}} + \cos \alpha \cdot \cos \vartheta \cdot \omega \cdot T_{p.i} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{p.i}}} \right) - \sin(\omega \cdot t + \alpha + \vartheta) + \cos \alpha \cdot \sin \vartheta \quad (7)$$

где α – угол сопротивления ветви вторичного тока ТТ;

$$\sin \alpha = \frac{\omega \cdot (L_2 + L_n)}{Z_{2\Sigma}}; \quad (8)$$

$$\cos \alpha = \frac{R_2 + R_n}{Z_{2\Sigma}}; \quad (9)$$

где ϑ – начальная фаза периодической составляющей тока КЗ.

Эквивалентную постоянную времени $T_{p.экв}$ рассчитываем по формуле (п. 4.2.7 ГОСТ Р 58669-2019):

$$T_{p.экв} = \frac{1}{I_{K3\Sigma}} \left(\sum_{i=1}^n I_{K3i} \cdot T_{p.i} \right), \quad (10)$$

где $I_{K3\Sigma}$ – действующее значение суммарного тока КЗ;

I_{K3i} – действующее значение тока КЗ в i -ой ветви;

$T_{p.i}$ – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока в каждой из i -ой ветви, питающей место КЗ.

Постоянную времени затухания апериодической составляющей тока в каждой из i -ой ветвей, питающих место КЗ, и эквивалентную постоянную времени $T_{p.экв}$ вычисляют по формуле

$$T_{p.i} = \frac{X_i}{\omega \cdot R_i}, \quad (11)$$

где « X_i – эквивалентное индуктивное сопротивление i -ой ветви относительно точки КЗ;
 ω – угловая частота;
 R_i – эквивалентное активное сопротивление i -ой ветви относительно точки КЗ» [5].

Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{n,p}$ откладывается значение A , и на построенных характеристиках $K_{n,p}(t)$ определяется соответствующее значения $t_{нас}$.

Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{n,p}$ откладывается значение $A(1-K_r)$, и на построенных характеристиках $K_{n,p}(t)$ определяется соответствующее значение $t_{нас}$ по формуле.

K_r - относительное значение остаточного (начального) потокоцепления вторичной обмотки ТТ, которое необходимо принимать равным 0,86 для ТТ класса точности 10Р (для трансформаторов тока класса точности 10PR следует принимать равным 0,10);

« A - параметр режима работы ТТ, равный отношению потокоцепления насыщения к амплитуде потокоцепления вторичной обмотки при заданном токе КЗ $I_{КЗ}$, и фактической нагрузке $R_{н.факт}$ во вторичной цепи» [5].

$$A = \frac{I_{1.ном} \cdot K_{ном} \cdot z_{2\Sigma ном}}{I_{КЗ} \cdot z_{2\Sigma}}, \quad (12)$$

где $z_{2\Sigma ном}$ – номинальное полное сопротивление вторичной нагрузки ТТ;

$z_{2\Sigma}$ – полное сопротивление ветви вторичного тока.

Номинальное полное сопротивление вторичной нагрузки ТТ $z_{2\Sigma ном}$ рассчитывается по формуле:

$$z_{2\Sigma_{ном}} = \sqrt{(R_2 + z_{н.ном} \cdot \cos \varphi_{н.ном})^2 + (X_2 + z_{н.ном} \cdot \sin \varphi_{н.ном})^2}, \quad (13)$$

где $\varphi_{н.ном}$ – номинальное значение угла сопротивления нагрузки ТТ.

Полное сопротивление ветви вторичного тока $z_{2\Sigma}$ вычисляется по формуле:

$$z_{2\Sigma} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}, \quad (14)$$

где $R_{н.факт}$ – фактическое активное сопротивление нагрузки ТТ,

$X_{н.факт}$ – фактическое индуктивное сопротивление нагрузки ТТ.

Построенные временные диаграммы $K_{n,p}(t)$ приведены на рисунках 7-10. Результаты расчетов сведены в таблицу 7.

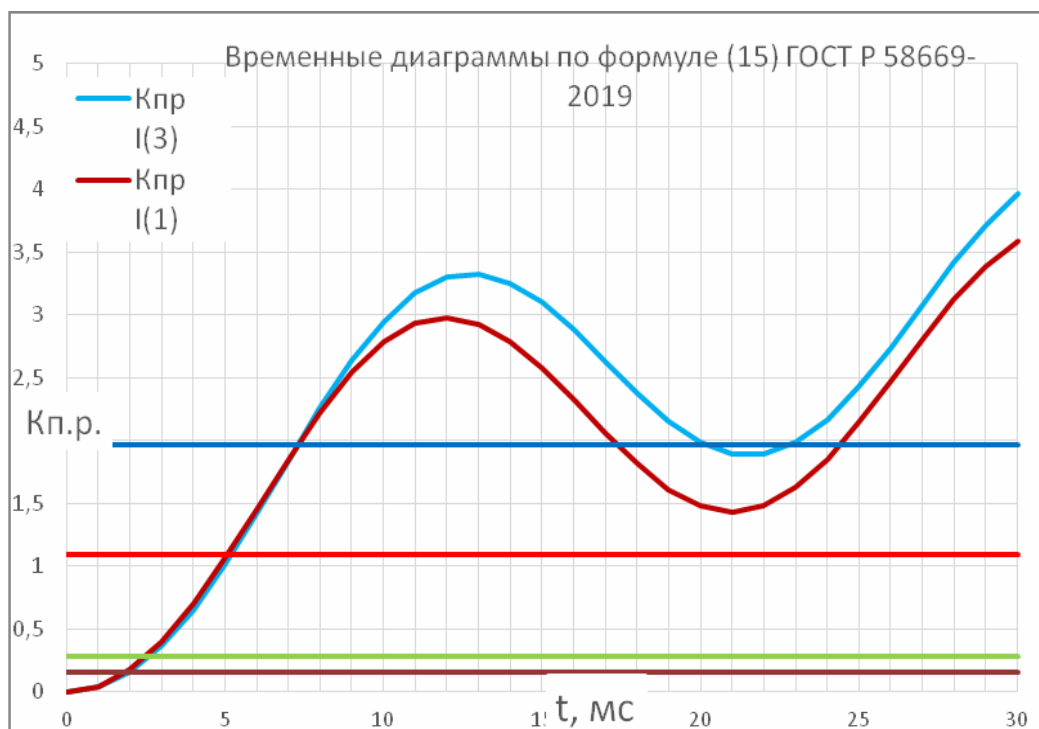


Рисунок 7 – Временные диаграммы $K_{n,p}(t)$ для ОМВ 220

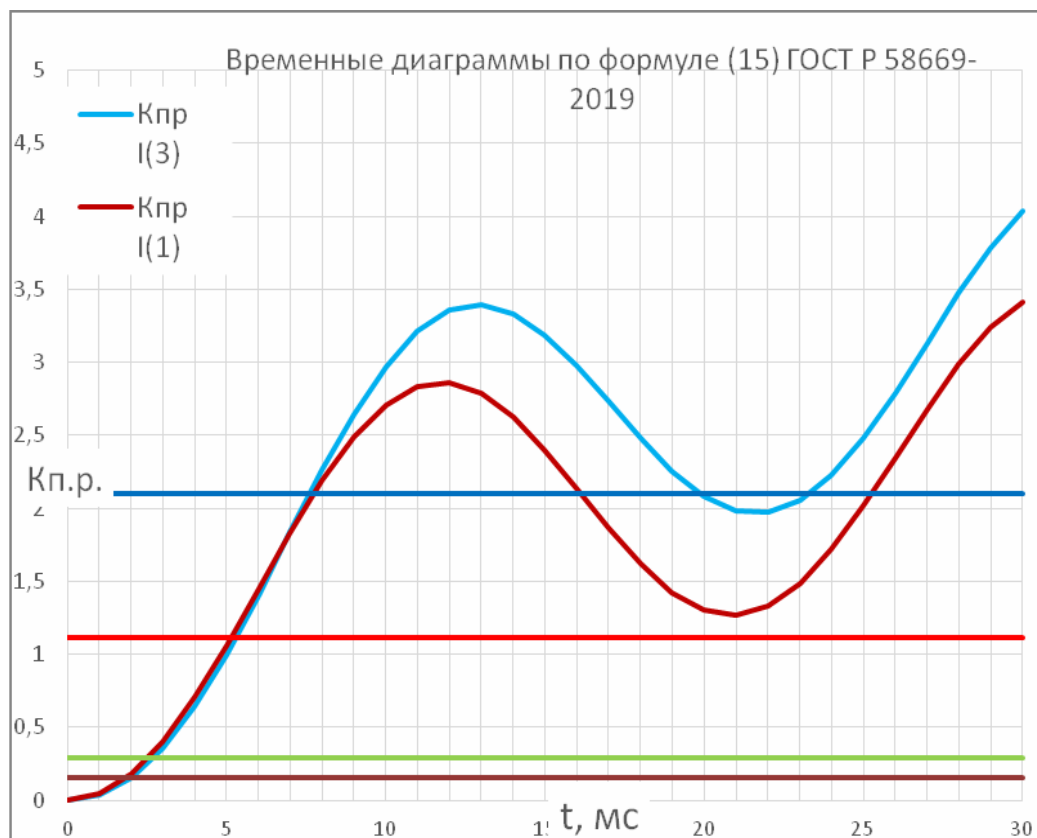


Рисунок 8 – Временные диаграммы $K_{n,p}(t)$ для СМВ 220

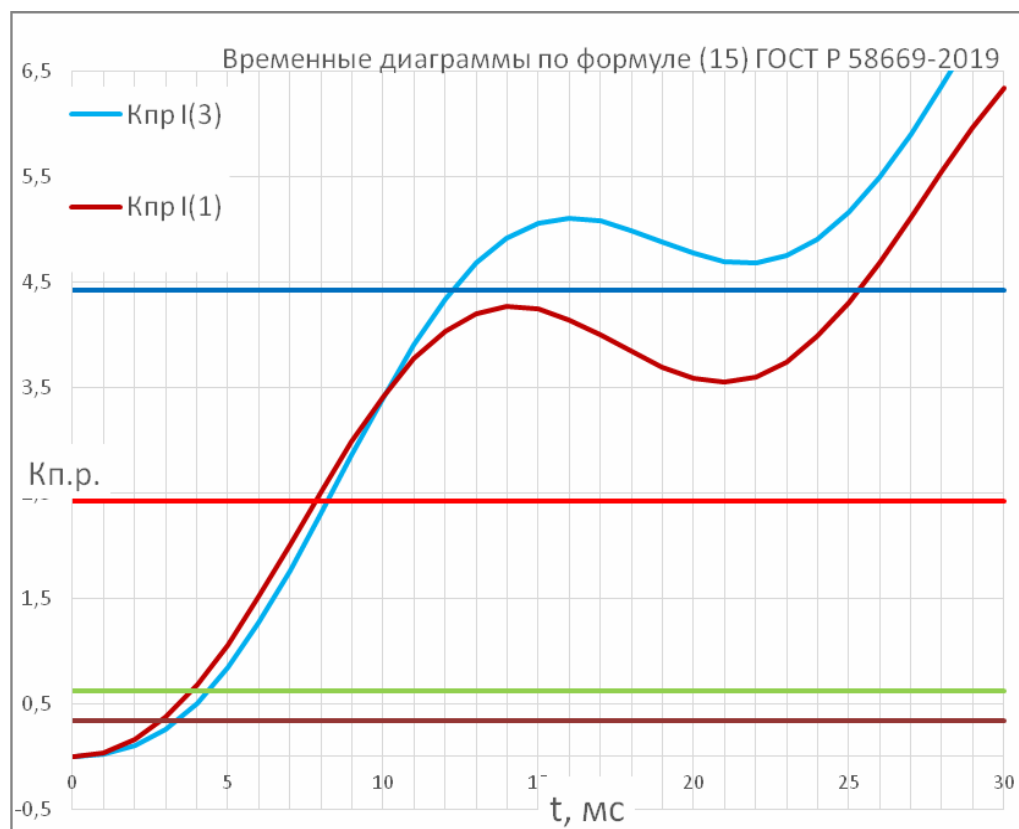


Рисунок 9 – Временные диаграммы $K_{n,p}(t)$ для ВЛ-120

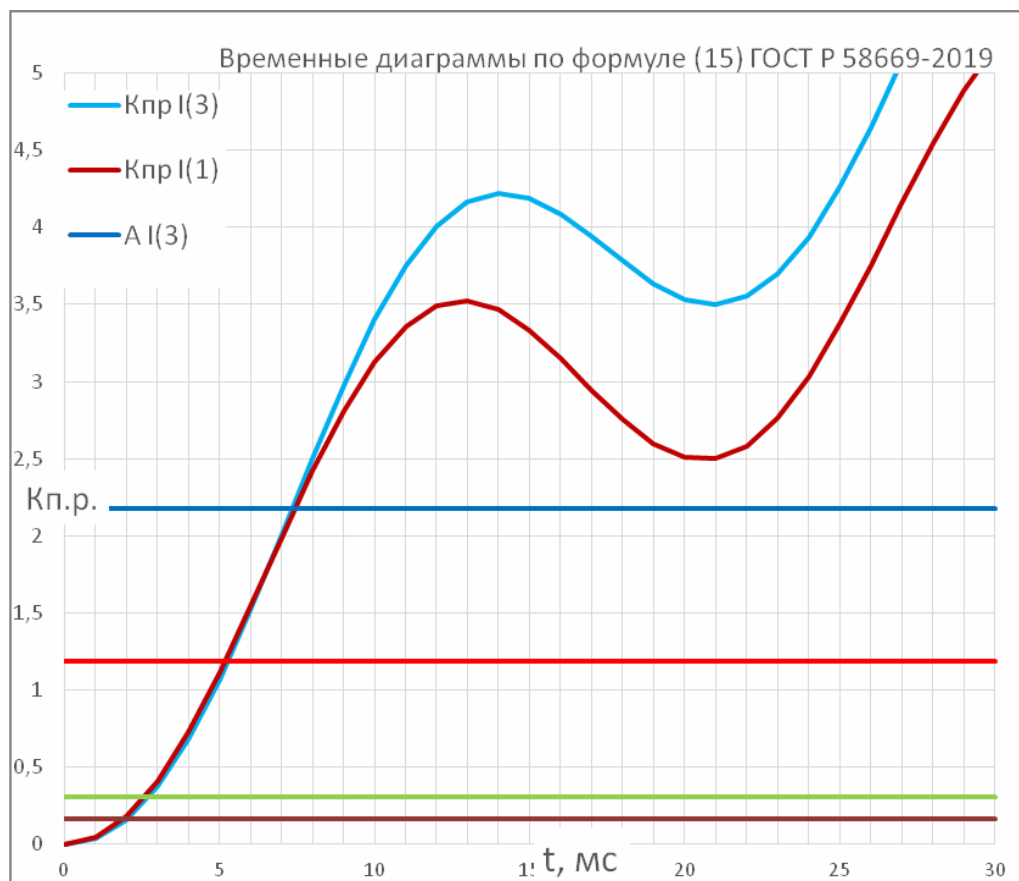


Рисунок 10 – Временные диаграммы $K_{n,p}(t)$ для ВЛ-121

«Мероприятия, исключаяющие риски неправильной работы устройств РЗА в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ» [5]:

- снижение вторичной нагрузки трансформаторов тока (увеличение сечения контрольного кабеля токовых цепей);
- замена устройств РЗА, выполненных на электромеханической элементной базе, на микропроцессорные устройства РЗА (снижение минимально необходимого срока достоверного измерения значения тока, при котором обеспечивается правильная работа функций релейной защиты, реализованных в устройстве РЗА, в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ, использование специальных алгоритмов, обеспечивающих правильную работу устройств РЗА в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ);

Таблица 7 - Результаты определения времени до насыщения ТТ

Место установки		ОМВ 220. ТТ встроенные в выключатель ВЭБ- УЭТМ-220	СМВ 220. ТТ встроенные в выключатель ВЭБ- УЭТМ-220	ВЛТ-120. ТТ встроенные в выключатель ВБ- 110	ВЛ-121. ТТ встроенные в выключатель ВБ- 110
Коэффициент трансформации		600/5	600/5	600/5	400/5
Номинальная предельная кратность ТТ		40	40	40	30
Номинальная нагрузка на вторичные обмотки ТТ (Ом)		0,4	0,4	0,4	0,4
Фактическая нагрузка на вторичные обмотки ТТ (Ом)	Ikз (3)	0,70	0,63	0,63	0,64
	Ikз (1)	1,19	1,15	1,15	1,18
Значение трехфазного тока КЗ (А)		8460	8460	4025	4025
Кратность при трехфазном КЗ		14,10	14,10	6,71	10,06
Значение однофазного тока КЗ (А)		10522	10522	4869	4869
Кратность при однофазном КЗ		17,54	17,54	8,12	12,17
Эквивалентная постоянная времени апериодической слагающей тока КЗ (мс)	Ikз (3)	15	15	50	50
	Ikз (1)	16	16	49	49
Параметр режима работы ТТ (А), для Ikз(3)/Ikз(1)		1,96/1,09	2,10/1,12	4,42/2,41	2,18/1,18
Параметр А (1 - К _Г), для Ikз(3)/Ikз(1)		0,28/0,15	0,29/0,16	0,62/0,34	0,30/0,17
Параметры контрольного кабеля	L (м)	170	180	180	185
	S (кв.мм)	6,0	6,0	6,0	6,0
	Cu/Al	Cu	Cu	Cu	Cu
Минимальное время до насыщения при отсутствии и наличии остаточной намагнитченности (мс)	K _Г = 0	5,08	5,15	7,82	5,17
	K _Г = 0,86	1,78	1,80	2,67	1,85
Подключенные устройства РЗ		КСЗ	КСЗ	КСЗ	КСЗ

- применение «цифрового» суммирования токов ТТ;
- замена ТТ. Применение ТТ с номинальным коэффициентом остаточной намагниченности не более 10% (например, кл. точности 10PR).

Обеспечение непревышения минимально необходимым временем достоверного измерения значения тока ТТ, при котором обеспечивается правильная работа релейной защиты в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ расчетного минимального времени до насыщения ТТ является обязательным техническим требованием к реконструируемым устройствам РЗА в соответствии с требованиями п. 3.2 письма Минэнерго России от 02.04.2019 № ЧА-3440/10 «О мерах по недопущению неправильной работы устройств релейной защиты» [10]. В зависимости от производителя устройства РЗА, минимальное время до насыщения ТТ, необходимое для правильной работы устройств РЗА составляет:

- «для ДЗЛ – не менее 5-30 мс;
- для КСЗ – не менее 25 мс.

Полученное расчетное значение времени до насыщения ТТ меньше этих значений, увеличение сечения жил кабелей токовых цепей защит также не дает необходимого увеличения расчетного времени до насыщения ТТ» [5].

На основании вышеизложенного, рекомендуется при проведении смежных работ по замене масляных выключателей, отделителей и короткозамыкателей 110-220 кВ на ПС 220 кВ Северная, ПС 220 кВ Северный Возей, ПС 220 кВ Сыктывкар, ПС 220 кВ Коноша, РП 220 кВ Первомайский, ПС 220 кВ Савино, ПС 220 кВ Возейская, ПС 220 кВ Зеленоборск, в рамках которых выполняется замена выключателей и ТТ 110 и 220 кВ, в части применения ТТ с низким коэффициентом остаточной намагниченности (например, кл. точности 10PR), т.к. при применении ТТ с высоким коэффициентом остаточной намагниченности (кл. точности 10P) возможна

неправильная работа устройств РЗА в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ.

Выводы по разделу.

Выполнена проверка ТТ на 10 % погрешность для максимального тока однофазного внешнего короткого замыкания и на предельно допустимую погрешность для максимального тока короткого замыкания в зоне действия защиты. Проверка была выполнена для следующих ТТ:

- ОМВ 220. ТТ встроенные в выключатель ВЭБ-УЭТМ-220;
- СМВ 220. ТТ встроенные в выключатель ВЭБ-УЭТМ-220;
- ВЛ-120. ТТ встроенные в выключатель ВБ-110;
- ВЛ-121. ТТ встроенные в выключатель ВБ-110.

Все рассмотренные ТТ прошли проверку.

Кроме того, ТТ были проверены по условию отсутствия опасных перенапряжений во вторичных цепях ТТ.

Определены времена до насыщения трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий и построены временные диаграммы.

Полученное расчетное значение времени до насыщения ТТ меньше значений, установленных в стандарте, поэтому рекомендуется при проведении смежных работ в рамках которых выполняется замена выключателей и ТТ 110 и 220 кВ, использовать ТТ с низким коэффициентом остаточной намагниченности (например, кл. точности 10PR), т.к. при применении ТТ с высоким коэффициентом остаточной намагниченности (кл. точности 10P) возможна неправильная работа устройств РЗА в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ.

4 Расчет параметров срабатывания ступенчатых защит ВЛ 110 кВ Северная – Городская с отпайкой на ПС ЖБИ (ВЛ-120)

4.1 Дистанционная защита (ДЗ)

Принимаются существующие уставки дистанционной защиты по полному сопротивлению и пересчитываются применимо к шкафу ШЭТ 220.08-0.

При обнаружении неисправности в измерительных цепях напряжения все ступени ДЗ блокируется.

4.1.1 Первая ступень ДЗ

Существующая уставка срабатывания первой ступени ДЗ $Z_1=2,4$ Ом. Уставка срабатывания первой ступени по оси X и R будет равна:

$$X_{сз}^I \leq Z_1 \cdot \sin \varphi_{МЧ}, \quad (15)$$

где Z_1 – существующая уставка срабатывания первой ступени ДЗ, Ом;

$\varphi_{МЧ}$ – угол максимальной чувствительности, равен углу линии.

$$\begin{aligned} X_{сз}^I &\leq 2,4 \cdot \sin 72 = 2,28 \text{ Ом}, \\ R_K &\leq Z_1 \cdot \cos \varphi_{МЧ}, \\ R_K &\leq 2,4 \cdot \cos 72 = 0,74 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (16)$$

Уставка по оси R определяется с учётом сопротивления дуги

$$\begin{aligned} R_{д} &= \frac{1050 \cdot L_{д}}{I_{д}}, \\ R_{д} &= \frac{1050 \cdot 1,5 \cdot 4}{2573} = 2,45 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (17)$$

$$R_{сз}^I = R_K + \frac{0,5 \cdot R_{д}}{k_{зап}}, \quad (18)$$

где R_K – активное сопротивление, определяемое уставкой реактивного сопротивления зоны, Ом;

$L_{д}$ – длина дуги, м, принимаемая равной расстоянию «фаза-фаза» с учётом коэффициента увеличения 1,5;

$I_{д}$ – ток дуги при КЗ между двумя фазами в конце зоны действия рассматриваемой ступени дистанционной защиты в минимальном режиме, А;

$k_{зап}$ – коэффициент запаса, принимаемый равным 0,85.

$$R_{сз}^I = 0,74 + \frac{0,5 \cdot 2,45}{0,85} = 2,18 \text{ Ом}.$$

Окончательно принимается $Z_{сз}^I = 2,18 + j2,28 \text{ Ом}$; время срабатывания защиты $t_{сз}^I = 0,1 \text{ с}$.

4.1.2 Вторая ступень ДЗ

Существующая уставка срабатывания второй ступени ДЗ $Z2=6,5 \text{ Ом}$.
Уставка срабатывания второй ступени по оси X и R будет равна:

$$X_{сз}^{II} \leq Z2 \cdot \sin \varphi_{мч}, \quad (19)$$

где $Z2$ – существующая уставка срабатывания второй ступени ДЗ, Ом;

« $\varphi_{мч}$ – угол максимальной чувствительности, равен углу линии» [6].

$$X_{сз}^{II} \leq 6,5 \cdot \sin 72 = 6,18 \text{ Ом},$$

$$R_K \leq Z2 \cdot \cos \varphi_{мч}, \quad (20)$$

$$R_K \leq 6,5 \cdot \cos 72 = 2,00 \text{ Ом}.$$

«Чувствительность второй ступени ДЗ при междуфазных КЗ в конце линии» [23]:

$$K_q = \frac{X_{сз}^{II}}{X_L}, \quad (21)$$

где « $X_{сз}^{II}$ – первичное сопротивление срабатывания ступени, Ом;

X_L – первичное сопротивление линии, Ом» [23].

$$K_q = \frac{6,18}{2,863} = 2,16 > 1,25.$$

Уставка R полигональной характеристики:

$$R_{сз}^{II} = R_K + \frac{0,5 \cdot R_{д.нач} \cdot \left(1 + \frac{5 \cdot V \cdot t}{L_{д.нач}}\right)}{k_{зап}}, \quad (22)$$

где R_K – активное сопротивление, определяемое уставкой реактивного сопротивления зоны, Ом;

$L_{д.нач}$ – длина дуги, м, принимаемая равной расстоянию «фаза-фаза» с учётом коэффициента увеличения 1,5;

$k_{зап}$ – коэффициент запаса, принимаемый равным 0,85;

V – средняя скорость ветра в районе прохождения трассы ВЛ, м/с, по карте районирования. принимается равной 5 м/с;

t – выдержка времени рассматриваемой ступени, с.

$$R_{сз}^{II} = 2,00 + \frac{0,5 \cdot 2,45 \cdot \left(1 + \frac{5 \cdot 5 \cdot 0,4}{1,5 \cdot 4}\right)}{0,85} = 5,84 \text{ Ом}.$$

Окончательно принимается $Z_{сз}^{II} = 5,84 + j6,18 \text{ Ом}$; время срабатывания защиты $t_{сз}^{II} = 0,4 \text{ с}$.

Вторая ступень ДЗ используется для автоматического ускорения с выдержкой времени 0,1 с. Также ступень может использоваться для оперативного ускорения с выдержкой времени 0,1 с.

4.1.3 Третья ступень ДЗ

Существующая уставка срабатывания третьей ступени ДЗ $Z3=400,0 \text{ Ом}$, тогда уставка срабатывания третьей ступени по оси X и R будет равна:

$$X_{сз}^{III} \leq Z3 \cdot \sin \varphi_{MЧ}, \quad (23)$$

где $Z3$ – существующая уставка срабатывания третьей ступени ДЗ, Ом;

« $\varphi_{MЧ}$ – угол максимальной чувствительности, равен углу линии» [7].

$$X_{сз}^{III} \leq 400,0 \cdot \sin 72 = 380,42 \text{ Ом},$$

$$R_K \leq Z3 \cdot \cos \varphi_{MЧ}, \quad (24)$$

$$R_K \leq 400,0 \cdot \cos 72 = 123,61 \text{ Ом}.$$

«Чувствительность третьей ступени ДЗ при междуфазных КЗ в конце линии» [23]:

$$K_{\varphi} = \frac{X_{сз}^{III}}{X_{Л}}, \quad (25)$$

где « $X_{сз}^{III}$ – первичное сопротивление срабатывания ступени, Ом;

$X_{Л}$ – первичное сопротивление линии, Ом» [23].

$$K_{\varphi} = \frac{380,42}{2,863} = 132,87 > 1,5.$$

Уставка R полигональной характеристики:

$$R_{сз}^{III} = R_K + \frac{0,5 \cdot R_{д.нач} \cdot \left(1 + \frac{5 \cdot V \cdot t}{L_{д.нач}}\right)}{k_{зап}}, \quad (26)$$

где R_K – активное сопротивление, определяемое уставкой реактивного сопротивления зоны, Ом;

$L_{д.нач}$ – длина дуги, м, принимаемая равной расстоянию «фаза-фаза» с учётом коэффициента увеличения 1,5;

$k_{зап}$ – коэффициент запаса, принимаемый равным 0,85;

V – средняя скорость ветра в районе прохождения трассы ВЛ, м/с, по карте районирования. принимается равной 5 м/с;

« t – выдержка времени рассматриваемой ступени, с» [8].

$$R_{сз}^{III} = 123,61 + \frac{0,5 \cdot 2,45 \cdot \left(1 + \frac{5 \cdot 5 \cdot 4,5}{1,5 \cdot 4}\right)}{0,85} = 152,07 \text{ Ом}.$$

Окончательно принимается $Z_{сз}^{III} = 152,07 + j380,42 \text{ Ом}$; время срабатывания защиты $t_{сз}^{III} = 4,5 \text{ с}$.

4.1.4 Оценка дальнего резервирования

«Чувствительность третьей ступени ДЗ при междуфазных КЗ за трансформатором на ПС Городская» [20]:

$$K_q = \frac{X_{сз}^{III}}{X_{Л} + \frac{X_{Т.смежн}}{K_{ток}}}, \quad (27)$$

где $X_{Т.смежн}$ – сопротивление трансформатора на ПС Городская, Ом;

$K_{ток}$ – коэффициент токораспределения.

$$K_q = \frac{380,42}{2,86 + \frac{55,4}{1}} = 6,53 > 1,2.$$

При междуфазных КЗ за трансформатором на ПС Городская обеспечивается дальнейшее резервирование защитами на ПС Северная.

Чувствительность третьей ступени ДЗ при междуфазных КЗ за трансформатором на ПС ЖБИ:

$$K_q = \frac{X_{сз}^{III}}{X_{л} + \frac{X_{Т.смежн}}{K_{ток}}}, \quad (28)$$

где $X_{Т.смежн}$ – сопротивление трансформатора на ПС ЖБИ, Ом;

$K_{ток}$ – коэффициент токораспределения.

$$K_q = \frac{380,42}{1,86 + \frac{142,83}{1}} = 2,63 > 1,2.$$

При междуфазных КЗ за трансформатором на ПС ЖБИ обеспечивается дальнейшее резервирование защитами на ПС Северная.

4.1.5 Углы наклона характеристик срабатывания реле сопротивления

«Угол φ_1 наклона характеристики РС в первом квадранте равен углу максимальной чувствительности линии. Принимается значение $\varphi_1 = 72^\circ$.

Угол φ_2 наклона нижней правой части характеристик РС принимаем с некоторым запасом (минус) $\varphi_2 = -12^\circ$.

Угол φ_4 наклона верхней правой части характеристики реле сопротивления задается равным $\varphi_4 = -12^\circ$, что удовлетворяет большинству расчетных режимов.

Для большинства случаев угол наклона нижней левой части характеристики срабатывания φ_3 может быть принят равным 115° (уточняется при возможности выполнения соответствующих расчетов)» [22].

4.2 Токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП)

Уставки ТНЗНП принимаются существующие:

- I ступень (ненаправленная): $I_{с.з.} = 3800 \text{ А}$; $T_{ср} = 0,1 \text{ с}$;
- II ступень (направлена в линию): $I_{с.з.} = 2400 \text{ А}$; $T_{ср} = 0,4 \text{ с}$ III ступень (направлена в линию): $I_{с.з.} = 700 \text{ А}$; $T_{ср} = 1,6 \text{ с}$;
- III ступень ОУ (направлена в линию): $I_{с.з.} = 700 \text{ А}$; $T_{ср} = 0,25 \text{ с}$ III ступень АУ (ненаправленная): $I_{с.з.} = 700 \text{ А}$; $T_{ср} = 0,15 \text{ с}$;
- IV ступень (направлена в линию): $I_{с.з.} = 200 \text{ А}$; $T_{ср} = 3,0 \text{ с}$.

При обнаружении неисправности в измерительных цепях напряжения все направленные ступени ТНЗНП блокируются.

4.3 Токовая отсечка (ТО)

Уставки ТО принимаются существующие:

- $I_{с.з.} = 780 \text{ А}$; $T_{ср} = 0,1 \text{ с}$.

ТО вводится при опробовании линии.

4.4 Аварийная МТЗ

Аварийная МТЗ автоматически вводится в работу при блокировке ДЗ и ТНЗНП в случае неисправности в измерительных цепях напряжения.

«Уставка срабатывания первой ступени аварийной МТЗ по условию отстройки от максимального тока КЗ на шинах противоположных ПС» [17]:

$$I_{сз}^I = K_{отс} \cdot I_{к.макс}, \quad (29)$$

где « $K_{отс} = 1,2$ – коэффициент отстройки;

$I_{к.макс}$ – максимальный ток КЗ на шинах противоположных ПС» [17].

$$I_{сз}^I = 1,2 \cdot 3899 = 4679 \text{ А}.$$

«Чувствительность первой ступени аварийной МТЗ при КЗ в начале линии» [17]:

$$K_q = \frac{I_{к.мин}}{I_{сз}^I}, \quad (30)$$

где « $I_{к.мин}$ – минимальный ток, протекающий в месте установки защиты при двухфазном КЗ в начале защищаемой линии» [17].

$$K_q = \frac{3485}{4679} = 0,74 < 1,25.$$

Условие $K_q > 1,25$ не выполняется, поэтому первую ступень аварийной МТЗ следует считать частично эффективной при наличии второй ступени.

Время срабатывания первой ступени аварийной МТЗ принимаем $t_{сз}^I = 0,1 \text{ с}$.

«Уставка срабатывания второй ступени аварийной МТЗ по условию отстройки от максимального тока нагрузки ВЛ» [17]:

$$I_{сз}^{II} = \frac{K_{отс}}{K_{\epsilon}} \cdot K_{сам} \cdot I_{раб.макс}, \quad (31)$$

где « $K_{отс} = 1,1$ – коэффициент отстройки;

K_{ϵ} – коэффициент возврата;

$K_{сам}$ – коэффициент самозапуска электродвигателей;

$I_{\text{раб.макс}}$ – максимальный рабочий ток ВЛ» [17].

$$I_{\text{сз}}^{\text{II}} = \frac{1,1}{0,95} \cdot 1,5 \cdot 600 = 1042 \text{ А}.$$

«Уставка срабатывания второй ступени аварийной МТЗ по условию согласования с первыми ступенями защит ВЛ предыдущего участка сети» [17]:

$$I_{\text{сз}}^{\text{II}} = K_{\text{согл}} \cdot I_{\text{к.макс}}, \quad (32)$$

где « $K_{\text{согл}} = 1,2$ – коэффициент согласования;

$I_{\text{к.макс}}$ – максимальный ток, протекающий в месте установки защит в конце зоны действия ступеней защит, с которыми производится согласование» [17].

$$I_{\text{сз}}^{\text{II}} = 1,2 \cdot 860 = 1032 \text{ А}.$$

«Чувствительность второй ступени аварийной МТЗ при КЗ в конце линии» [17]:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мин}}}{I_{\text{сз}}^{\text{II}}}, \quad (33)$$

где « $I_{\text{к.мин}}$ – минимальный ток, протекающий в месте установки защиты при двухфазном КЗ в конце защищаемого участка» [17].

$$K_{\text{ч}} = \frac{2573}{1042} = 2,47 > 1,5.$$

«Время срабатывания второй ступени аварийной МТЗ принимаем с учетом времени срабатывания защит смежных присоединений» [17]:

$$t_{сз}^I = t_{сз.смежн}^I + t_{УРОВ} + \Delta t, \quad (34)$$

где « Δt -степень селективности, принимается 0,3 с;

$t_{УРОВ}$ – время УРОВ, равное 0,3 с» [17]

$$t_{сз}^I = 0,1 + 0,3 + 0,3 = 0,7 \text{ с.}$$

Выводы по разделу.

Выполнен расчет параметров срабатывания ступенчатых защит ВЛ 110 кВ Северная – Городская с отпайкой на ПС ЖБИ (ВЛ-120).

Для первой, второй и третьей ступеней дистанционной защиты приняты существующие уставки по полному сопротивлению и пересчитаны применимо к шкафу ШЭТ 220.08-0.

Выполнена оценка дальнего резервирования. При междуфазных КЗ за трансформаторами на ПС Городская и ПС ЖБИ обеспечивается дальнейшее резервирование защитами на ПС Северная.

Определены углы наклона характеристик срабатывания реле сопротивления, уставки токовой направленной защиты нулевой последовательности, токовой отсечки, аварийной МТЗ.

Аварийная МТЗ автоматически вводится в работу при блокировке ДЗ и ТНЗНП в случае неисправности в измерительных цепях напряжения.

При проверке коэффициента чувствительности первой ступени аварийной МТЗ при КЗ в начале линии условие $K_{\eta} > 1,25$ не выполняется, поэтому первую ступень аварийной МТЗ следует считать частично эффективной при наличии второй ступени, для которой коэффициент чувствительности согласно расчетам составил 2,47, что больше порогового значения в 1,5.

Заключение

Цель бакалаврской работы заключалась в обеспечении надежного функционирования ПС путем замены существующих морально устаревших устройств РЗА на новые микропроцессорные устройства типа ШЭТ.

В работе предусматривается замена существующей панели ступенчатых защит ОМВ 220 (панель Р33) типа ШДЭ2801 на шкаф с МП терминалом из перечня типовых шкафов ПАО «ФСК ЕЭС». К установке предусматривается шкаф типа ШЭТ 251.02-0 (КСЗ, УРОВ, АУВ). Установка нового шкафа предполагается в релейном зале ОПУ на место, освободившееся после демонтажа существующей панели Р33.

Существующая панель ступенчатых защит СМВ 220 (панель Р39) типа ШДЭ2801 заменяется на шкаф с МП терминалом типа ШЭТ 451.01-0 (КСЗ, УРОВ, АУВ). Установка нового шкафа предполагается также в релейном зале ОПУ.

Оборудование релейной защиты и автоматики управления выключателем ВЛ 110 кВ Северная – Городская с отпайкой на ПС ЖБИ (ВЛ-120), ВЛ 110 кВ Северная – Кожва с отпайками выполнено на микроэлектронной и электромеханической элементной базе.

Предусматривается замена существующих панелей ступенчатых защит ВЛ 110 кВ Северная – Городская с отпайкой на ПС ЖБИ (панель Р58), ВЛ 110 кВ Северная – Кожва с отпайками типа ШДЭ2801 (панель Р60) типа ШДЭ2801 на шкафы с МП терминалами типа ШЭТ 220.08-0 (КСЗ РС) и шкаф типа ШЭТ 220.04-0 с ВЧ ПП вместо ПДЭ2802. Установка новых шкафов предполагается в релейном зале ОПУ.

В связи с тем, что нагрузка по цепям напряжения от вновь устанавливаемых шкафов защит значительно ниже нагрузки заменяемых панелей, проверка цепей напряжения не требуется.

В релейном зале ОПУ на панели Р25, Р26, Р27 установлен регистратор аварийных событий типа ПАРМА, состоящий из блоков преобразователей

аналоговых и дискретных сигналов и блоков регистрации. Подключение дискретных сигналов от вновь устанавливаемых шкафов защит предусматривается к резервным входам существующего регистратора.

Вновь устанавливаемые шкафы защит включаются в существующую схему сигнализации подстанции.

Определен перечень производителей шкафов РЗА продукция которых может быть использована при реализации технических решений, предложенных в данной работе.

Выполнена проверка ТТ на 10 % погрешность для максимального тока однофазного внешнего короткого замыкания и на предельно допустимую погрешность для максимального тока короткого замыкания в зоне действия защиты. Проверка была выполнена для следующих ТТ:

- ОМВ 220. ТТ встроенные в выключатель ВЭБ-УЭТМ-220;
- СМВ 220. ТТ встроенные в выключатель ВЭБ-УЭТМ-220;
- ВЛ-120. ТТ встроенные в выключатель ВБ-110;
- ВЛ-121. ТТ встроенные в выключатель ВБ-110.

Все рассмотренные ТТ прошли проверку.

Кроме того, ТТ были проверены по условию отсутствия опасных перенапряжений во вторичных цепях ТТ.

Определены времена до насыщения трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий и построены временные диаграммы.

Полученное расчетное значение времени до насыщения ТТ меньше значений, установленных в стандарте, поэтому рекомендуется при проведении смежных работ в рамках которых выполняется замена выключателей и ТТ 110 и 220 кВ, использовать ТТ с низким коэффициентом остаточной намагниченности (например, кл. точности 10PR), т.к. при применении ТТ с высоким коэффициентом остаточной намагниченности (кл. точности 10P) возможна неправильная работа устройств РЗА в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ.

Выполнен расчет параметров срабатывания ступенчатых защит ВЛ 110 кВ Северная – Городская с отпайкой на ПС ЖБИ (ВЛ-120).

Для первой, второй и третьей ступеней дистанционной защиты приняты существующие уставки по полному сопротивлению и пересчитаны применимо к шкафу ШЭТ 220.08-0.

Выполнена оценка дальнего резервирования. При междуфазных КЗ за трансформаторами на ПС Городская и ПС ЖБИ обеспечивается дальнейшее резервирование защитами на ПС Северная.

Определены углы наклона характеристик срабатывания реле сопротивления, уставки токовой направленной защиты нулевой последовательности, токовой отсечки, аварийной МТЗ.

Аварийная МТЗ автоматически вводится в работу при блокировке ДЗ и ТНЗНП в случае неисправности в измерительных цепях напряжения.

При проверке коэффициента чувствительности первой ступени аварийной МТЗ при КЗ в начале линии условие $K_q > 1,25$ не выполняется, поэтому первую ступень аварийной МТЗ следует считать частично эффективной при наличии второй ступени, для которой коэффициент чувствительности согласно расчетам составил 2,47, что больше порогового значения в 1,5.

Список используемой литературы

1. Алиев И.И. Электротехника и электрооборудование: учебное пособие для вузов. Саратов: Вузовское образование, 2014. 1199 с.
2. Антонов С.Н. Проектирование электроэнергетических систем: учебное пособие. Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2014. 104 с.
3. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Системы электроснабжения: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015. 46 с. URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2943/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf (дата обращения: 16.10.2024).
4. ГОСТ 34.601-90 Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006921> (дата обращения: 23.09.2024).
5. ГОСТ Р 58669-2019 Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169612> (дата обращения: 30.10.2024).
6. Кудряков А.Г., Сазыкин В.Г. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018. 263 с.
7. Матаев У.М. Практикум по электроэнергетике (в примерах с решениями): учебное пособие. Алматы: Нур-Принт, Казахский национальный аграрный университет, 2014. 195 с.
8. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособие. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2013. 608 с.

9. Ополева Г. Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: учеб. пособие. М. : ИД «ФОРУМ» : ИНФРА-М, 2019. 416 с. URL: <http://znanium.com/catalog/product/1003805> (дата обращения 26.10.2024).

10. Письмо Минэнерго России от 02.04.2019 № ЧА-3440/10 О мерах по недопущению неправильной работы устройств релейной защиты [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/565996025> (дата обращения 15.09.2024).

11. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) [Электронный ресурс]: URL: <http://pue7.ru/pue7/sod.php> (дата обращения 07.09.2024).

12. РД 34.35.310-97 Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200036168> (дата обращения 16.10.2024).

13. РД 153-34.0-20.527-98 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. [Электронный ресурс]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294817/4294817179.pdf> (дата обращения: 16.10.2024).

14. СТО 56947007-29.240.10.028-2009 Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС) [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/898914295> (дата обращения 02.11.2024).

15. СТО 56947007-33.040.20.276-2019 Типовые шкафы ШЭТ РЗА (авто)трансформаторов 110-750 кВ. Архитектура I типа [Электронный ресурс]: URL: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/c4b/pkkcizqersc2vvcatrzpfgncn92cjubd.pdf> (дата обращения 04.11.2024).

16. Техническая информация о ПС 220 кВ Северная [Электронный ресурс]: URL: https://energybase.ru/substation/PS_220_kV_Severnaya-MES-Severo-zapada (дата обращения 04.11.2024).

17. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики

распределительных сетей. СПб.: ПЭИПК, 2003. 350 с.

18. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению: учеб. пособие. 3-е изд. М.: ИНФРА-М, 2019. 136 с. URL: <http://znanium.com/catalog/product/1000152> (дата обращения: 17.09.2024).

19. Antoun C. High Voltage Circuit Breaker and Power Transformer Failure Modes and Their Detection // 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Perth, WA, Australia, 2018, pp. 1-6.

20. Gotte N., Krampert T., Nikolic P.G. Series Connection of Gas and Vacuum Circuit Breakers as a Hybrid Circuit Breaker in High-Voltage Applications // in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 48, no. 7, pp. 2577-2584.

21. Hickey R.B., Robert B. Electrical Engineer's Portable Handbook. USA: McGraw-Hill Companies, 2012. 575 p.

22. Sousa H.F.S., de Oliveira A.C., de Santana H.N., da Costa E.G., Ferreira T.V. Analysis of Alternative Parameters of Dynamic Resistance Measurement in High Voltage Circuit Breakers // 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Athens, Greece, 2018, pp. 1-4.

23. Surya S., Wayne Beaty H. Standard Handbook for Electrical Engineers, Seventeenth Edition. - McGraw Hill Professional, 2017. 368 p.