

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 Модернизация релейной защиты ВЛ 110 кВ с применением микропроцессорных терминалов

Обучающийся

Я.В. Ломакин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, Ю.В. 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 модернизации релейной защиты воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ подстанции Садовая. Дана краткая характеристика подстанции и установленного на ней электрооборудования, а также комплектов основных защит, установленных на линиях. Произведён расчёт характеристик, установленных и планируемых к установке трансформаторов тока и выбраны номинальные параметры проектируемых трансформаторов тока. Выполнена проверка обеспечения требуемой погрешности измерения. Произведен расчёт вторичных цепей трансформаторов тока для устройств РЗА. Выполнены расчёты времени до насыщения трансформаторов тока существующих и проектируемых. Сделаны выводы о необходимости замены существующих трансформаторов тока.

Определены технические требования к системе РЗА и РАС линий, а также решения в части УРОВ 110 кВ.

Рассмотрены вопросы организации питания проектируемого шкафа оперативным током. Выполнен расчет нагрузок в панели управления, от которой получают питание выбранные шкафы защиты. Произведен расчет токов короткого замыкания. Выбраны и проверены проводники, отходящие от панели управления, а также выполнены выбор и проверка защитных аппаратов, включая проверку на падение напряжения.

Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки объёмом 77 страниц, содержит 29 таблиц и 22 рисунка. Список используемых источников содержит 29 наименований, в том числе 5 на английском языке. Графическая часть работы состоит из шести листов, выполненных на формате А1.

Annotation

The bachelor's thesis considers the issues of modernization of relay protection of overhead power transmission lines with a voltage of 110 kV of the Sadovaya substation. A brief description of the substation and the electrical equipment installed on it, as well as sets of main protections installed on the lines, is given. The calculation of the characteristics of the current transformers installed and planned for installation is made, and the nominal parameters of the designed current transformers are selected. A check is performed to ensure the required measurement error. The calculation of the secondary circuits of current transformers for relay protection and automation devices is made. Calculations are made of the time until saturation of current transformers of existing and designed ones. Conclusions are made on the need to replace existing current transformers.

Technical requirements for the relay protection and automation system of lines, as well as solutions in terms of 110 kV breaker failure are determined.

The issues of organizing the power supply of the designed cabinet with operational current are considered. The loads in the control panel from which the selected protection cabinets are powered are calculated. Short-circuit currents are calculated. The conductors coming from the control panel were selected and checked, and the selection and checking of protective devices, including a voltage drop test, were performed. The bachelor's thesis consists of an explanatory note of 77 pages, contains 29 tables and 22 figures. The list of sources used contains 29 titles, 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.....	10
1 Расчет характеристик ТТ.....	14
1.1 Расчет токов короткого замыкания	14
1.2 Расчет характеристик ТТ.....	14
1.2.1 Выбор номинальных параметров, проектируемых ТТ	14
1.2.2 Проверка обеспечения требуемой погрешности ТТ	15
1.2.3 Расчет времени до насыщения ТТ (существующих)	24
1.2.4 Расчет времени до насыщения ТТ (проектируемых).....	33
2 Технические решения по оборудованию РЗА и РАС.....	48
2.1 Основные технические требования к системе РЗА	48
2.2 Технические требования к проектируемым шкафам	50
2.3 Основные технические решения в части РЗА.....	51
2.3.1 Основные решения в части проектируемых устройств РЗА.....	51
2.3.2 Основные решения в части существующих устройств РЗА	53
2.4 Решения в части УРОВ 110 кВ	54
2.5 Организация схемы перевода защиты на ОВМ 110 кВ.....	55
2.6 Решения по организации токовых цепей существующих защит	56
2.7 Организация цепей напряжения	56
2.8 Решения в части РАС.....	57
3 Организация питания проектируемого шкафа оперативным током	60
3.1 Расчет нагрузок	60
3.1.1 Расчет тока нагрузки присоединения	60
3.1.2 Расчет тока нагрузки на шинках ПУ	60
3.2 Выбор и проверка проводников, отходящих от ПУ	61
3.2.1 Расчет сопротивлений кабелей.....	62
3.2.2 Расчет токов КЗ.....	63
3.2.3 Проверка проводника по условию длительного протекания тока	65

3.2.4 Проверка по термической стойкости и невозгораемости кабеля на участке 3	66
3.3 Выбор и проверка защитных аппаратов в ПУ	66
Заключение	71
Список используемой литературы	74

Введение

ПС 220 кВ Садовая расположена на территории Удмуртской республики в г. Ижевск и эксплуатируется с 1962 г Пермским ПМЭС.

«ПС 220кВ Садовая осуществляет транзит, распределение и преобразование напряжения электрической энергии. Данная ПС обеспечивает поставку электроэнергии как близлежащим, так и удаленным потребителям.

Питание подстанции организовано по трем линиям электропередачи ВЛ 220 кВ Удмуртская – Садовая, ВЛ 220 кВ Садовая – Балезино и ВЛ 220 кВ Воткинская ГЭС – Садовая I, II цепь.

В настоящее время на ПС 220 кВ Садовая находятся в эксплуатации» [21]:

- 8 выключателей типа У-220-10-1000 на напряжение 220 кВ;
- 18 выключателей типа МКП-110М на напряжение 110 кВ;
- 1 автотрансформатор типа АДЦТН-125000/220/110/10 с линейно регулировочным трансформатором типа ЛТДН-40000/10;
- 1 автотрансформатор типа АДЦТН-125000/220/110-У1 с линейно регулировочным трансформатором типа ЛТДН-40000/10.

В РУ 10 кВ на ПС установлены следующие выключатели типа:

- МГГ-10;
- ВМГ-133;
- ВМП- 10Э;
- ВМП-10К;
- ВВ/TEL [11].

Схемы электрических соединений ПС:

- ОРУ 220 кВ выполнена по схеме «две рабочие системы шин с обходной»;
- ОРУ 110 кВ выполнена по схеме «две рабочие системы шин с обходной, и ремонтной перемычкой».

Напряжение оперативного тока на подстанции – 220 В постоянного тока.
Напряжение системы собственных нужд 380 В переменного тока.
Ситуационный план ПС 220 кВ Садовая представлен на рисунке 1.

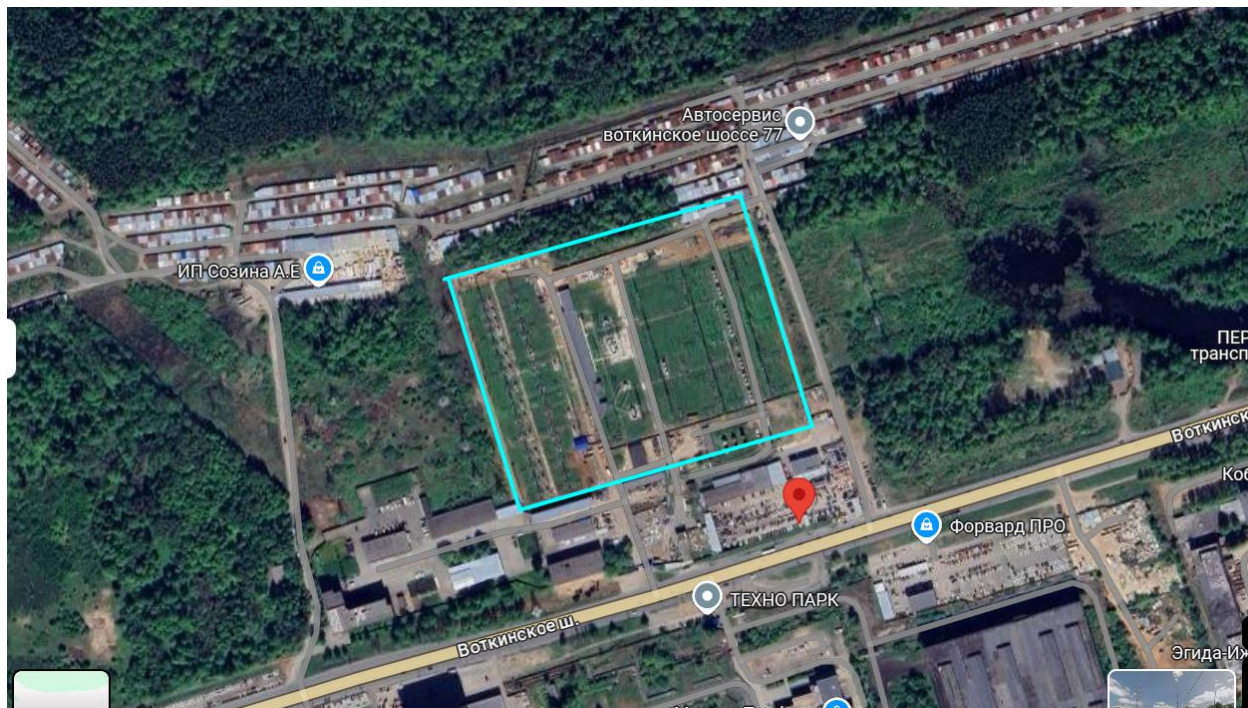


Рисунок 1 – Ситуационный план ПС 220 кВ Садовая

В данной работе рассматриваются вопросы установки второго комплекта основных защит ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая-1,2,3,4.

Установка второго комплекта основных защит ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая – 1 предполагает установку первичного оборудования в ячейке данной линии на ОРУ 110 кВ:

- разделительный фильтр (ф. А);
- встроенные трансформаторы тока 110 кВ (ф. А, В, С).

Установка второго комплекта основных защит ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая – 2 предполагает установку первичного оборудования в ячейке данной линии на ОРУ 110 кВ:

- КС 110 кВ (ф. В);
- ВЧЗ 110 кВ с элементом настройки (ф. В);

- ФП (ф. В);
- разъединителя 10 кВ (ф. В);
- встроенные трансформаторы тока 110 кВ (ф. А, В, С).

Установка второго комплекта основных защит ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая – 3 предполагает установку первичного оборудования в ячейке данной линии на ОРУ 110 кВ:

- КС 110 кВ (ф. В);
- ВЧЗ 110 кВ с элементом настройки (ф. В) [23];
- ФП (ф. В);
- разъединителя 10 кВ (ф. В);
- встроенные трансформаторы тока 110 кВ (ф. А, В, С).

Установка второго комплекта основных защит ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая – 4 предполагает установку первичного оборудования в ячейке данной линии на ОРУ 110 кВ:

- ВЧЗ 110 кВ с элементом настройки (ф. А);
- ФП (ф. А);
- разъединителя 10 кВ (ф. А);
- встроенные трансформаторы тока 110 кВ (ф. А, В, С).

В результате реконструкции главная схема ПС 220 кВ Садовая не изменится.

Установка второго комплекта основных защит ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая – 1,2,3,4 предполагает:

- установку в помещении ОПУ ПС 220 кВ Садовая четырех шкафов второго комплекта основных защит ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая – 1,2,3,4 (ДФЗ+СЗ);
- замену внешних кабельных связей между существующими и реконструируемыми устройствами РЗА, СОПТ, а также прокладку новых между существующим, реконструируемым и проектируемым оборудованием.

- модернизацию существующего оборудования РЗА в объеме данной работы.

Цель бакалаврской работы заключается в повышении надежности функционирования линий электропередач 110 кВ ПС Садовая и снижение негативных последствий возможных аварийных ситуаций на ЛЭП.

Для достижения поставленной в данной бакалаврской работе цели в работе будут решены следующие задачи:

- произведен расчет характеристик ТТ с учетом изменений, вызываемых процессом насыщения при КЗ;
- определены технические решения по оборудованию РЗА и регистратору аварийных событий;
- произведен расчет системы оперативного постоянного тока на подстанции.

Перечень сокращений и обозначений

«АИИС КУЭ - автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учёта электроэнергии;

АЧР - автоматическая частотная разгрузка;

АДР - автоматика дополнительной разгрузки;

АОПО - автоматика ограничения перегрузки оборудования;

АРЛ - автоматика разгрузки линии;

АПВ - автоматическое повторное включение;

АРМ - автоматизированное рабочее место;

АСУ ТП - автоматизированная система управления технологическим процессом;

АТ – автотрансформатор;

АУ - автоматическое ускорение;

АУВ - автоматика управления выключателем;

ВЛ - воздушная линия электропередачи;

ВН - высшее напряжение;

ВОЛС - волоконно-оптическая линия связи;

ВОК - волоконно-оптический кабель;

ВЧ - высокочастотный (-ая);

ВЧБ - высокочастотная блокировка дистанционных и токовых защит;

ГОСТ - государственный стандарт» [18];

ДЗ - дистанционная защита;

ДЗЛ - продольная дифференциальная защита;

ДЗО - дифференциальная защита ошиновки;

ДЗТ - дифференциальная защита (авто)трансформатора;

ДЗШ - дифференциальная защита шин;

ДФЗ - дифференциально-фазная защита;

«ЗП - защита от перегрузки;

ЗПН - защита от повышения напряжения;

ИМП - импульсное магнитное поле;

ИО - измерительный орган;

ИТС - информационно-технологическая система;

КВЛ - кабельно-воздушная линия;

КЗ - короткое замыкание;

КИ - контроль изоляции;

КИВ - контроль изоляции вводов;

КЛ - кабельная линия электропередачи;

КН - контроль напряжения;

КНН - контроль наличия напряжения;

КП - контроллер присоединения;

КРУЭ - комплектное распределительное устройство элегазовое;

КС - контроль синхронизма;

КСЗ - комплект ступенчатых защит;

КСЗ РС - комплект ступенчатых защит с передачей разрешающих сигналов;

КСН - контроль синхронизма и напряжения;

ЛР - линейный разъединитель;

ЛЭП - линия электропередачи;

МП – микропроцессорный;

МТЗ - максимальная токовая защита;

МТЗ/U - максимальная токовая защита с пуском по напряжению;

МФТО - междуфазная токовая отсечка;

МЭК - международная электротехническая комиссия;

НВЧЗ - направленная высокочастотная фильтровая защита;

НН - низшее напряжение;

НТД - нормативно техническая документация;

ОМП - определение места повреждения;

ОПУ - общеподстанционный пункт управления;

ОРУ - открытое распределительное устройство;

ОСШ - обходная система шин;
ОТФ - отключение трех фаз;
ОУ - оперативное ускорение;
ПА - противоаварийная автоматика;
ПП – приемопередатчик;
ПС – подстанция;
ПТК - программно-технический комплекс;
ПУЭ - Правила устройства электроустановок;
РАС - регистрация аварийных событий;
РД - руководящий документ;
РЗА - релейная защита и автоматика;
РПН - регулирование под напряжением;
РУ - распределительное устройство;
СВ - секционный выключатель;
СЗ - ступенчатые защиты;
СН - среднее напряжение;
СО - стандарт организации;
СОПТ - система оперативного постоянного тока;
СТО - стандарт отрасли;
СШ - система шин;
СУП - система уравнения потенциалов;
СФС - структурно-функциональная схема;
СЭП - схема электрическая принципиальная;
Т – трансформатор;
Т(Н)ЗНП - токовая (направленная) защита нулевой последовательности»
[22];
ТАПВ - трехфазное автоматическое повторное включение;
ТН - трансформатор напряжения;
ТО – телеотключение;
ТСН - трансформатор собственных нужд;

ТТ - трансформатор тока;
ТУ – телеускорение;
УЗИП - устройство защиты от импульсных перенапряжений;
УПАСК - устройство передачи аварийных сигналов и команд;
УРОВ - устройство резервирования отказа выключателя;
«УРП - устройство разгрузки присоединений;
УС - улавливание синхронизма;
УТАПВ - ускоренное трехфазное автоматическое повторное включение;
ФОВ - фиксация отключенного состояния выключателя;
ФОЛ - фиксация отключенного состояния линии;
ФП - фильтр присоединения;
ЦКС - цифровой канал связи;
ЧДА - частотно-делительная автоматика;
ШОН - шкаф отбора напряжения;
ЭМВ - электромагнит включения;
ЭМИ - электромагнитный импульс;
ЭМО - электромагнит отключения» [12];
ЭМС - электромагнитная совместимость.

1 Расчет характеристик ТТ

1.1 Расчет токов короткого замыкания

В настоящей работе принимаются значения токов КЗ по данным предоставленным сотрудниками ПС Садовая.

«Значения токов КЗ на шинах 110 кВ Ижевской ТЭЦ-2 и в прилегающей сети приведены в таблице 1» [21].

Таблица 1 – Токи КЗ на шинах Ижевской ТЭЦ-2 и прилегающей сети

Объект (Шины)	Тип выключателя	Коммутационная способность выключателя, кА	РУ	Ток КЗ ⁽³⁾ , кА	Ток КЗ ⁽¹⁾ , кА
Ижевская ТЭЦ-2	У-110-2000-40 ВЭБ-110 П-40/2500	40	110 кВ	28,203	28,878
Ижевская ТЭЦ-1	F-35-СВ4	40	110 кВ	24,023	26,769
ПС 220 кВ Садовая	У-220-10	26,3	220 кВ	18,246	18,772
	МКП-110М/630	31,5	110 кВ	28,356	29,211
ПС 220 кВ Позимь	У-220 ВМТ-220Б	25	220 кВ	17,624	15,336
	У-110/2000	40	110 кВ	21,124	20,414
ПС 110 кВ Союзная	ВЭБ-110	40	110 кВ	20,285	16,452

1.2 Расчет характеристик ТТ

1.2.1 Выбор номинальных параметров, проектируемых ТТ

Выводы раздела 1 выявили необходимость установки дополнительных ТТ в ячейках ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая – 1,2,3,4.

Были определены номинальные характеристики предусматриваемых к установке ТТ. Характеристики приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Номинальные характеристики проектируемых ТТ

Параметр	Выбранное значение	Условие выбора
Коэффициент трансформации	1000/1	$I_{нагр.макс} < I_{ном.ТТ}$
Классточности	10PR	*
«Номинальная мощность вторичной обмотки	30 ВА	*
Номинальная предельная кратность вторичного тока	30	*
Количество вторичных обмоток	1	Соответствие заданию» [9]

Характеристики, отмеченные знаком *, выбираются для обеспечения требований, сформулированных производителями устройств РЗА – время до насыщения ТТ не должно быть меньше 5 мс.

Также, необходимо принять сечение контрольных кабелей токовых цепей для подключения к схеме перевода защит на ОВМ 110 кВ – 12мм².

Для выбранных трансформаторов тока необходимо провести проверку номинальных характеристик.

1.2.2 Проверка обеспечения требуемой погрешности ТТ

«Все трансформаторы тока, предназначенные для питания токовых цепей устройств релейной защиты, должны удовлетворять требованиям:

- обеспечить точную работу измерительных органов токовых и дистанционных защит (направленных и ненаправленных), погрешность ТТ не должна превышать 10%;
- не допускать при КЗ в начале зоны повышения напряжения на выводах вторичной обмотки ТТ для цепей защиты и измерения $I_{2\text{ тах}} \leq I_{2\text{ доп.}}$

Расчет произведен на основании 5916тм-т1 «Рекомендации по расчету сечений жил контрольных кабелей в токовых цепях релейной защиты»» [16].

Результирующая расчетная кратность вычисляется как:

$$K_{\text{расч}} \text{ при } (K_{\text{макс}} / A) < K_{\text{расч}}, \quad (1)$$

или

$$\ll K_{\text{макс}} / A \text{ при } K_{\text{макс}} / A > K_{\text{расч}}, \quad (2)$$

Допустимая вторичная нагрузка на ТТ определяется по кривым предельной кратности, при их отсутствии определяется по выражению:

$$r_{\text{доп}} = \frac{K_{10\text{ном}}}{K_{\text{рез}}} \cdot \left(\frac{S_{\text{ном}}}{I_2^2} + Z_2 \right) - Z_2. \quad (3)$$

Расчетные выражения для определения сопротивления вторичных цепей ТТ приведены в таблицах 3 и 4» [16].

Таблица 3 - Расчетные выражения для определения сопротивления вторичных цепей ТТ (допустимое сопротивление кобеля)

Схема соединения ТТ	Допустимое сопротивление кобеля	
	Трехфазное КЗ	Однофазное КЗ
Полная звезда	$\Gamma_{\text{пр}} = \Gamma_{\text{доп.}} - \Gamma_{\text{р.ф.}} - \Gamma_{\text{пер.}}$	$\Gamma_{\text{пр}} = (\Gamma_{\text{доп.}} - \Gamma_{\text{р.ф.}} - \Gamma_{\text{р.0}} - \Gamma_{\text{пер.}}) / 2$
Неполная звезда	$\Gamma_{\text{пр}} = (\Gamma_{\text{доп.}} - \Gamma_{\text{р.ф.}} - \Gamma_{\text{р.0}} - \Gamma_{\text{пер.}}) / \sqrt{3}$	-
Треугольник	$\Gamma_{\text{пр}} = (\Gamma_{\text{доп.}} - 3 \cdot \Gamma_{\text{р.ф.}} - \Gamma_{\text{пер.}}) / 3$	$\Gamma_{\text{пр}} = (\Gamma_{\text{доп.}} - 2 \cdot \Gamma_{\text{р.ф.}} - \Gamma_{\text{пер.}}) / 2$
Треугольник с дв-я реле	$\Gamma_{\text{пр}} = (\Gamma_{\text{доп.}} - 3 \cdot \Gamma_{\text{р.ф.}} - \Gamma_{\text{пер.}}) / 3$	-

Таблица 4 - Расчетные выражения для определения сопротивления вторичных цепей ТТ (фактическое сопротивление кобеля)

Схема соединения ТТ	Фактическое сопротивление кобеля	
	Трехфазное КЗ	Однофазное КЗ
Полная звезда	$r_{\text{н}} = \Gamma_{\text{пр.}} + \Gamma_{\text{р.ф.}} + \Gamma_{\text{пер.}}$	$\Gamma_{\text{н}} = 2 \cdot \Gamma_{\text{пр.}} + \Gamma_{\text{р.ф.}} + \Gamma_{\text{р.0}} + \Gamma_{\text{пер.}}$
Неполная звезда	$r_{\text{н}} = \sqrt{3} \cdot \Gamma_{\text{пр.}} + \Gamma_{\text{р.ф.}} + \Gamma_{\text{р.0}} + \Gamma_{\text{пер.}}$	-
Треугольник	$r_{\text{н}} = 3 \cdot \Gamma_{\text{пр.}} + 3 \cdot \Gamma_{\text{р.ф.}} + \Gamma_{\text{пер.}}$	$\Gamma_{\text{н}} = 2 \cdot \Gamma_{\text{пр.}} + 2 \cdot \Gamma_{\text{р.ф.}} + \Gamma_{\text{пер.}}$
Треугольник с дв-я реле	$r_{\text{н}} = 3 \cdot \Gamma_{\text{пр.}} + 3 \cdot \Gamma_{\text{р.ф.}} + \Gamma_{\text{пер.}}$	-

Расчетное выражение для определения сечения проводника:

$$S_{расч} = \frac{l_{действ}}{\gamma \cdot r_{пр}}. \quad (4)$$

Расчетное выражение для определения расчетной длины вторичных цепей в зависимости от принятого сечения:

$$l_{расч} = S \cdot \frac{l_6}{2,5}. \quad (5)$$

В таблицу 5 заносим данные о мощностях, потребляемых приборами.

Таблица 5 - Мощность, потребляемая приборами

Номинальный ток ТТ	1 А	5 А
Функции РЗА	S приборов и реле, ВА	S приборов и реле, ВА
ШЭТ – 220.02 – 0	0,5	0,5

Расчет вторичных цепей ТТ 110 кВ для устройств РЗА представлен в таблице 6.

В таблице 7 приведен расчет постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ.

В таблице 8 приведен расчет параметра режима А.

Таблица 6 - Расчет вторичных цепей ТТ 110 кВ для устройств РЗА

№ ТТ	Место установки ТТ; Защищаемый объект; Тип защит (устройство РЗА); Схема соединения ТТ	Номинальные данные ТТ					Материал кабеля	Расчетная точка КЗ	Ток короткого замыкания, А расчетный	Расчетная кратность первичного тока
		ТТ	$K_{\text{ТТ}}$	$S_{\text{ном}}$	$K_{10\text{ном}}$	Z_2			$I_{\text{расч.}}$	$K_{\text{расч.}}$
4ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-1 ВЛ 110 кВ ШЗТ 220.02-0 Полная звезда	ТВ-110	1000/5	20 ВА	30	0,54 Ом	Cu	КЗ сразу за ТТ 110 кВ со стороны присоединения	Трехфазное КЗ - 25289 Однофазное КЗ - 25424	25289/1000 = 25,3 25424/1000 = 25,4
4ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-2 ВЛ 110 кВ ШЗТ 220.02-0 Полная звезда	ТВ-110	1000/5	20 ВА	30	0,54 Ом	Cu	КЗ сразу за ТТ 110 кВ со стороны присоединения	Трехфазное КЗ - 25289 Однофазное КЗ – 25424	25289/1000 = 25,3 25424/1000 = 25,4
4ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-3 ВЛ 110 кВ ШЗТ 220.02-0 Полная звезда	ТВ-110	1000/5	20 ВА	30	0,54 Ом	Cu	КЗ сразу за ТТ 110 кВ со стороны присоединения	Трехфазное КЗ - 25289 Однофазное КЗ – 25424	25289/1000 = 25,3 25424/1000 = 25,4
4ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-4 ВЛ 110 кВ ШЗТ 220.02-0 Полная звезда	ТВ-110	1000/5	20 ВА	30	0,54 Ом	Cu	КЗ сразу за ТТ 110 кВ со стороны присоединения	Трехфазное КЗ - 25289 Однофазное КЗ – 25424	25289/1000 = 25,3 25424/1000 = 25,4
ТА6	ОВМ 110 кВ ВЛ 110 кВ ШЗТ 220.02-0 Полная звезда	ТВ-110	1000/5	25 ВА	30	0,54 Ом	Cu	КЗ сразу за ТТ 110 кВ со стороны присоединения	Трехфазное КЗ - 25289 Однофазное КЗ - 25424	25289/1000 = 25,3 25424/1000 = 25,4

Продолжение таблицы 6

№ ТТ	$f_{\max}, \%$	Расчетный параметр	Рез-ая кратность	$Z_{\text{н.доп}}, \text{Ом}$	R приборов и реле, Ом		Переходное сопротивление, Ом	Расчет сечения по условию $f < 10\% \text{ ТТ}$		Длина цепей, м
					в «фазе»	в «нуле»		Допустимое сопротивление кабеля, Ом	Базисная длина, м	
	f	A			$\Gamma_{\text{р.ф.}}$	$\Gamma_{\text{р.0}}$	$\Gamma_{\text{пер.}}$	$\Gamma_{\text{пр.}}$	$l_0 = 143 \times \Gamma_{\text{пр.}}$	$l_{\text{дейст}}$
4ТТ	10	1,2	25,29	1,05	0,02	0,00	0,05	$1,05-0,02-0,05=0,98$	$143 \times 0,98=140,14$	140
			25,42	1,04				$(1,04-0,02-0-0,05)/2=0,486$	$143 \times 0,49=69,5$	
4ТТ	10	1,2	25,29	1,05	0,02	0,00	0,05	$1,05-0,02-0,05=0,98$	$143 \times 0,98=140,14$	210
			25,42	1,04				$(1,04-0,02-0-0,05)/2=0,486$	$143 \times 0,49=69,5$	
4ТТ	10	1,2	25,29	1,05	0,02	0,00	0,05	$1,05-0,02-0,05=0,98$	$143 \times 0,98=140,14$	260
			25,42	1,04				$(1,04-0,02-0-0,05)/2=0,486$	$143 \times 0,49=69,5$	
4ТТ	10	1,2	25,29	1,05	0,02	0,00	0,05	$1,05-0,02-0,05=0,98$	$143 \times 0,98=140,14$	270
			25,42	1,04				$(1,04-0,02-0-0,05)/2=0,486$	$143 \times 0,49=69,5$	
ТА6	10	1,2	25,29	1,29	0,02	0,00	0,05	$1,29-0,02-0,05=1,217$	$143 \times 1,22=174,03$	240
			25,42	1,28				$(1,28-0,02-0-0,05)/2=0,604$	$143 \times 0,6=86,37$	

Продолжение таблицы 6

№ ТТ	Расчет сечения по условию термической стойкости			
	Максимальный вторичный ток, А	Время РЗ, с	Максимально допустимый тепловой импульс приборов и реле	Расчетное значение теплового импульса
	$I_2 = I_{K3} / K_{ТТ}$	$t_{сз}$	$B_K = (I_{2max}^2 \cdot t_{тер})^{0,5}$	$B_K = (I_2^2 \cdot (t_{сз} + t_{откл.Q}))^{0,5}$
4ТТ	$\frac{25424}{1000/5} = 127$	0,05	$(200^2 \times 1)^{0,5} = 200$	$(127,12^2 \times (0,05+0,1))^{0,5} = 49,23$ Режим допустим
4ТТ	$\frac{25424}{1000/5} = 127$	0,05	$(200^2 \times 1)^{0,5} = 200$	$(127,12^2 \times (0,05+0,1))^{0,5} = 49,23$ Режим допустим
4ТТ	$\frac{25424}{1000/5} = 127$	0,05	$(200^2 \times 1)^{0,5} = 200$	$(127,12^2 \times (0,05+0,1))^{0,5} = 49,23$ Режим допустим
4ТТ	$\frac{25424}{1000/5} = 127$	0,05	$(200^2 \times 1)^{0,5} = 200$	$(127,12^2 \times (0,05+0,1))^{0,5} = 49,23$ Режим допустим
ТА6	$\frac{25424}{1000/5} = 127$	0,05	$(200^2 \times 1)^{0,5} = 200$	$(127,12^2 \times (0,05+0,1))^{0,5} = 49,23$ Режим допустим

Продолжение таблицы 6

№ ТТ	Расчет сечения по условию термической стойкости	Напряжение на вторичных зажимах трансформатора тока, В	Сечение, мм ² / наибольшая длина, м
	Расчетное $S_{\min\text{доп}}$, мм ²		
	$S_{\min} = B_K / C_T$		
4ТТ	200 / 120 = 1,67	$U_2 = K_{уд} \cdot (I_{K3}/K_{ТТ}) \cdot z_{н.макс} \leq 2000, K_{уд} = 2$ $2 \times 25289 \times 0,43 / (1000/1000) = 108,5$	140 / (57 × 0,486) = 5,04 не меньше - 6
		$2 \times 25424 \times 0,84 / (1000/5) = 213,23$	
4ТТ	200 / 120 = 1,67	$2 \times 25289 \times 0,63 / (1000/1000) = 160,3$	210 / (57 × 0,486) = 7,56 не меньше - 2×4
		$2 \times 25424 \times 1,25 / (1000/5) = 317,31$	
4ТТ	200 / 120 = 1,67	$2 \times 25289 \times 0,78 / (1000/1000) = 197,3$	260 / (57 × 0,486) = 9,36 не меньше - 2×6
		$2 \times 25424 \times 1,54 / (1000/5) = 391,65$	
4ТТ	200 / 120 = 1,67	$2 \times 25289 \times 0,81 / (1000/1000) = 204,1$	270 / (57 × 0,486) = 9,72 не меньше - 2×6
		$2 \times 25424 \times 1,6 / (1000/5) = 406,52$	
ТА6	200 / 120 = 1,67	$2 \times 25289 \times 0,37 / (1000/1000) = 93,7$	240 / (57 × 0,604) = 6,95 не меньше - 2×4
		$2 \times 25424 \times 0,72 / (1000/5) = 183,5$	

Таблица 7 - Расчет постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ

№ ТТ	Место установки ТТ	Расчетные эквивалентные сопротивления						Расчетные постоянные времени затухания апериодической составляющей	
								$T_{р\text{э}кв3} = X_{\text{э}кв1} / (\omega \cdot R_{\text{э}кв1}),$ $T_{р\text{э}кв1} = (X_{\text{э}кв1} + X_{\text{э}кв2} + X_{\text{э}кв0}) / (\omega \cdot R_{\text{э}кв1} + R_{\text{э}кв2} + R_{\text{э}кв0})$	
		$R_{\text{э}кв1}$	$R_{\text{э}кв2}$	$R_{\text{э}кв0}$	$X_{\text{э}кв1}$	$X_{\text{э}кв2}$	$X_{\text{э}кв0}$	$T_{р\text{э}кв3}, \text{ мс}$	$T_{р\text{э}кв1}, \text{ мс}$
		Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом		
4ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-1	0,237	0,25	0,287	2,425	2,531	2,347	32,59	30,05
4ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-2	0,237	0,25	0,287	2,425	2,531	2,347	32,59	30,05
4ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-3	0,237	0,25	0,287	2,425	2,531	2,347	32,59	30,05
4ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-4	0,237	0,25	0,287	2,425	2,531	2,347	32,59	30,05
ТА6	ОВМ 110 кВ	0,237	0,25	0,287	2,425	2,531	2,347	32,59	30,05

где $X_{\text{э}кв1}$ – эквивалентное реактивное сопротивление сети прямой последовательности, Ом;

$X_{\text{э}кв2}$ - эквивалентное реактивное сопротивление сети обратной последовательности, Ом;

« $X_{\text{э}кв0}$ - эквивалентное реактивное сопротивление сети нулевой последовательности, Ом;

$R_{\text{э}кв1}$ - эквивалентное активное сопротивление сети прямой последовательности, Ом;

$R_{\text{э}кв2}$ - эквивалентное активное сопротивление сети обратной последовательности, Ом;

$R_{\text{э}кв0}$ - эквивалентное активное сопротивление сети нулевой последовательности, Ом» [15];

ω – частота, рад/с.

Таблица 8 - Расчет параметра режима А

№ ТТ	Место установки ТТ	Номинальные параметры										Расчетные значения			
		Приня тое сеч.	$I_{1ном}$	$K_{ном}$	$I_{кз}$ 3×Φ	$I_{кз}$ 1×Φ	Z_2	$Z_{номТ}$ Т	$Z_{нагр}$ 3×Φ	$Z_{нагр}$ 1×Φ	$K_{пр}$	A3 (без ОН)	A3 (с уч. ОН)	A1 (без ОН)	A1 (с уч. ОН)
		мм ²	А	о.е.	А	А	Ом	Ом	Ом	Ом	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.
		$A = (I_{1ном} \cdot K_{ном} \cdot (Z_2 + Z_{номТТ})) / (I_{кз} \cdot (Z_2 + Z_{нагр})), A_{он} = A \cdot (1 - K_{пр})$													
4ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-1	12	1000	30	25289	25424	0,54	0,8	0,27	0,48	0,86	1,96	0,27	1,55	0,22
4ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-2	12	1000	30	25289	25424	0,54	0,8	0,38	0,68	0,86	1,73	0,24	1,3	0,18
4ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-3	12	1000	30	25289	25424	0,54	0,8	0,45	0,83	0,86	1,61	0,23	1,15	0,16
4ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-4	12	1000	30	25289	25424	0,54	0,8	0,46	0,86	0,86	1,59	0,22	1,13	0,16
ТА6	ОВМ 110 кВ	12	1000	30	25289	25424	0,54	1	0,42	0,77	0,86	1,9	0,27	1,39	0,19

где « $I_{ном}$ - номинальный ток первичной обмотки ТТ, А;

$K_{ном}$ - номинальная предельная кратность ТТ, о.е.;

$I_{кз}$ - расчётный ток трехфазного (однофазного) КЗ, А;

Z_2 - полное сопротивление вторичной обмотки ТТ, Ом;

$Z_{номТТ}$ – номинальное сопротивление вторичной нагрузки обмотки ТТ, Ом;

$Z_{нагр}$ - полное сопротивление внешней вторичной нагрузки, подключенной к ТТ, Ом» [2];

$K_{пр}$ - коэффициент, учитывающий остаточную намагниченность сердечника, для ТТ с к.т. 10Р принимается 0,86, для ТТ с к.т. 10PR принимается 0,1.

1.2.3 Расчет времени до насыщения ТТ (существующих)

Расчет проводится на основании ГОСТ Р 58669–2019 «Трансформаторы тока измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока» [6].

Возможные риски приводятся на основании ЭКРА.650323.085 Д «Методические указания по проверке и выбору трансформаторов тока» [24]. Ввиду того, что с противоположного конца ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 1,2,3,4 предусмотрены шкафы типа ШЭ2607 083 производства НПП «ЭКРА», поэтому другие производители РЗА в настоящей работе не рассматриваются. Расчетные условия проверки для устанавливаемых защит выбирались на основании ЭКРА.650323.085 Д.

Расчёт времени до насыщения ТТ проводился графическим методом в следующем порядке.

Проводилось построение кривой зависимости переходного коэффициента K_p от времени на интервале $[0, 0,05]$ сек. по уравнению Г.23 (ГОСТ Р 58669-2019) и с учетом допущений, описанных в указанном пункте.

Проводилось построение рассчитанных в таблице 8 параметров режима А и нахождение точек пересечения с кривой зависимости переходного коэффициента K_p от времени согласно уравнения Г.25 (ГОСТ Р 58669-2019) [6]. Графической интерпретацией нахождения времени является спуск перпендикуляра из точки пересечения прямых и кривой на ось времени.

Важное замечание - построение кривой зависимости переходного коэффициента K_p выполняется на интервале $[0, 0,05]$ сек., следовательно, для случаев, когда расчётное значение параметра режима А больше, чем значение коэффициента K_p в момент времени 0,05 сек, на графике строятся соответствующие прямые $A = K_p$ и указывается точка насыщения 0,05 сек, что означает, что момент насыщения наступает позже, или не наступает [28].

На рисунке 2 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 1 при 3хф КЗ с указанием насыщения.

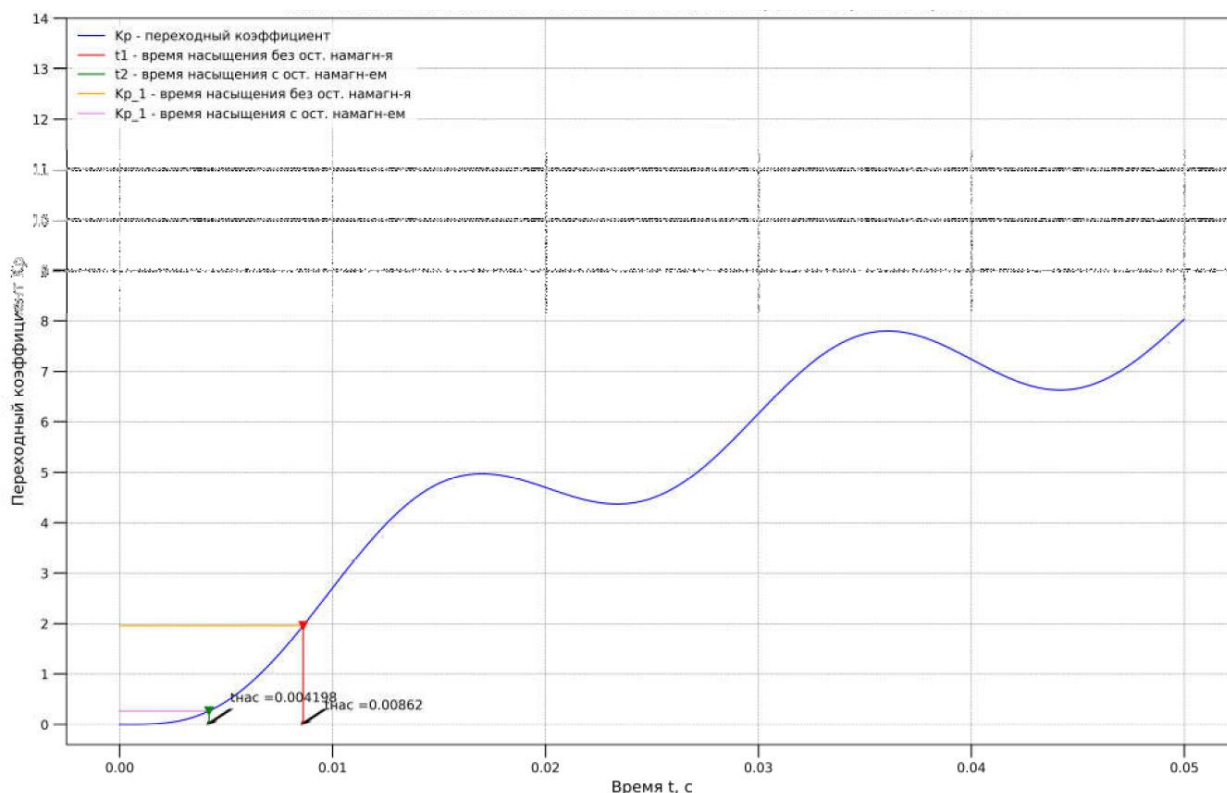


Рисунок 2 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 1 при 3хф КЗ с указанием насыщения

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,00862$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,004198$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 3 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 1 при 1ф КЗ с указанием точек насыщения.

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,007859$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,003963$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 4 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 2 при 3хф КЗ с указанием насыщения.

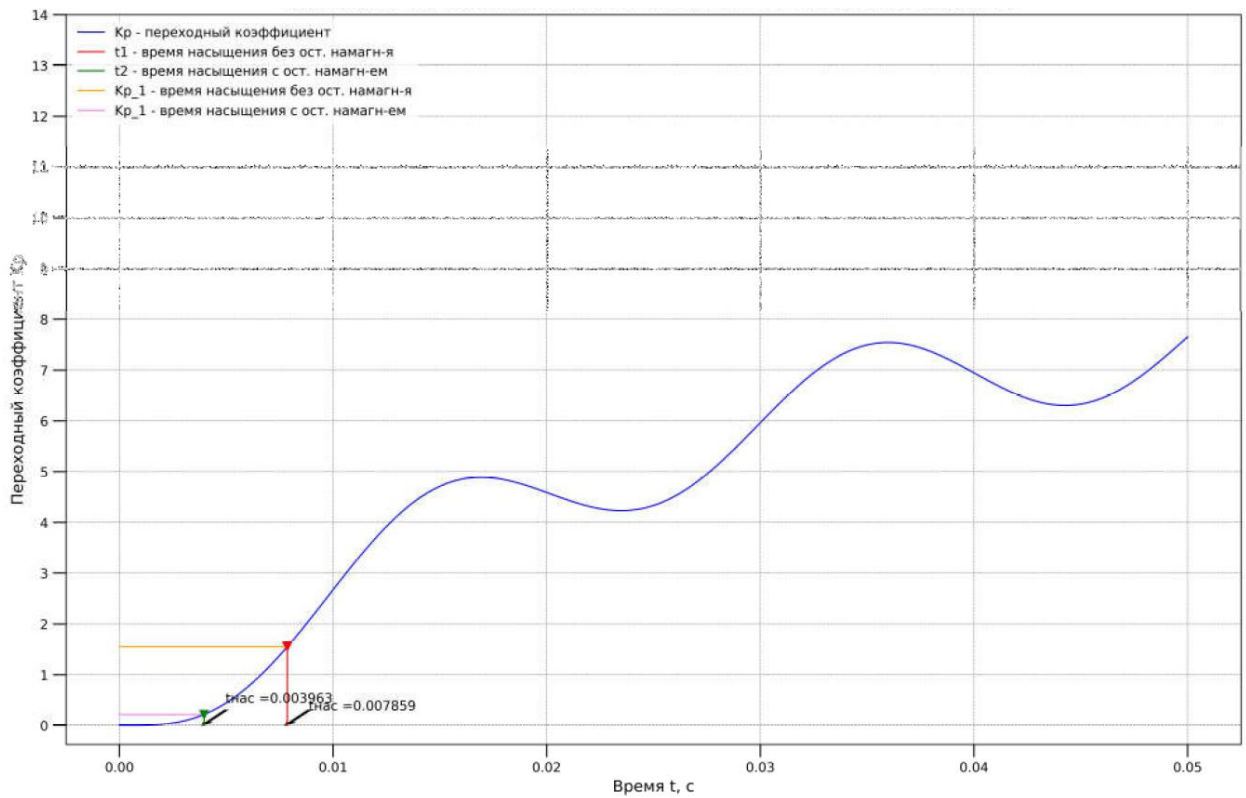


Рисунок 3 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 1 при 1ф КЗ с указанием насыщения

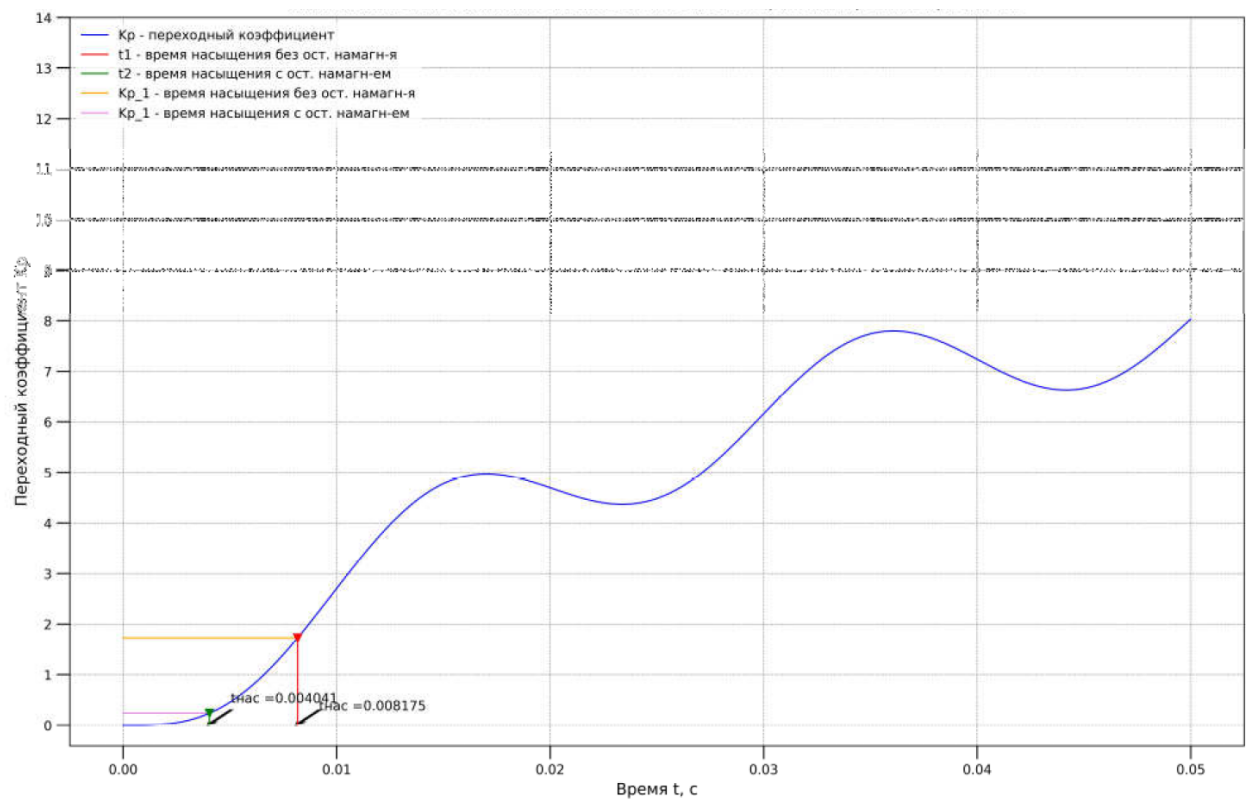


Рисунок 4 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 2 при 3хф КЗ с указанием насыщения

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,008175$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,004041$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 5 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 2 при 1ф КЗ с указанием точек насыщения.

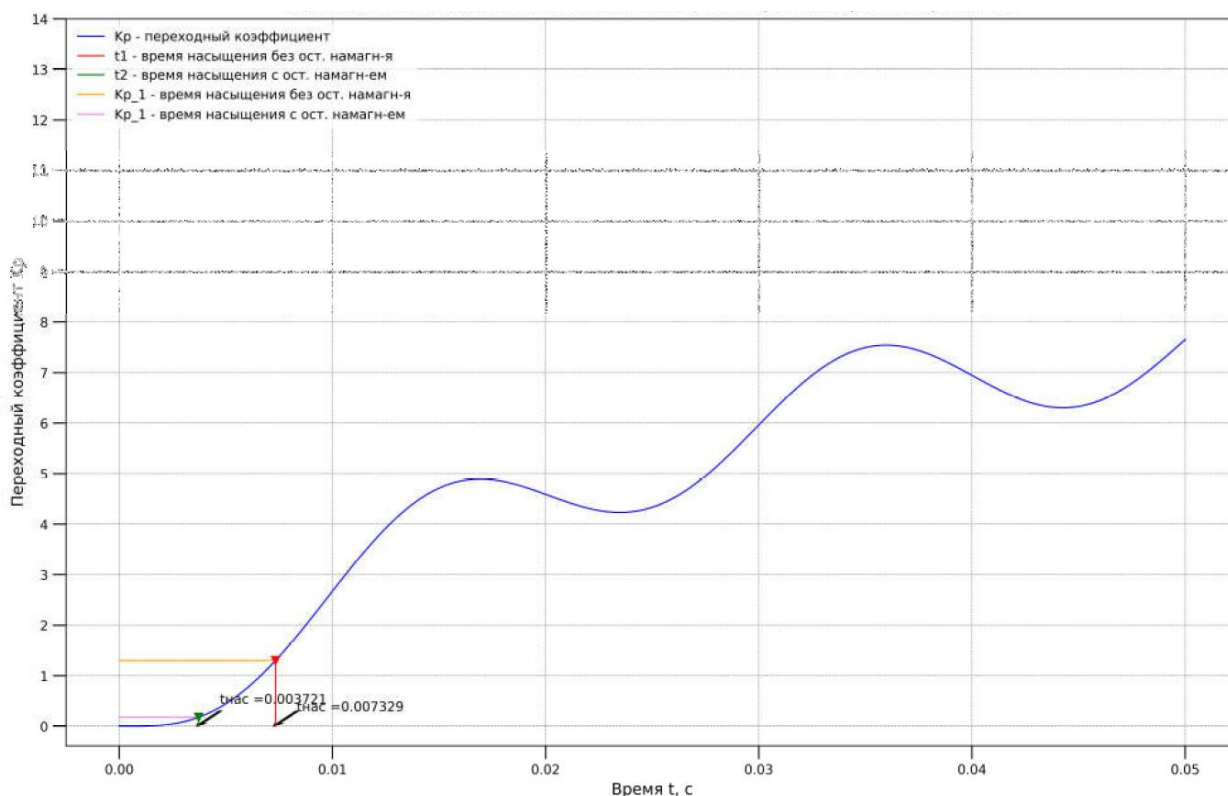


Рисунок 5 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 2 при 1ф КЗ с указанием насыщения

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,007329$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,003721$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 6 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 3 при 3хф КЗ с указанием насыщения.

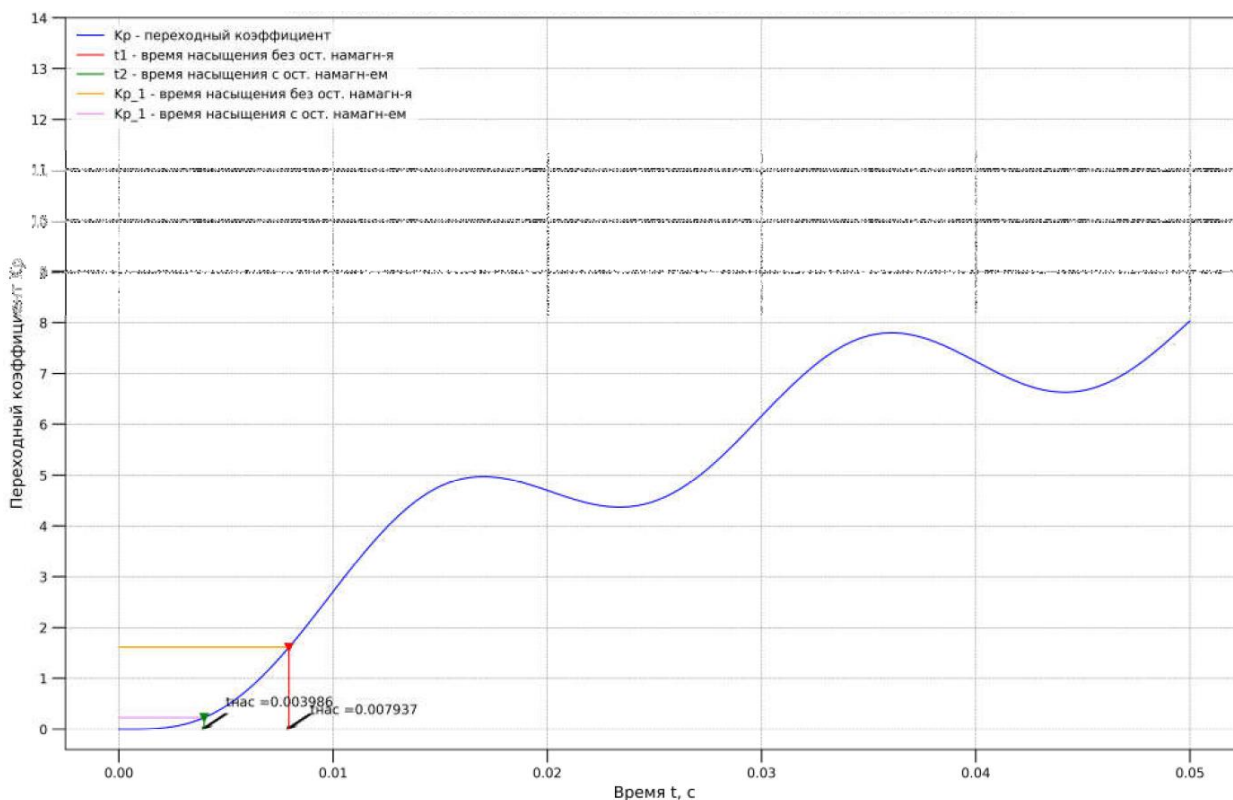


Рисунок 6 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 3 при 3хф КЗ с указанием насыщения

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,007937$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,003986$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 7 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 3 при 1ф КЗ с указанием точек насыщения.

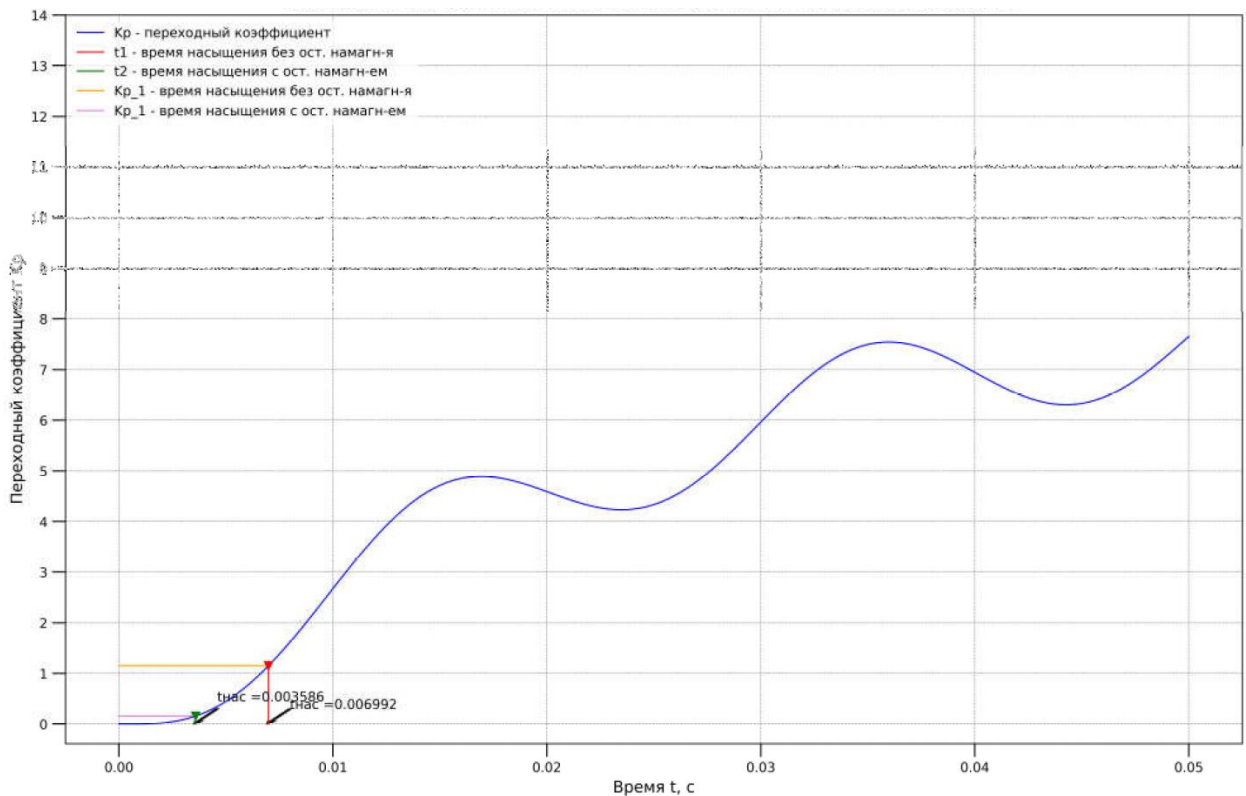


Рисунок 7 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 3 при 1ф КЗ с указанием насыщения

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,006992$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,003589$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 8 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 4 при 3хф КЗ с указанием насыщения.

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,007896$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,00393$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 9 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 4 при 1ф КЗ с указанием точек насыщения.

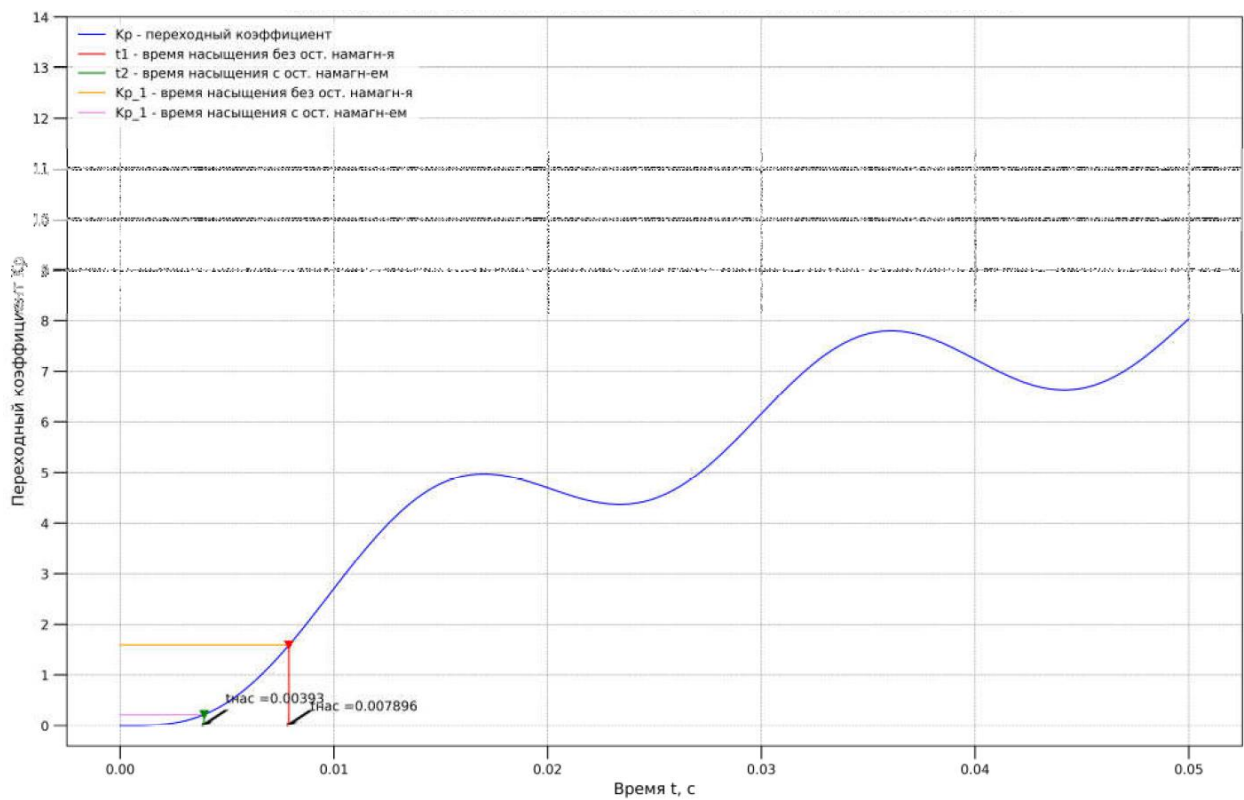


Рисунок 8 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 4 при 3хф КЗ с указанием насыщения

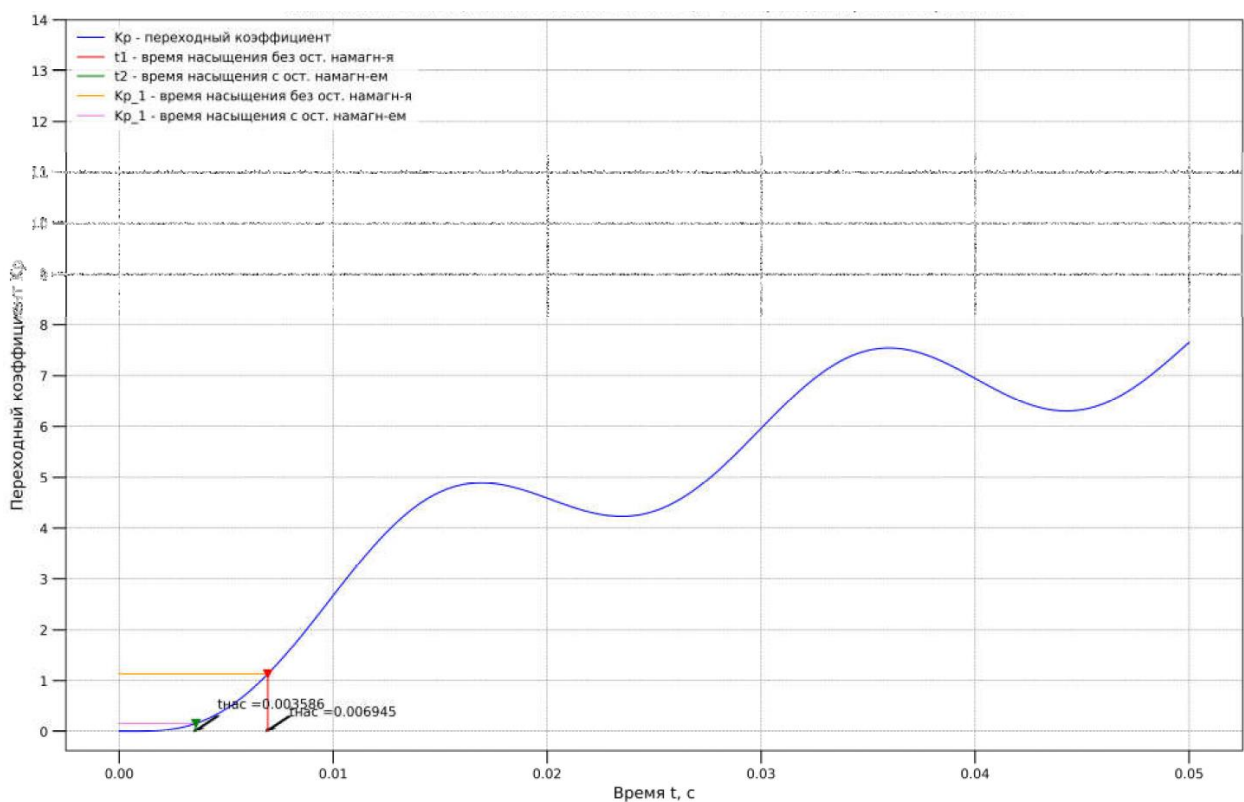


Рисунок 9 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 4ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 4 при 1ф КЗ с указанием насыщения

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,006945$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,003586$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 10 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для ТА6 ОВМ при 3хф КЗ с указанием насыщения.

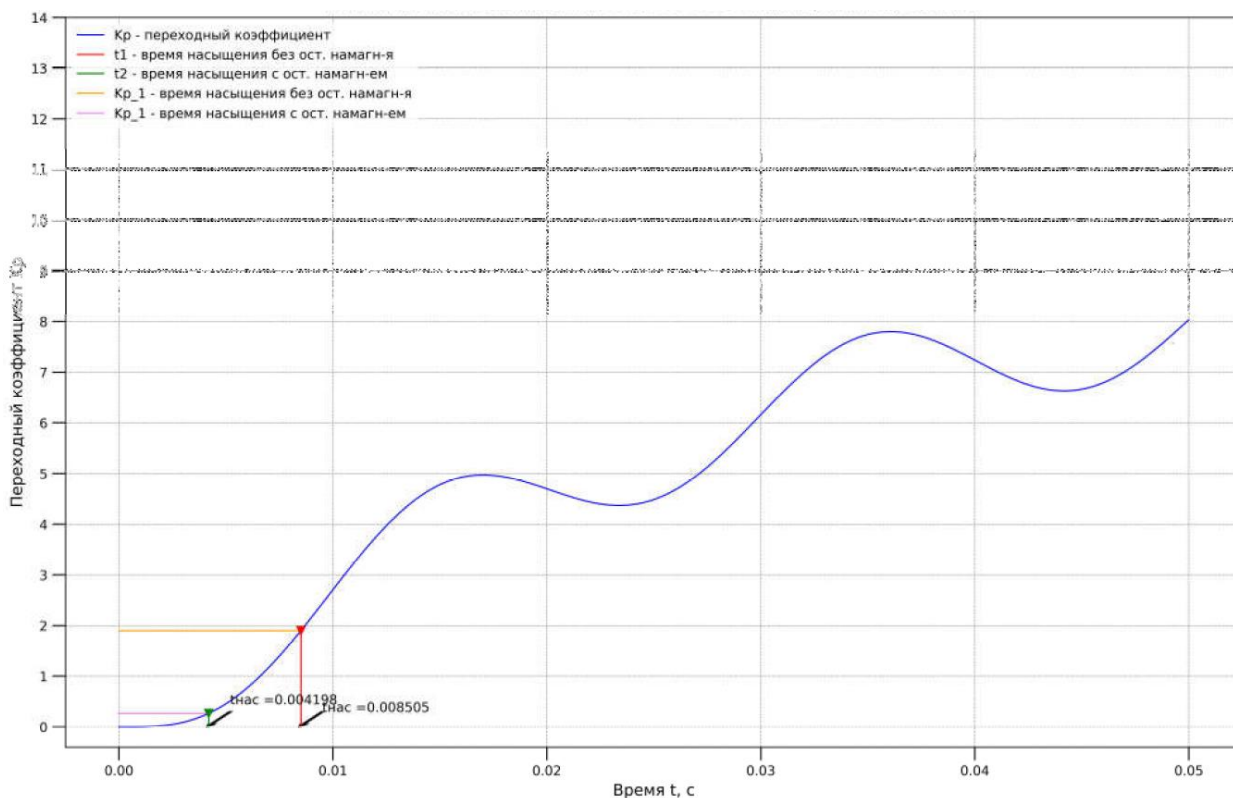


Рисунок 10 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для ТА6 ОВМ при 3хф КЗ с указанием насыщения

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,008505$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,004198$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 11 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для ТА6 ОВМ при 1ф КЗ с указанием точек насыщения.

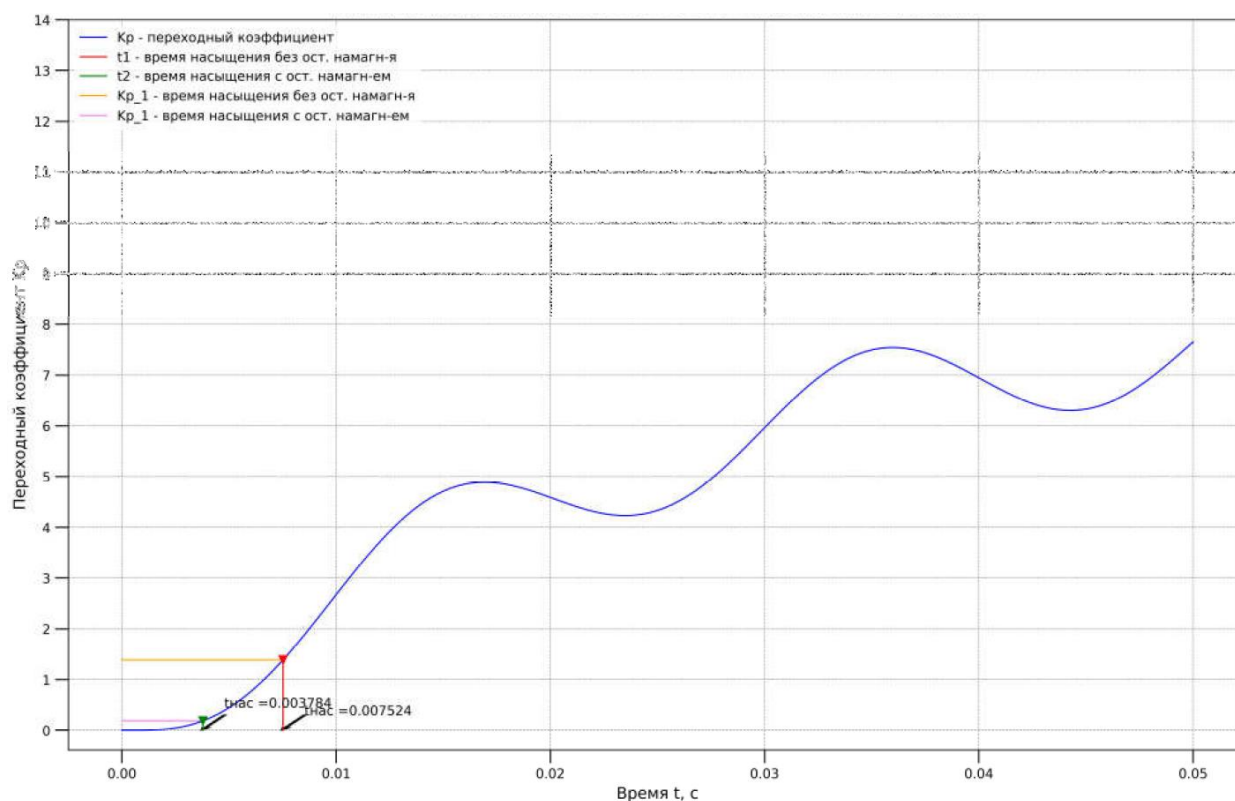


Рисунок 11 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для ТА6 ОВМ при 1ф КЗ с указанием насыщения

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,007524$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,003784$ при наличии остаточного намагничивания.

Результаты расчета сведены в таблицы 9–13.

Таблица 9 – Расчетные времена до насыщения ТТ для ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 1

ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 1				
Дисп. наименование ТТ	$t_{\text{нас.}}$ при 3хФ КЗ при отсутствии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 3хФ КЗ при наличии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 1ф КЗ при отсутствии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 1ф КЗ при наличии ОН, сек
4ТТ	$0,00862 > 0,005$	$0,004198 < 0,005$	$0,00862 > 0,005$	$0,003963 < 0,005$

Таблица 10 – Расчетные времена до насыщения ТТ для ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 2

ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 2				
Дисп. наименование ТТ	t _{нас.} при 3хФ КЗ при отсутствии ОН, сек	t _{нас.} при 3хФ КЗ при наличии ОН, сек	t _{нас.} при 1ф КЗ при отсутствии ОН, сек	t _{нас.} при 1ф КЗ при наличии ОН, сек
4ТТ	0,008175 > 0,005	0,004041 < 0,005	0,007329 > 0,005	0,003721 < 0,005

Таблица 11 – Расчетные времена до насыщения ТТ для ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 3

ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 3				
Дисп. наименование ТТ	t _{нас.} при 3хФ КЗ при отсутствии ОН, сек	t _{нас.} при 3хФ КЗ при наличии ОН, сек	t _{нас.} при 1ф КЗ при отсутствии ОН, сек	t _{нас.} при 1ф КЗ при наличии ОН, сек
4ТТ	0,007937 > 0,005	0,003986 < 0,005	0,006992 > 0,005	0,003589 < 0,005

Таблица 12 – Расчетные времена до насыщения ТТ для ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 4

ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 4				
Дисп. наименование ТТ	t _{нас.} при 3хФ КЗ при отсутствии ОН, сек	t _{нас.} при 3хФ КЗ при наличии ОН, сек	t _{нас.} при 1ф КЗ при отсутствии ОН, сек	t _{нас.} при 1ф КЗ при наличии ОН, сек
4ТТ	0,007896 > 0,005	0,00393 < 0,005	0,006945 > 0,005	0,003586 < 0,005

Таблица 13 – Расчетные времена до насыщения ТТ для ОВМ 110 кВ

ОВМ 110 кВ				
Дисп. наименование ТТ	t _{нас.} при 3хФ КЗ при отсутствии ОН, сек	t _{нас.} при 3хФ КЗ при наличии ОН, сек	t _{нас.} при 1ф КЗ при отсутствии ОН, сек	t _{нас.} при 1ф КЗ при наличии ОН, сек
ТА6	0,008505 > 0,005	0,004198 < 0,005	0,007524 > 0,005	0,003784 < 0,005

Далее выполним аналогичные расчеты для новых ТТ.

1.2.4 Расчет времени до насыщения ТТ (проектируемых)

Расчет проводится на основании ГОСТ Р 58869–2019 «Трансформаторы тока измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока».

Возможные риски приводятся на основании ЭКРА.650323.085 Д

«Методические указания по проверке и выбору трансформаторов тока».

Расчетные условия проверки для устанавливаемых защит выбирались на основании ЭКРА.650323.085 Д [24].

Расчеты производим аналогично по методике, изложенной в пункте 1.2.2.

Расчет вторичных цепей ТТ 110 кВ для устройств РЗА представлен в таблице 14.

В таблице 15 приведен расчет постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ.

В таблице 16 приведен расчет параметра режима А.

Расчёт времени до насыщения ТТ проводился графическим методом в следующем порядке.

Проводилось построение кривой зависимости переходного коэффициента K_p от времени на интервале $[0, 0,05]$ сек. по уравнению Г.23 (ГОСТ Р 58669-2019) и с учетом допущений, описанных в указанном пункте.

Проводилось построение рассчитанных в таблице 8 параметров режима А и нахождение точек пересечения с кривой зависимости переходного коэффициента K_p от времени согласно уравнения Г.25 (ГОСТ Р 58669-2019). Графической интерпретацией нахождения времени является спуск перпендикуляра из точки пересечения прямых и кривой на ось времени.

Важное замечание - построение кривой зависимости переходного коэффициента K_p выполняется на интервале $[0, 0,05]$ сек., следовательно, для случаев, когда расчётное значение параметра режима А больше, чем значение коэффициента K_p в момент времени 0,05 сек, на графике строятся соответствующие прямые $A = K_p$ и указывается точка насыщения 0,05 сек, что означает, что момент насыщения наступает позже, или не наступает.

Таблица 14 - Расчет вторичных цепей ТТ 110 кВ для устройств РЗА

№ ТТ	Место установки ТТ; Защищаемый объект; Тип защит (устройство РЗА); Схема соединения ТТ	Номинальные данные ТТ					Материал кабеля	Расчетная точка КЗ	Ток короткого замыкания, А расчетный	Расчетная кратность первичного тока
		ТТ	$K_{\text{ТТ}}$	$S_{\text{ном}}$	$K_{10\text{ном}}$	Z_2			$I_{\text{расч.}}$	$K_{\text{расч.}}$
5ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-1 ВЛ 110 кВ ШЗТ 220.02-0 Полная звезда	ТВ-110	1000/5	20 ВА	30	9,05 Ом	Cu	КЗ на шинах 110 кВ ПС 220 кВ Садовая	Трехфазное КЗ - 25289 Однофазное КЗ - 25424	25289/1000 = 25,3 25424/1000 = 25,4
5ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-2 ВЛ 110 кВ ШЗТ 220.02-0 Полная звезда	ТВ-110	1000/5	20 ВА	30	9,05 Ом	Cu	КЗ на шинах 110 кВ ПС 220 кВ Садовая	Трехфазное КЗ - 25289 Однофазное КЗ – 25424	25289/1000 = 25,3 25424/1000 = 25,4
5ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-3 ВЛ 110 кВ ШЗТ 220.02-0 Полная звезда	ТВ-110	1000/5	20 ВА	30	9,05 Ом	Cu	КЗ на шинах 110 кВ ПС 220 кВ Садовая	Трехфазное КЗ - 25289 Однофазное КЗ – 25424	25289/1000 = 25,3 25424/1000 = 25,4
5ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-4 ВЛ 110 кВ ШЗТ 220.02-0 Полная звезда	ТВ-110	1000/5	20 ВА	30	9,05 Ом	Cu	КЗ на шинах 110 кВ ПС 220 кВ Садовая	Трехфазное КЗ - 25289 Однофазное КЗ – 25424	25289/1000 = 25,3 25424/1000 = 25,4

Продолжение таблицы 14

№ ТТ	$f_{\max}, \%$	Расчетный параметр	Рез-ая кратность	$Z_{н.доп}, \text{Ом}$	R приборов и реле, Ом		Переходное сопротивление, Ом	Расчет сечения по условию $f < 10\% \text{ ТТ}$		Длина цепей, м
					в «фазе»	в «нуле»		Допустимое сопротивление кабеля, Ом	Базисная длина, м	
	f	A			$\Gamma_{р.ф.}$	$\Gamma_{р.0}$	$\Gamma_{пер.}$	$\Gamma_{пр.}$	$l_0 = 143 \times \Gamma_{пр.}$	$l_{дейст}$
5ТТ	10	1,2	25,29	37,27	0,5	0,00	0,05	$37,27-0,5-0,05=36,724$	$143 \times 36,72=5251,53$	140
			25,42	37,03				$(37,03-0,5-0-0,05)/2=18,239$	$143 \times 18,24=2608,18$	
5ТТ	10	1,2	25,29	37,27	0,5	0,00	0,05	$37,27-0,5-0,05=36,724$	$143 \times 36,72=5251,53$	210
			25,42	37,03				$(37,03-0,5-0-0,05)/2=18,239$	$143 \times 18,24=2608,18$	
5ТТ	10	1,2	25,29	37,27	0,5	0,00	0,05	$37,27-0,5-0,05=36,724$	$143 \times 36,72=5251,53$	260
			25,42	37,03				$(37,03-0,5-0-0,05)/2=18,239$	$143 \times 18,24=2608,18$	
5ТТ	10	1,2	25,29	37,27	0,5	0,00	0,05	$37,27-0,5-0,05=36,724$	$143 \times 36,72=5251,53$	270
			25,42	37,03				$(37,03-0,5-0-0,05)/2=18,239$	$143 \times 18,24=2608,18$	

Продолжение таблицы 14

№ ТТ	Расчет сечения по условию термической стойкости			
	Максимальный вторичный ток, А	Время РЗ, с	Максимально допустимый тепловой импульс приборов и реле	Расчетное значение теплового импульса
	$I_2 = I_{K3} / K_{ТТ}$	$t_{сз}$	$W_K = (I_{2max}^2 \cdot t_{тер})^{0,5}$	$W_K = (I_2^2 \cdot (t_{сз} + t_{откл.Q}))^{0,5}$
5ТТ	$\frac{25424}{1000/1} = 25$	0,05	$(40^2 \times 1)^{0,5} = 40$	$(25,42^2 \times (0,05+0,1))^{0,5} = 9,85$ Режим допустим
5ТТ	$\frac{25424}{1000/1} = 25$	0,05	$(40^2 \times 1)^{0,5} = 40$	$(25,42^2 \times (0,05+0,1))^{0,5} = 9,85$ Режим допустим
5ТТ	$\frac{25424}{1000/1} = 25$	0,05	$(40^2 \times 1)^{0,5} = 40$	$(25,42^2 \times (0,05+0,1))^{0,5} = 9,85$ Режим допустим
5ТТ	$\frac{25424}{1000/1} = 25$	0,05	$(40^2 \times 1)^{0,5} = 40$	$(25,42^2 \times (0,05+0,1))^{0,5} = 9,85$ Режим допустим

Продолжение таблицы 14

№ ТТ	Расчет сечения по условию термической стойкости	Напряжение на вторичных зажимах трансформатора тока, В	Сечение, мм ² / наибольшая длина, м
	Расчетное $S_{\min\text{доп}}$, мм ²		
	$S_{\min} = B_K / C_T$		
5ТТ	40 / 120 = 0,33	$U_2 = K_{уд} \cdot (I_{K3}/K_{ТТ}) \cdot z_{н.макс} \leq 2000, K_{уд} = 2$ $2 \times 25289 \times 0,91 / (1000/1000) = 45,99$	140 / (57 × 18,239) = 0,13 не меньше – 2,5
		$2 \times 25424 \times 1,32 / (1000/1) = 67,05$	
5ТТ	40 / 120 = 0,33	$2 \times 25289 \times 1,11 / (1000/1000) = 56,35$	210 / (57 × 18,239) = 0,2 не меньше – 2,5
		$2 \times 25424 \times 1,73 / (1000/1) = 87,87$	
5ТТ	40 / 120 = 0,33	$2 \times 25289 \times 1,26 / (1000/1000) = 63,74$	260 / (57 × 18,239) = 0,25 не меньше – 2,5
		$2 \times 25424 \times 2,02 / (1000/1) = 102,74$	
5ТТ	40 / 120 = 0,33	$2 \times 25289 \times 1,29 / (1000/1000) = 65,22$	270 / (57 × 18,239) = 0,26 не меньше – 2,5
		$2 \times 25424 \times 2,08 / (1000/1) = 105,71$	

Таблица 15 - Расчет постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ

№ ТТ	Место установки ТТ	Расчетные эквивалентные сопротивления						Расчетные постоянные времени затухания апериодической составляющей	
								$T_{р\text{экв}3} = X_{\text{экв}1} / (\omega \cdot R_{\text{экв}1}),$ $T_{р\text{экв}1} = (X_{\text{экв}1} + X_{\text{экв}2} + X_{\text{экв}0}) / (\omega \cdot R_{\text{экв}1} + R_{\text{экв}2} + R_{\text{экв}0})$	
		R _{экв1}	R _{экв2}	R _{экв0}	X _{экв1}	X _{экв2}	X _{экв0}	T _{рэкв3} , мс	T _{рэкв1} , мс
		Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом		
5ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-1	0,237	0,25	0,287	2,425	2,531	2,347	32,59	30,05
5ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-2	0,237	0,25	0,287	2,425	2,531	2,347	32,59	30,05
5ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-3	0,237	0,25	0,287	2,425	2,531	2,347	32,59	30,05
5ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-4	0,237	0,25	0,287	2,425	2,531	2,347	32,59	30,05

Таблица 16 - Расчет параметра режима А

№ ТТ	Место установки ТТ	Номинальные параметры										Расчетные значения			
		Приня тое сеч.	I _{ном}	K _{ном}	I _{кз} 3×Φ	I _{кз} 1×Φ	Z ₂	Z _{номТ} Т	Z _{нагр} 3×Φ	Z _{нагр} 1×Φ	K _{пр}	A3 (без ОН)	A3 (с уч. ОН)	A1 (без ОН)	A1 (с уч. ОН)
		мм ²	A	о.е.	A	A	Ом	Ом	Ом	Ом	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.
		A = (I _{1ном} · K _{ном} · (Z ₂ + Z _{номТТ})) / (I _{кз} · (Z ₂ + Z _{нагр})), A _{он} = A · (1 - K _{пр})													
5ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-1	4	1000	30	25289	25424	9,05	30	1,16	1,78	0,1	4,54	4,09	4,25	3,83
5ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-2	12	1000	30	25289	25424	9,05	30	1,47	2,39	0,1	4,4	3,96	4,03	3,63
5ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-3	12	1000	30	25289	25424	9,05	30	1,69	2,83	0,1	4,31	3,88	3,88	3,49
5ТТ	ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-4	12	1000	30	25289	25424	9,05	30	1,73	2,92	0,1	4,3	3,85	3,85	3,47

На рисунке 12 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 1 при 3хф КЗ с указанием насыщения.

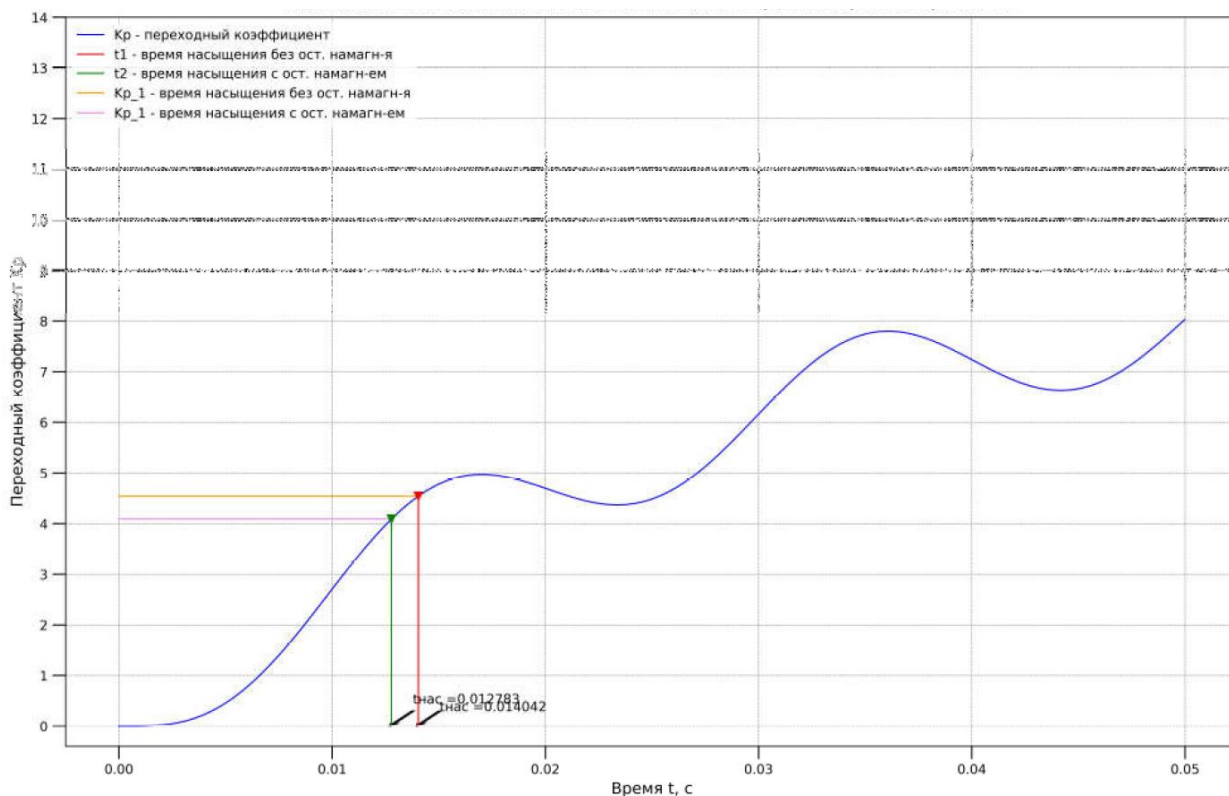


Рисунок 12 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 1 при 3хф КЗ с указанием насыщения

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,014042$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,012783$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 13 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 1 при 1ф КЗ с указанием точек насыщения.

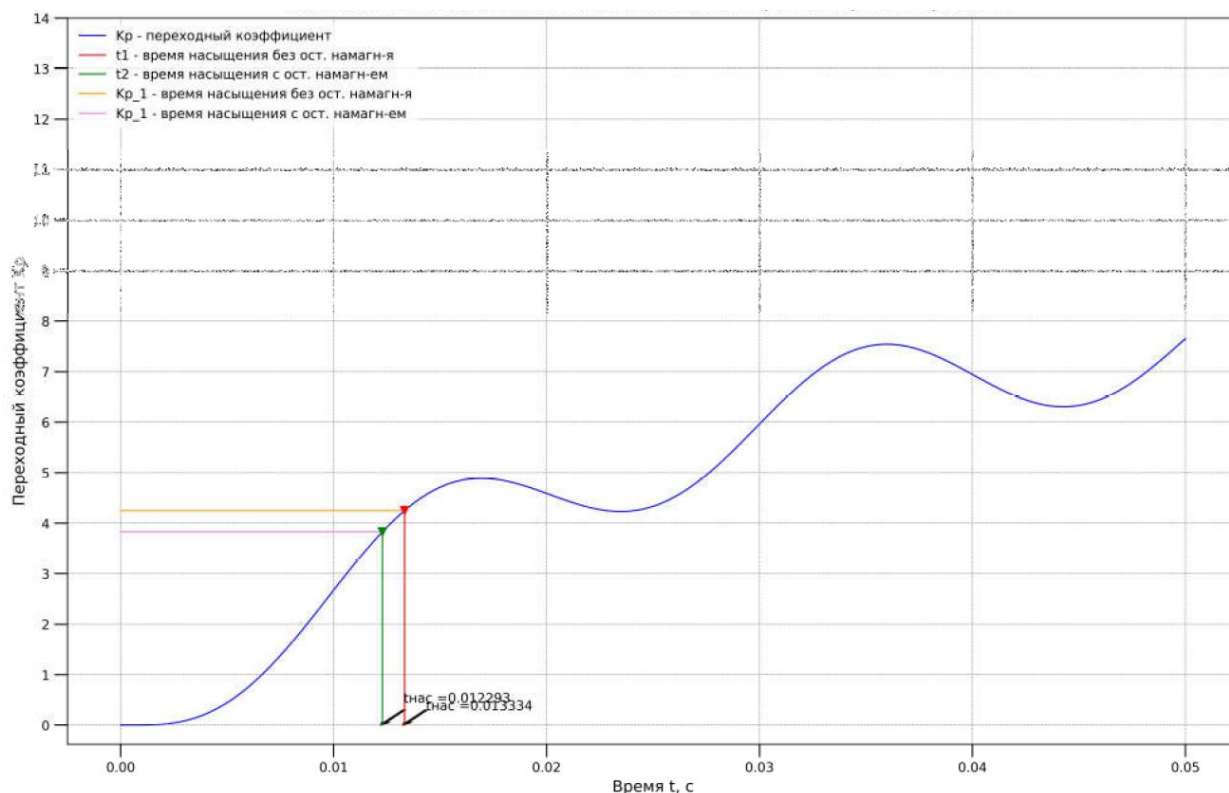


Рисунок 13 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 1 при 1ф КЗ с указанием насыщения

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,013334$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,012293$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 14 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 2 при 3хф КЗ с указанием насыщения.

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,013603$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,012478$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 15 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 2 при 1ф КЗ с указанием точек насыщения.

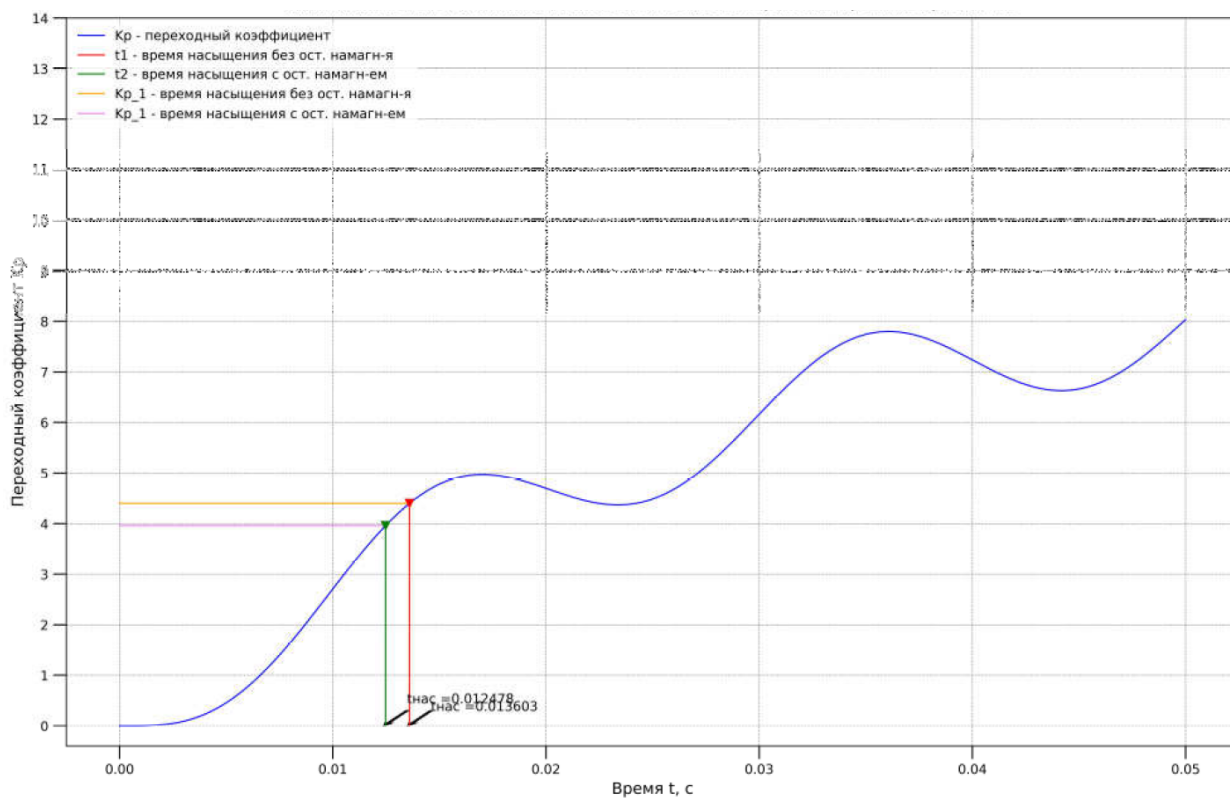


Рисунок 14 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 2 при 3хф КЗ с указанием насыщения

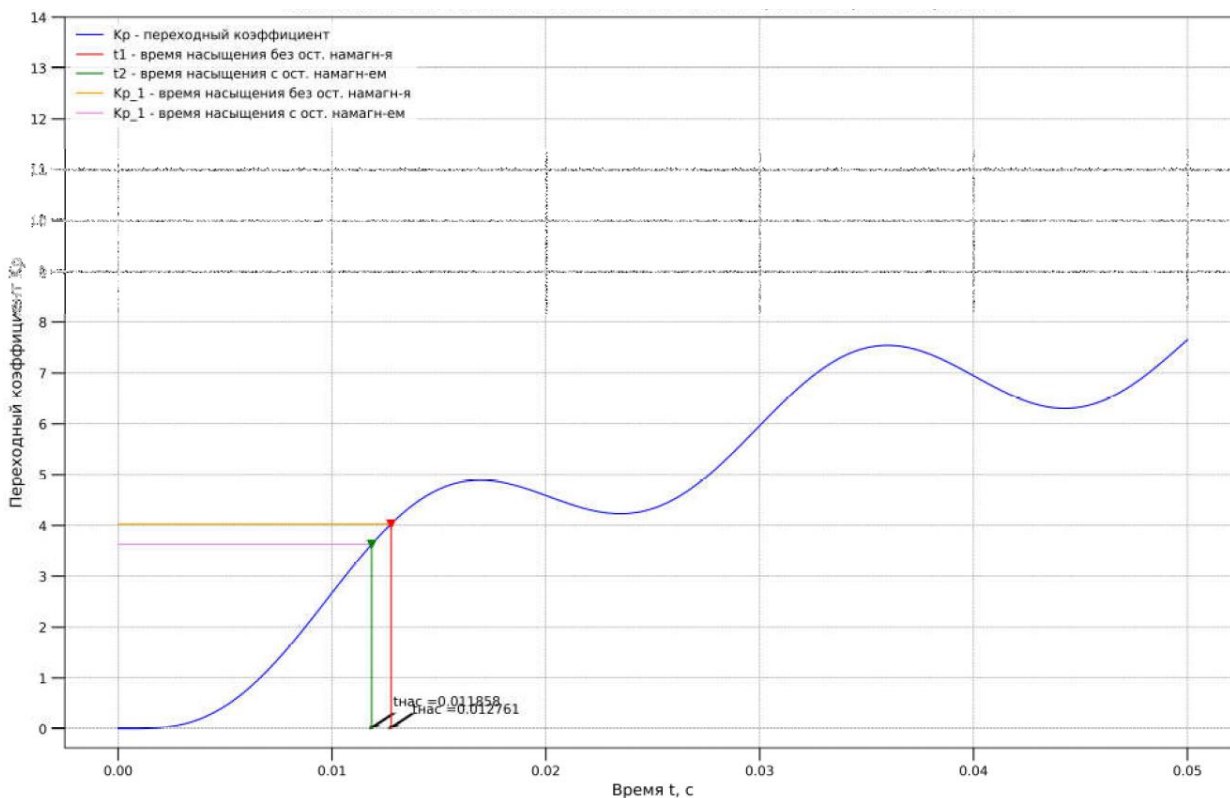


Рисунок 15 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 2 при 1ф КЗ с указанием насыщения

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,012761$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,011858$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 16 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 3 при 3хф КЗ с указанием насыщения.

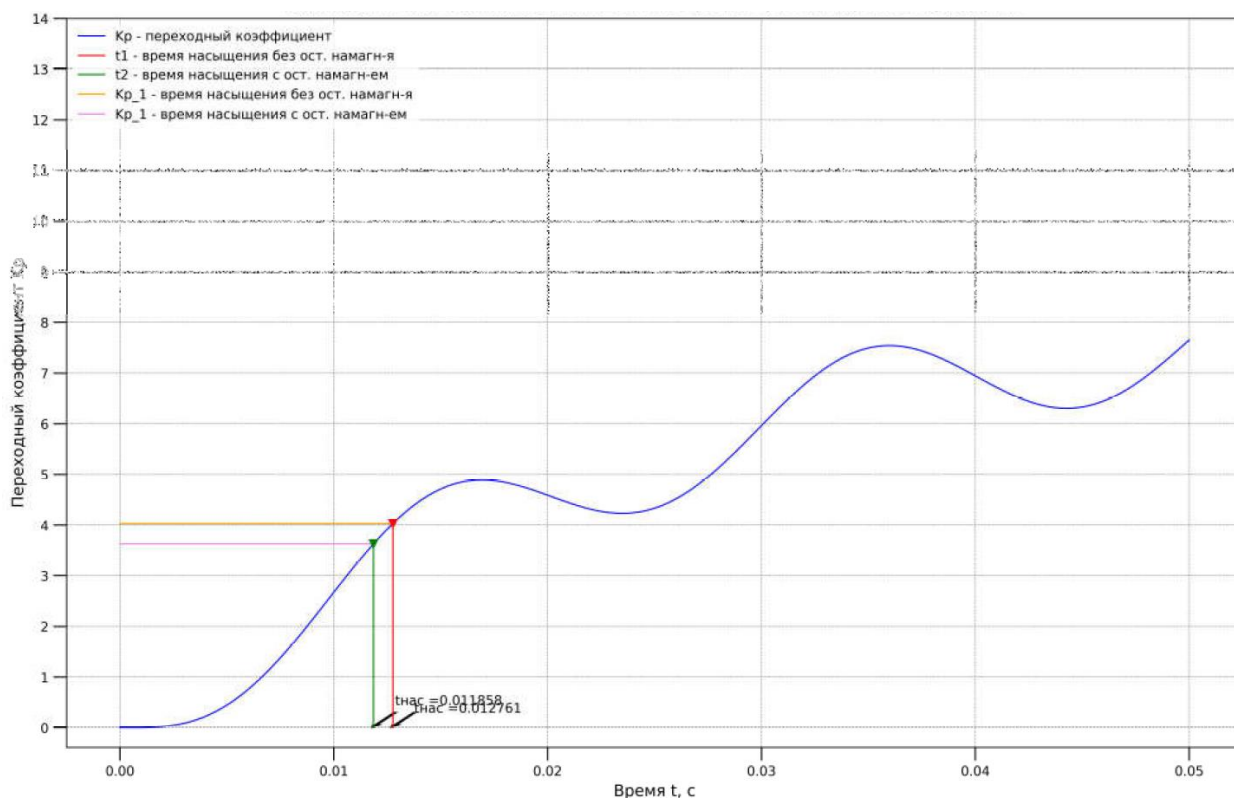


Рисунок 16 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 3 при 3хф КЗ с указанием насыщения

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,012761$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,011858$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 17 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 3 при 1ф КЗ с указанием точек насыщения.

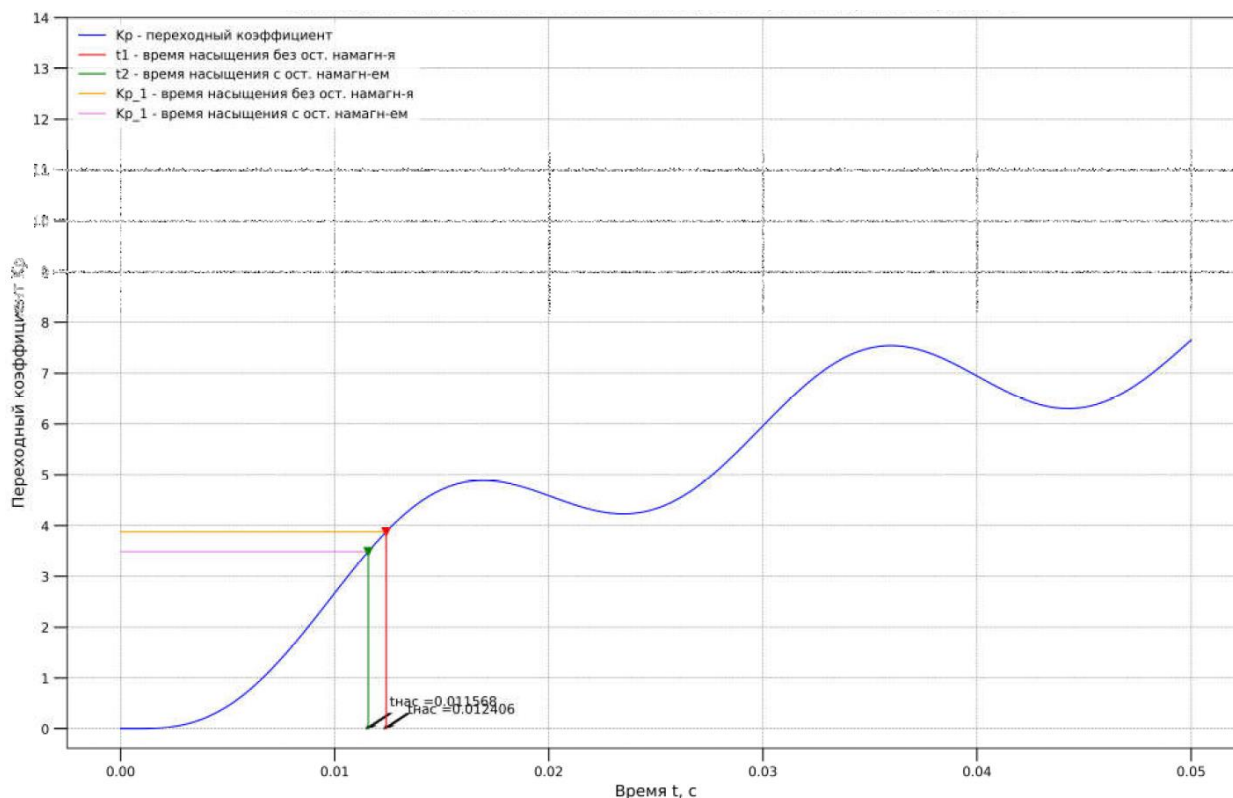


Рисунок 17 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 3 при 1ф КЗ с указанием насыщения

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,012406$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,011568$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 18 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 4 при 3хф КЗ с указанием насыщения.

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,013321$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,012276$ при наличии остаточного намагничивания.

На рисунке 19 приведена кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 4 при 1ф КЗ с указанием точек насыщения.

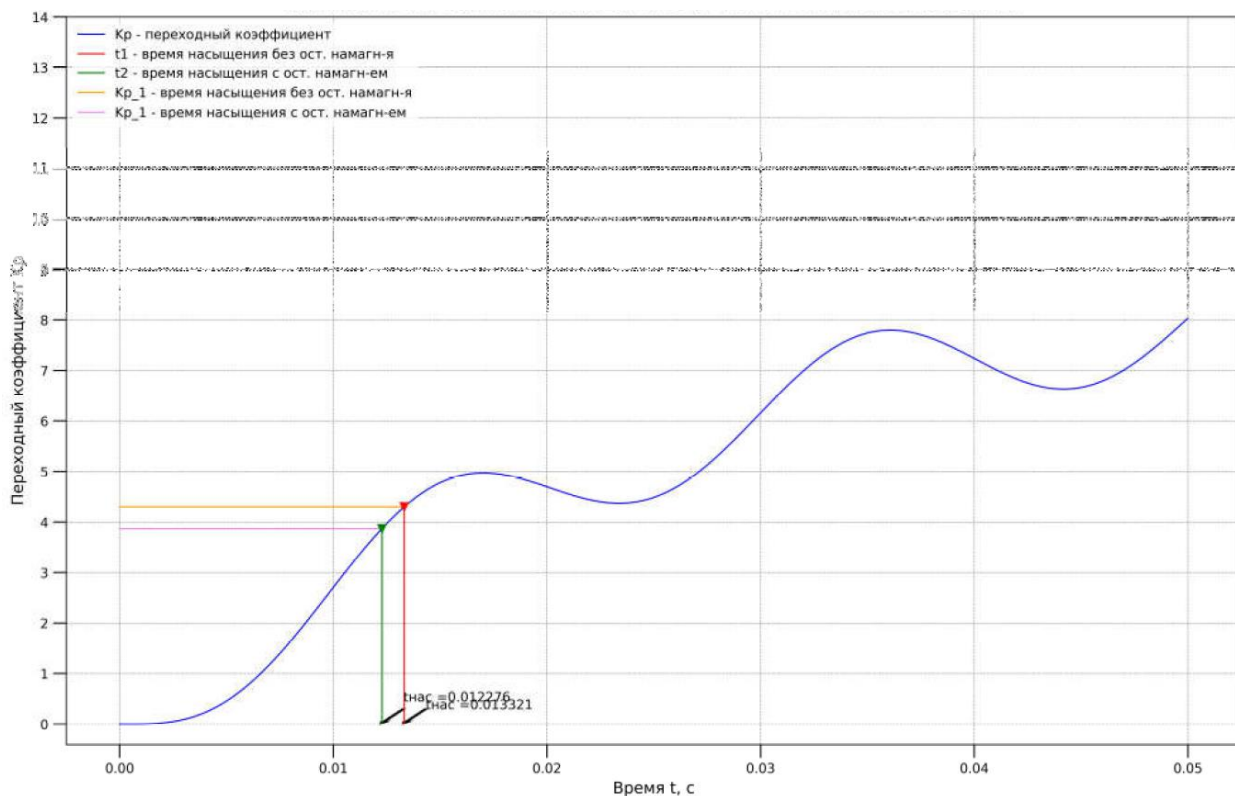


Рисунок 18 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 4 при 3хф КЗ с указанием насыщения

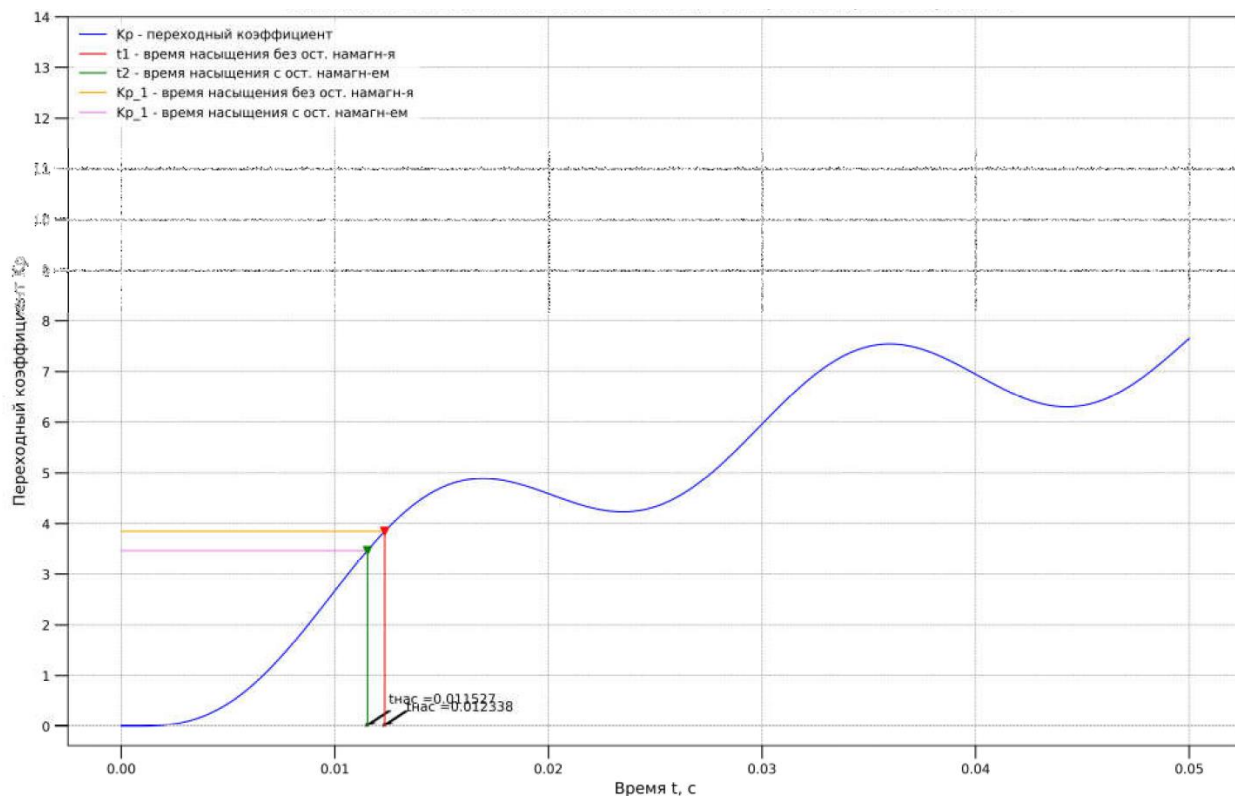


Рисунок 19 - Кривая зависимости переходного коэффициента от времени для 5ТТ ВЛ110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 - 4 при 1ф КЗ с указанием насыщения

Как видно из графика на интервале времени $[0, 0,05]$ секунды насыщение наступает в момент времени $t_1=0,012338$ с при отсутствии остаточного намагничивания и в момент времени $t_2=0,011522$ при наличии остаточного намагничивания.

Результаты расчета сведены в таблицы 17–20.

Таблица 17 – Расчетные времена до насыщения ТТ для ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 1

ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 1				
Дисп. наименование ТТ	$t_{\text{нас.}}$ при 3хФ КЗ при отсутствии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 3хФ КЗ при наличии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 1ф КЗ при отсутствии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 1ф КЗ при наличии ОН, сек
5ТТ	0,014042>0,005	0,012783>0,005	0,013334>0,005	0,012293>0,005

Таблица 18 – Расчетные времена до насыщения ТТ для ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 2

ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 2				
Дисп. наименование ТТ	$t_{\text{нас.}}$ при 3хФ КЗ при отсутствии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 3хФ КЗ при наличии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 1ф КЗ при отсутствии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 1ф КЗ при наличии ОН, сек
5ТТ	0,013603>0,005	0,012478>0,005	0,012761>0,005	0,011858>0,005

Таблица 19 – Расчетные времена до насыщения ТТ для ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 3

ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 3				
Дисп. наименование ТТ	$t_{\text{нас.}}$ при 3хФ КЗ при отсутствии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 3хФ КЗ при наличии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 1ф КЗ при отсутствии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 1ф КЗ при наличии ОН, сек
5ТТ	0,013348>0,005	0,012298>0,005	0,012406>0,005	0,011568>0,005

Таблица 20 – Расчетные времена до насыщения ТТ для ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 4

ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 4				
Дисп. наименование ТТ	$t_{\text{нас.}}$ при 3хФ КЗ при отсутствии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 3хФ КЗ при наличии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 1ф КЗ при отсутствии ОН, сек	$t_{\text{нас.}}$ при 1ф КЗ при наличии ОН, сек
5ТТ	0,013321>0,005	0,012276>0,005	0,012338>0,005	0,011552>0,005

Выводы по разделу.

Расчет времени до насыщения ТТ (существующих) показал, что для всех устанавливаемых защит в составе проектируемых шкафов ДФЗ+СЗ (ДФЗ, ДЗ, ТНЗНП) ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 1,2,3,4 для максимальных токов короткого замыкания не обеспечивается их корректная работа в режиме, когда остаточное намагничивание сердечников ТТ максимально.

Необходима установка новых ТТ. Вновь устанавливаемые ТТ выбираются с классом точности 10PR.

Расчет времени до насыщения ТТ (проектируемых) показал, что для всех устанавливаемых защит в составе шкафов проектируемых шкафов ДФЗ+СЗ (ДФЗ, ДЗ, ТНЗНП) ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 1,2,3,4 для максимальных токов короткого замыкания обеспечивается их корректная работа.

При переводе проектируемых шкафов ДФЗ+СЗ (ДФЗ, ДЗ, ТНЗНП) ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 1,2,3,4 на ОВМ 110 кВ возможна некорректная их работа. При наличии остаточной намагниченности сердечника время до насыщения ТТ составляет 4,12 мс при трехфазном КЗ и 3,78 мс при однофазном КЗ, что при неблагоприятной ситуации ведет к рискам неправильной работы защит. Для ДФЗ (согласно ЭКРА.650323.085 Д) существуют риски неселективного срабатывания защит при КЗ вне защищаемой зоны и замедления при близком КЗ в зоне действия. Для ТНЗНП и ДЗ существуют риски замедления работы защиты и отключения КЗ с выдержкой времени второй ступени. После проведения общих для данного случая мероприятий (увеличение сечения проводников контрольных кабелей для цепей тока) было выявлено, что они не приводят к существенному улучшению ситуации. В связи с этим при ближайшей реконструкции необходима замена ТТ в ячейке ОВМ 110 кВ на новые с характеристиками, обеспечивающими правильную работу устройств РЗА. Сечение контрольных кабелей токовых цепей необходимо принять 4 мм². Сечение контрольных кабелей токовых цепей в схеме перевода необходимо принять 12 мм².

2 Технические решения по оборудованию РЗА и РАС

2.1 Основные технические требования к системе РЗА

«Проектируемые устройства РЗА должны быть выполнены с использованием микропроцессорной (МП) техники. Устройства, устанавливаемые в данной работе, обеспечивают основные требования к релейной защите:

- селективность, обеспечивающая отключение только повреждённой части электроустановки;
- быстродействие, не допускающее серьёзных повреждений электрооборудования;
- надёжность, предотвращающая излишние срабатывания защиты;
- чувствительность в основной и резервных зонах, обеспечивающая действие защиты при любых коротких замыканиях, когда имеется необходимость отключения электроустановки.

Повышение надёжности функционирования РЗА, обеспечивается за счет мероприятий ближнего резервирования:

- установкой дублированных комплектов защит с независимыми каналами измерения, оперативного питания и воздействия, а также располагающихся в отдельных конструктивах;
- установкой основной и резервной защит присоединений, использующих различные принципы действия;
- разделением комплектов защит по цепям переменного и оперативного тока» [25];
- действие каждого комплекта защит непосредственно на два электромагнита отключения.

Проектируемый шкаф ДФЗ+СЗ типа должен соответствовать требованиям, указанным в СТО 56947007–33.040.20.282–2019 «Типовые шкафы ШЭТ РЗА ЛЭП 110–750 кВ. Архитектура I типа» [20].

«Микропроцессорные терминалы РЗА должны удовлетворять «Общим техническим требованиям к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем» РД 34.35.310–97, выполняться в соответствии с нормами технологического проектирования (НТП) ПАО «Россети», ПУЭ, ПТЭ и другими действующими в РФ нормативными материалами.

Цепи переменного тока должны быть выполнены отдельными кабелями, проложенными, в разных кабельных каналах, от разных вторичных обмоток трансформаторов тока. Разделение по цепям переменного напряжения должно осуществляться в соответствии с рекомендациями ПУЭ и соответствующих РД.

Защиты ЛЭП, имеющие цепи напряжения, неисправность которых может привести к ложному действию защиты, должны блокироваться при нарушении цепей напряжения.

При неисправности цепей напряжения ВЛ блокировка при неисправности цепей напряжения должна действовать:

- на блокировку дистанционных защит ВЛ;
- на блокировку токовых защит с пуском по напряжения, если они по току срабатывания не отстроены от нагрузочных режимов» [14].

Дистанционные защиты должны иметь автоматическую блокировку ступеней, которые могут неправильно работать при качаниях в энергосистеме.

Резервные защиты ЛЭП должны иметь в своем составе функцию ненаправленной токовой защиты от всех видов КЗ, вводимую автоматически при срабатывании БНН при отсутствии возможности селективной и чувствительной защиты данной ЛЭП другими устройствами РЗА, выполняющими функцию ближнего резервирования (далее – аварийная МТЗ). Аварийная МТЗ должна соответствовать п.7 ГОСТ Р 58887-2020 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Дистанционная и токовые защиты линий электропередачи и оборудования классом напряжения 110–220 кВ.

Функциональные требования» [7], утвержденным приказом Росстандарта от 27.08.2020 № 569-ст.

В общем случае, технические решения должны предусматривать мероприятия, исключающие необходимость вывода устройств РЗА, которые по принципу действия и параметрам настройки (уставкам) могут срабатывать ложно при проведении операций в их токовых цепях с помощью испытательных блоков из-за несимметрии токов. «Также, согласно требования п. 3.4.23 ПУЭ, заземление во вторичных цепях трансформаторов тока следует предусматривать в одной точке на ближайшей от трансформаторов тока сборке зажимов или на зажимах трансформаторов тока» [13].

Проектируемые шкафы должны обеспечивать свою работу при частоте 45,0–55,0 Гц.

2.2 Технические требования к проектируемым шкафам

Основные технические требования к шкафу ДФЗ+СЗ приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Требования к шкафу ДФЗ+СЗ

Параметр	Требования
«Шифр шкафа	ДФЗ+СЗ (ШЭТ 220.02-0)
Архитектура построения ПС	I типа
Наименование шкафа	Дифференциально-фазная защита ЛЭП 110 – 220 кВ с комплектом ступенчатых защит (для схем РУ с двумя выключателями или ОСШ)
Защищаемый элемент	ЛЭП 110-220 кВ
Совместимость	Совместимость со шкафами, устанавливаемыми на Ижевской ТЭЦ-2 типа ШЭ2607 083 производства ООО НПП «ЭКРА»
Основные функции МП ИЭУ	ДФЗ, СЗ (ДЗ, ТНЗНП, МТЗ, МФТО, ОУ, АУ, БНН, БК) РАС, логика связи для передачи РС, ТО и ТУ» [7]
Нетиповые функции	ПО УРОВ

Продолжение таблицы 21

Параметр	Требования
Аппаратура связи	ВЧ ПП, совместимый с ВЧ ПП с противоположной стороны ЛЭП
«Функции ИТС в составе шкафа»	ДФЗ+СЗ, ПО УРОВ
Вводы питания оперативного постоянного тока	Питание оперативных цепей и ИЭУ Освещение шкафа
Цифровые порты ИЭУ	2 оптических SC 100BASE-FX порта; 2 электрических COM-порта RS-485» [7]
Габариты шкафа	Ш×Г×В – 800×600×2255 мм, включая цоколь 200 мм
Конструктив	Передняя дверь металлическая с обзорным окном

Проектируемые шкафы должны соответствовать ГОСТ Р 58981-2020 [8].

Функции телеотключения и телеускорения в проектируемых шкафах ДФЗ + СЗ со стороны Ижевской ТЭЦ-2 не предусматриваются, на основании этого в проектируемых в данной работе шкафах эти функции выводятся в резерв.

Функционал блокировки при неисправности цепей переменного напряжения должен соответствовать требованиям, приведенным в ГОСТ Р 58887 [7].

В качестве полукомплектов основных защит ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая I (II, III, IV) цепь со стороны Ижевской ТЭЦ-2 предусматривается использование шкафов типа ШЭ2607 083 производства ООО НПП «ЭКРА». На стороне ПС 220 кВ Садовая также должны быть установлены шкафы, обеспечивающие функциональную совместимость комплектов основных защит ВЛ 110 кВ.

2.3 Основные технические решения в части РЗА

2.3.1 Основные решения в части проектируемых устройств РЗА

Все технические решения должны соответствовать НТД, представленным в разделе 1.

«В данной работе предусматривается разработка технических решений РЗА по I архитектуре по Типовой проектной документации на шкафы РЗА, АСУТП» [20].

В соответствии с принятой архитектурой выбран шкаф ШЭТ 220.02–0 (ДФЗ+СЗ).

Перечень оборудования, устанавливаемого на ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая - 1,2,3,4, приведен в таблице 22.

Таблица 22 – Перечень оборудования РЗА

Место установки	Тип оборудования РЗА
ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 1	ШЭТ 220.02–0 + ПП
ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 2	ШЭТ 220.02–0 + ПП
ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 3	ШЭТ 220.02–0 + ПП
ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 4	ШЭТ 220.02–0 + ПП

Основные функции, необходимые для реализации в МП ИЭУ в составе шкафа ДФЗ+СЗ ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая-1,2,3,4: ДФЗ, трехступенчатая ДЗ, пятиступенчатая ТНЗНП, МФТО, аварийная МТЗ, ПО УРОВ, БНН, ОУ, АУ, РАС.

В защите должна быть предусмотрена логика автоматического ускорения 3 ступени ТЗНП по реверсу мощности нулевой последовательности параллельной ЛЭП.

Описание взаимодействия проектируемого шкафа с существующими и проектируемыми устройствами приведено ниже.

Защиты шкафа формируют сигналы:

- действия на отключение с пуском централизованного УРОВ 110 кВ при отказе ВМ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-1,2,3,4 или ОВМ 110 кВ при переводе рассматриваемых ЛЭП на него;
- суммарный сигнал срабатывания блокирующего РНМНП и состояния выключателя (РПВ) своей ЛЭП для передачи в защиту параллельной ЛЭП (ввод алгоритма ускорения защиты по реверсу

мощности нулевой последовательности параллельной ЛЭП должен формироваться при фиксации включенного положения ШСВМ 110 кВ, а также при отключенном ШСВМ 110 кВ при условии наличия электрической связи между параллельными ЛЭП).

Защиты шкафа принимают сигналы:

- останов ВЧ при действии централизованного УРОВ при отказе ВМ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-1,2,3,4 или ОВМ 110 кВ переводе рассматриваемых ЛЭП на него;
- сигнал о положении выключателя для осуществления автоматического ускорения 2 ступени ДЗ и ТНЗНП;
- о положении ШСВМ 110 кВ;
- РНМБ и РПВ параллельной линии.

Проектируемые защиты предполагается подключить к обмотке ТА5.

Схема распределения устройств ИТС по ТТ и ТН приведена на рисунке 20.

Шкаф ДФЗ+СЗ ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая-1,2,3,4 предусматривается аппаратно-совместимым с защитами на противоположном конце ВЛ.

2.3.2 Основные решения в части существующих устройств РЗА

АУВ сохраняется существующим.

Предусматривается вывод из работы электромеханических панелей ЭПЗ-1636/67 ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая -1,2,3,4 на основании СТО 56947007-33.040.20.022-2009 [19]. Функции ступенчатых защит реализованы:

- в существующих шкафах НВЧЗ+СЗ;
- в проектируемых шкафах ДФЗ+СЗ.

Таким образом, ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая-1,2,3,4 оснащаются двумя комплектами основных и резервных защит. Необходимость дополнительного комплекта ступенчатых защит отсутствует.

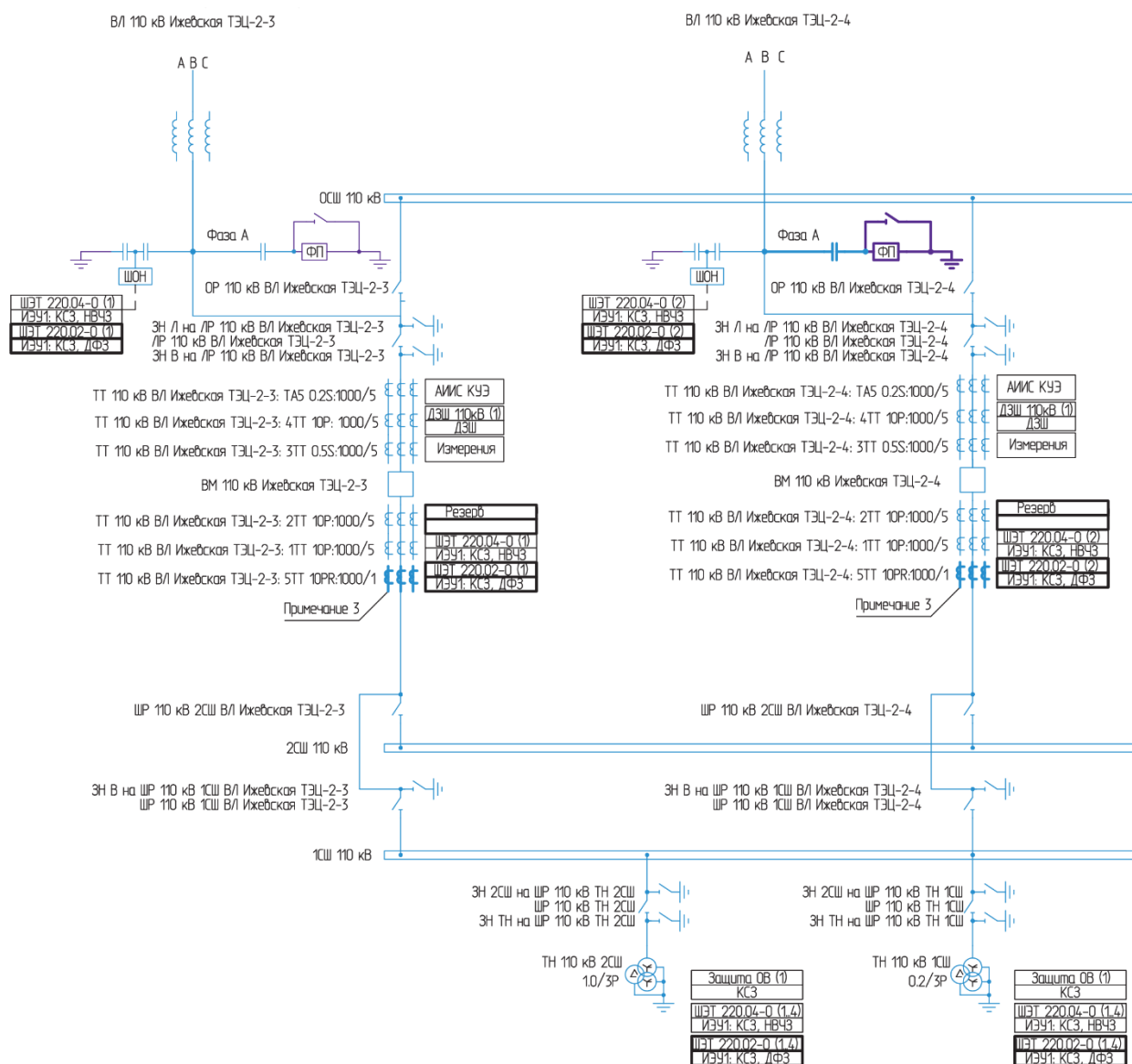


Рисунок 20 - Схема распределения устройств ИТС по ТТ и ТН (фрагмент)

Предполагается интеграция шкафа в существующую ЦС ПС 220 кВ Садовая с установкой световых табло на панели управления «работа основной защиты 2 комплект».

2.4 Решения в части УРОВ 110 кВ

Согласно решениям раздела 2.3.2, из работы выводятся панели ЭПЗ-1636/67 ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая-1,2,3,4, имеющие в своем

составе пусковые токовые органы УРОВ этих присоединений. Реализация пускового токового органа предусматривается в составе:

- существующих шкафов НВЧЗ+СЗ. Необходима модернизация ПО терминала в составе шкафов НВЧЗ+СЗ ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая-1,2,3,4 с целью реализации решений в части УРОВ 110 кВ.
- проектируемых шкафов ДФЗ+СЗ.

Пусковые органы УРОВ действуют на выходные реле терминалов. Контакты выходных реле терминалов через переключающие устройства действуют в централизованный УРОВ 110 кВ для реализации контроля тока через ВМ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2-1,2,3,4 или ОВМ 110 кВ при переводе рассматриваемых ЛЭП на него.

2.5 Организация схемы перевода защиты на ОВМ 110 кВ

Предполагается использование существующей схемы перевода токовых цепей проектируемого шкафа защит на ОВМ 110 кВ. Существующая схема перевода организована на трансформаторе тока ТА6, блоки перевода токовых цепей установлены на панели 22Р.

Предполагается использование пускового органа УРОВ в составе существующих шкафов НВЧЗ+СЗ и проектируемых шкафов ДФЗ+СЗ, действующих через переключающее устройство в схему пуска централизованного УРОВ при отказе ОВМ 110 кВ.

Учитывается, что коэффициент трансформации ТТ ОВМ 110 кВ – 1000/5, для работы ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая-1,2,3,4 должна быть рассчитана отдельная группа уставок.

Для осуществления логики автоматического ускорения отдельных ступеней ступенчатых защит ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая-1,2,3,4 в составе проектируемых шкафов необходимо предусмотреть реле-повторитель с 4 контактами РПО на панели АУВ ОВМ 110 кВ 22Р.

2.6 Решения по организации токовых цепей существующих защит

Ведомость кабельной продукции приведена в таблице 23.

Таблица 23 – Ведомость новых кабелей токовых цепей существующих защит

Начало	Конец	Сечение	Длина
ОРУ 110 кВ. яч. ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая - 1	ОПУ. Панель 74Р	4мм ²	180м
ОРУ 110 кВ. яч. ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая - 2	ОПУ. Панель 78Р	4мм ²	210м
ОРУ 110 кВ. яч. ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая - 3	ОПУ. Панель 34Р	4мм ²	270м
ОРУ 110 кВ. яч. ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая - 4	ОПУ. Панель 37Р	4мм ²	260м
ОПУ. Панель 22Р	ОПУ. Панель 74Р	12мм ²	30м
ОПУ. Панель 22Р	ОПУ. Панель 78Р	12мм ²	-
ОПУ. Панель 22Р	ОПУ. Панель 34Р	12мм ²	-
ОПУ. Панель 22Р	ОПУ. Панель 37Р	12мм ²	-

Сечения проводников выбраны на основании раздела 1.

2.7 Организация цепей напряжения

В нормальном режиме питание по цепям напряжения вновь устанавливаемых устройств РЗА для ВЛ 110 кВ должно осуществляться от трансформатора напряжения ТН-110 1 СШ или ТН-110 2 СШ, в зависимости от фиксации ВЛ 110 кВ к конкретной системе шин 110 кВ. «Переключение цепей напряжения производится с помощью существующих реле-повторителей положения разъединителей (шинных) работы ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая-1,2,3,4.

При переводе комплекта ДФЗ+СЗ на обходной выключатель, предусматривается использование цепей напряжения, получаемых от РПР ОВМ 110 кВ» [27].

Ввиду незначительного увеличения потребляемой мощности по цепям напряжения – суммарно 2 ВА, необходимость в проверочном расчете отсутствует.

«Резервные защиты выполняются с блокировкой при неисправности цепей напряжения (БНН). Действие БНН:

- на блокировку защит, которые могут сработать неправильно при неисправности цепей напряжения;
- на автоматический ввод ненаправленной токовой защиты от всех видов КЗ – аварийной МТЗ» [10].

2.8 Решения в части РАС

Для присоединений 110 кВ функции РАС должны выполняться:

- микропроцессорными терминалами РЗА;
- осциллографом подсистемы РАС [29].

В систему РАС предусматривается сбор дискретных сигналов от проектируемого шкафа.

Сбор и хранение файлов осциллограмм с проектируемых устройств организуется на сервере РАС. Срок хранения информации об аварийных событиях на объекте должен составлять не менее 3 (трех) лет. Предоставление данных РАС, хранящихся на сервере РАС, в АС СО предусматривается по запросу филиала АО «СО ЕЭС».

Предусматривается подключение новых дискретных сигналов на свободные входы модуля А2-Е1, в составе шкафа 126Р.

Список сигналов передаваемых в систему РАС и сформированный в соответствии с ГОСТ Р 58601–2019 [5] представлен в таблице 24.

Таблица 24 – Перечень сигналов, передаваемых в систему РАС

Присоединение	Наименование сигнала	Интерфейс передачи	Источник сигнала	Приемник сигнала	Примечание
ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ 2 – Садовая 1	Срабатывание (обобщенный)	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	Действие на пуск РАС
	Неисправность (обобщенный)	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	-
	Осциллографирование «Ток ПРМ»	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	-
	Осциллографирование «Ток ПРД»	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	-
ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ 2 – Садовая 2	Срабатывание (обобщенный)	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	Действие на пуск РАС
	Неисправность (обобщенный)	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	-
	Осциллографирование «Ток ПРМ»	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	-
	Осциллографирование «Ток ПРД»	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	-
ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ 2 – Садовая 3	Срабатывание (обобщенный)	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	Действие на пуск РАС
	Неисправность (обобщенный)	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	-
	Осциллографирование «Ток ПРМ»	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	-
	Осциллографирование «Ток ПРД»	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	-
ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ 2 – Садовая 4	Срабатывание (обобщенный)	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	Действие на пуск РАС
	Неисправность (обобщенный)	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	-
	Осциллографирование «Ток ПРМ»	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	-
	Осциллографирование «Ток ПРД»	физический	ДФЗ+СЗ	Шкаф 126Р	-

Существующая система РАС обладает достаточным объемом резерва, кроме того, подключение аналоговых цепей производится к существующим преобразователям, дополнительной модернизации РАС не требуется.

Выводы по разделу.

Проектируемые устройства РЗА должны быть выполнены с использованием микропроцессорной техники. Выбран шкаф

дифференциально-фазной защиты ЛЭП 110 – 220 кВ с комплектом ступенчатых защит ШЭТ 220.02-0.

Дистанционные защиты должны иметь автоматическую блокировку ступеней, которые могут неправильно работать при качаниях в энергосистеме.

Резервные защиты ЛЭП должны иметь в своем составе функцию ненаправленной токовой защиты от всех видов КЗ, вводимую автоматически при срабатывании БНН при отсутствии возможности селективной и чувствительной защиты данной ЛЭП другими устройствами РЗА, выполняющими функцию ближнего резервирования.

Функции телеотключения и телеускорения в проектируемых шкафах ДФЗ + СЗ со стороны Ижевской ТЭЦ-2 не предусматриваются, на основании этого в проектируемых в данной работе шкафах эти функции выводятся в резерв.

В качестве полуккомплектов основных защит ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая I (II, III, IV) цепь со стороны Ижевской ТЭЦ-2 предусматривается использование шкафов типа ШЭ2607 083 производства ООО НПП «ЭКРА», следовательно, на стороне ПС 220 кВ Садовая также должны быть установлены шкафы, обеспечивающие функциональную совместимость комплектов основных защит ВЛ 110 кВ.

Основные функции, необходимые для реализации в МП ИЭУ в составе шкафа ДФЗ+СЗ ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая-1,2,3,4: ДФЗ, трехступенчатая ДЗ, пятиступенчатая ТНЗНП, МФТО, аварийная МТЗ, ПО УРОВ, БНН, ОУ, АУ, РАС.

В работе разработаны основные решения в части существующих и проектируемых устройств РЗА, а также УРОВ 110 кВ. Рассмотрена организация схемы перевода защиты на ОВМ 110 кВ.

Определены решения по организации токовых цепей и цепей напряжения, а также решения в части РАС.

3 Организация питания проектируемого шкафа оперативным током

В данном разделе приведены расчеты по выбору и проверкам проводников и защитных аппаратов в системе СОПТ.

Расчет произведен на основании:

- СТО-56947007-29.120.40.216-2016 «Методические указания по выбору оборудования СОПТ» [17];
- ГОСТ 29176–91 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках постоянного тока» [4], технических данных оборудования;
- Технических данных производителей защитных аппаратов.
- Технические данные производителей электроприемников СОПТ.

3.1 Расчет нагрузок

3.1.1 Расчет тока нагрузки присоединения

Ток нагрузки электроприемника (ЭП) находится по формуле:

$$I_{ЭП} = \frac{P_{ЭП}}{U_{ном}}, \quad (6)$$

где $P_{ЭП}$ – мощность электроприемника, Вт;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение СОПТ, В.

Данный расчет применяется как для постоянной, так и для кратковременной нагрузки.

3.1.2 Расчет тока нагрузки на шинках ПУ

Ток нагрузки на шинках находится как сумма токов всех присоединений, питающихся от данных шинок:

$$I_{\text{нагр.шины}} = \sum_{n=1}^i I_{\text{ЭП},n}, \quad (7)$$

где $I_{\text{ЭП},n}$ – ток нагрузки присоединения с номером n , А;

n – порядковый номер присоединения.

Результаты расчета нагрузок представлены в таблице 25.

Таблица 25 - Результаты расчета нагрузок

Наименование автомата	Наименование потребителя	Тип нагрузки (пост./кратк.)	Количество потребителей, шт	Потребитель	Мощность ЭП, Вт	Постоянная нагрузка		Итого
						Мощность, Вт	Ток, А	
ПУ 9 АВ3	Терминал ДФЗ + ПП ВЧ	пост.	1	ДФЗ+ПП ВЧ	240	240	1,091	4,364
ПУ 9 АВ4	Терминал ДФЗ + ПП ВЧ	пост.	1	ДФЗ+ПП ВЧ	240	240	1,091	
ПУ 11 АВ3	Терминал ДФЗ + ПП ВЧ	пост.	1	ДФЗ+ПП ВЧ	240	240	1,091	
ПУ 11 АВ4	Терминал ДФЗ + ПП ВЧ	пост.	1	ДФЗ+ПП ВЧ	240	240	1,091	

В данном расчете ток нагрузки на шинках представляет собой сумму токов всех постоянных нагрузок и кратковременной нагрузки.

3.2 Выбор и проверка проводников, отходящих от ПУ

При расчетах рассматривалась схема, представленная на рисунке 21.



АБ – аккумуляторная батарея, ЩПТ- щит постоянного тока,
ПУ – Панель управления

Рисунок 21 – Расчетная схема, принятая в расчетах

3.2.1 Расчет сопротивлений кабелей

Сопротивление кабелей для участка 3 с учетом внутреннего сопротивления АВ рассчитывалось по формуле:

$$R_{yc} = R_{y\partial} \cdot L \cdot \frac{2}{n} + R_{AB}, \quad (8)$$

где « $R_{y\partial}$ – удельное сопротивление для соответствующего сечения, Ом;

L – длина кабеля, м;

n – количество жил, используемых на полюс, шт;

R_{AB} – сопротивление защитного аппарата, Ом. Принято в соответствии с приложением Ж СТО-56947007-29.120.40.216-2016» [17].

«Удельное сопротивление $R_{y\partial}$ берется из таблицы «Активные сопротивления кабелей с медными жилами (напряжением до 1 кВ)» приложения Д СТО-56947007-29.120.40.216-2016, переведённое в Ом.

Сопротивление защитного аппарата берется из таблицы «Активные сопротивления защитных аппаратов напряжением до 1 кВ» приложения Ж СТО-56947007-29.120.40.216- 2016, переведённое в Ом» [17].

В настоящем расчете сопротивления кабелей для участков 1, 2 приняты следующими:

Для участка 1 (АБ-ЩПТ):

$$R_{AB-ЩПТ} = 0,0035 \text{ Ом.}$$

Для участка 2 (ЩПТ-ПУ) шинки:

$$R_{ЩПТ-ПУ} = R_{каб} + R_{к}, \quad (9)$$

где $R_{каб}$ – сопротивление кабеля на участке ЩПТ-ПУ, подходящего к шинкам, Ом;

R_k – сопротивление катушек и контактов, болтовых соединений на участке ЩПТ-ПУ, Ом.

3.2.2 Расчет токов КЗ

Для расчета токов КЗ составляется схема замещения, представленная на рисунке 22.

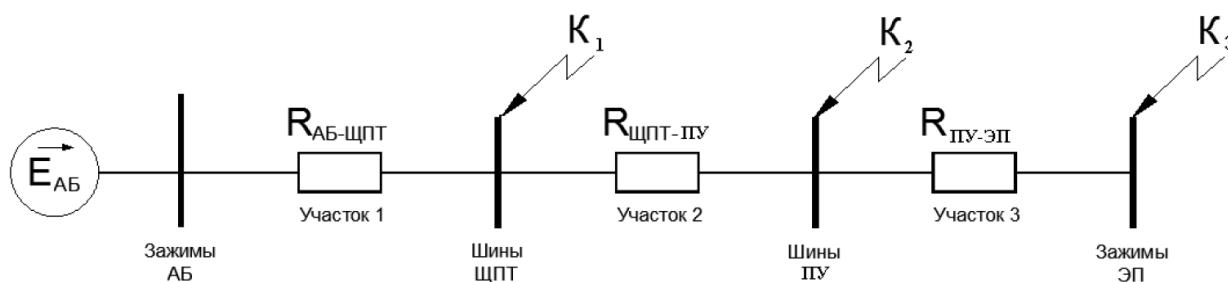


Рисунок 22 - Схема замещения СОПТ для расчета токов КЗ

Расчет металлического тока КЗ в точке КЗ производится по формуле:

$$I_{КЗ.КЗ} = \frac{U \cdot N}{R_{АБ} \cdot N + R_{АБ-ЩПТ} + R_{ЩПТ-ПУ} + R_{ПУ-ЭП} + R_{конт}}, \quad (10)$$

где U – напряжение элемента, принято 2,23 В/эл;

N – количество элементов, принято 104, шт;

$R_{АБ}$ – внутреннее сопротивление элемента АБ, принято 0,00025, Ом;

$R_{АБ-ЩПТ}$ – сопротивление участка 1 (АБ-ЩПТ), Ом;

$R_{ЩПТ-ПУ}$ – сопротивление участка 2 (ЩПТ-ПУ), Ом;

$R_{ПУ-ЭП}$ – сопротивление участка 3 (ПУ-ЭП), Ом;

$R_{конт}$ – сопротивление контактных соединений, принято – 0,002, Ом.

Результаты расчетов токов КЗ в СОПТ представлены в таблице 26.

Таблица 26 - Результаты расчетов токов КЗ в СОПТ

Наименование автомата	Исходные данные													
	Аккумуляторная батарея			Участок 1 (АБ-ЩПТ)				Участок 2 (ЩПТ-ПУ)				Кабель, участок 3 (ПУ - ЭП)		
	Кол-во эл. N, шт	Напряж. эл. U, В	Вн. соп. эл. R _{АБ} , Ом	Кол. жил на полюс n, шт	Принято сечение S, мм ²	Дли на L, м	Ток нагрузки и I _{АБ} , А	Кол. жил на полюс n, шт	Принято сечение S, мм ²	Дли на L, м	Ток нагрузки I _{ЩПТ} , А	Кол. жил n, шт	Сечение S, мм ²	Дли на L, м
ПУ 9 АВ3	104	2,23	0,00025	1	35	40	204,364	1	35	40	19,364	1	4	40
ПУ 9 АВ4	104	2,23	0,00025	1	35	40	204,364	1	35	40	19,364	1	4	45
ПУ 11 АВ3	104	2,23	0,00025	1	35	40	204,364	1	35	40	19,364	1	4	45
ПУ 11 АВ4	104	2,23	0,00025	1	35	40	204,364	1	35	40	19,364	1	4	45

Продолжение таблицы 26

Наименование автомата	Расчет сопротивления, Ом			Расчет металлического тока КЗ, А	Коэффициент дуги (Кд) по ГОСТ 29176-91 пр. 2	Расчет дугового тока КЗ, А
	Уч. 1 (АБ-ЩПТ)	Уч. 2 (ЩПТ-ПУ)	Уч.3 (ПУ-ЭП)	Точка Кз, Зажимы ЭП		Точка Кз, Зажимы ЭП
	$R_{AB} = R_{уд} \times L \times 2 / n$	$R_{ЩПТ} = R_{уд} \times L \times 2 / n$	$R_{пу} = R_{AB} + R_{уд} \times L \times 2 / n$	$I_{КЗ.КЗ} = (U \times N) / ((R_{AB} \times N) + R_{ЩПТ} + R_{ШПОБР} + R_{конт})$		$I_{КЗД.КЗ} = I_{КЗ.КЗ} \times K_d$
ПУ 9 АВ3	0,04	0,04	$0,121 + 0,00441 \times 40 \times 2 / 1 = 0,4738$	$(2,23 \times 104) / ((0,00025 \times 104) + 0,04 + 0,04 + 0,4738 + 0,05) = 368$	0,555	$0,555 \times 368 = 204,24$
ПУ 9 АВ4	0,04	0,04	$0,121 + 0,00441 \times 45 \times 2 / 1 = 0,5179$	$(2,23 \times 104) / ((0,00025 \times 104) + 0,04 + 0,04 + 0,5179 + 0,05) = 344$	0,555	$0,555 \times 344 = 190,92$
ПУ 11 АВ3	0,04	0,04	$0,121 + 0,00441 \times 45 \times 2 / 1 = 0,5179$	$(2,23 \times 104) / ((0,00025 \times 104) + 0,04 + 0,04 + 0,5179 + 0,05) = 344$	0,555	$0,555 \times 344 = 190,92$
ПУ 11 АВ4	0,04	0,04	$0,121 + 0,00441 \times 45 \times 2 / 1 = 0,5179$	$(2,23 \times 104) / ((0,00025 \times 104) + 0,04 + 0,04 + 0,5179 + 0,05) = 344$	0,555	$0,555 \times 344 = 190,92$

Расчет дугового тока КЗ в точке КЗ выполняется по формуле:

$$I_{КЗД.КЗ} = I_{КЗ.КЗ} \cdot K_D, \quad (11)$$

где K_D – коэффициент дуги, зависящий от сопротивления цепи протекания тока КЗ. Определяется по зависимости, представленной в ГОСТ 29176–91 приложение 2 характеристика 1.

3.2.3 Проверка проводника по условию длительного протекания тока

«Сечение проводника проверяется по длительно допустимому току, удовлетворяющему условию:

$$I_{\text{длит.доп}} \geq \frac{I_{\text{ЭП}}}{n \cdot K_t}, \quad (12)$$

где $I_{\text{длит.доп}}$ – длительно допустимый ток проводника, А;

$I_{\text{ЭП}}$ – ток постоянной (кратковременной) нагрузки, протекающий через ЭП, А;

n – количество жил на полюс, шт;

K_t – поправочный коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды» [3]. Для упрощения, в расчетах K_t принят одинаковым для всех присоединений $K_t = 0,67$ как наихудший, для условия расчета.

Длительно допустимый ток проводника $I_{\text{длит.доп}}$ выбирается согласно приложению Г СТО-56947007-29.120.40.216-2016.

Данная проверка применяется как для постоянной, так и для кратковременной нагрузки.

3.2.4 Проверка по термической стойкости и невозгораемости кабеля на участке 3

«Проверка проводников на термическую стойкость и невозгораемость производится сопоставлением температур проводников к моменту отключения короткого замыкания с максимальными предельно допустимыми значениями, которые составляют по условиям термической стойкости» [1].

Результаты проверки проводников СОПТ приведены в таблице 27.

3.3 Выбор и проверка защитных аппаратов в ПУ

Выбор автоматических выключателей в ПУ выполняется выбором номинального тока и защитной характеристики АВ. Предварительно выбранные автоматические выключатели и результаты расчетов проверки чувствительности автоматического выключателя к токам дугового КЗ на зажимах ЭП и резервирования АВ на вводе представлены в таблице 28.

«Расчетные условия короткого замыкания для проверки по провалам напряжения:

- расчетная схема – нормальная;
- расчетное место – конец основной защиты;
- расчетный вид – металлическое;
- расчетный момент времени - начальный момент;
- предшествующий режим - аккумуляторная батарея заряжена» [26].

Продолжительность провала $t_{\text{пров.}}$ при токах КЗ определяется расчетом кратности АВ к токам КЗ. Во всех случаях кратность превышает 30, соответственно продолжительность провала для всех АВ не будет превышать 0,01с.

Результаты проверки выбранных автоматических выключателей на падение напряжения приведены в таблице 29.

Таблица 27 - Результаты проверки проводников СОПТ

Наименование автомата	Проверка кабеля на участке 3 (ШОТ-ЭП)						
	Проверка по условию длит. протекания тока	Проверка по падению напряжения на зажимах ЭП				Время срабатывания АВ.	Время откл. вводного АВ
	$I_{д.доп} \geq I_{ЭП}/(n \times K_t)$	Участок 1 ΔU_1	Участок 2 ΔU_2	Участок 3 $\Delta U_3 = I_{ЭП} \times R_{пу-ЭП}, В$	Проверка по потере напряжения $\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 \leq (N \times U_{нн.раб.ак} - 0,8 \times U_n)$	$t_{отк} = 0,01 \text{ с.}$	
ПУ 9 АВ3	$38 \geq 1,091/1 \times 0,67 = 1,628$	1	0,775	0,517	$1 + 0,775 + 0,517 = 2,292 \leq 57$	0,01	0,1
ПУ 9 АВ4	$38 \geq 1,091/1 \times 0,67 = 1,628$	1	0,775	0,565	$1 + 0,775 + 0,565 = 2,34 \leq 57$	0,01	0,1
ПУ 11 АВ3	$38 \geq 1,091/1 \times 0,67 = 1,628$	2	0,775	0,565	$2 + 0,775 + 0,565 = 3,34 \leq 57$	0,01	0,1
ПУ 11 АВ4	$38 \geq 1,091/1 \times 0,67 = 1,628$	3	0,775	0,565	$3 + 0,775 + 0,565 = 4,34 \leq 57$	0,01	0,1

Продолжение таблицы 27

Наименование автомата	Проверка кабеля на участке 3 (ШОТ-ЭП)	
	Проверка по термической стойкости кабеля на участке 3	Проверка на невозгораемость кабеля на участке 3
	Темпер. нагрева при дуговом замыкании в начале кабеля $\vartheta_{кон} = (\vartheta_{нач} + \beta) \times \text{EXP}(((I_{КЗ} \times K_d)^2 \times t_{откл}) / (K_1^2 \times S_{пр}^2 \times \varepsilon^2)) - \beta \leq 160^\circ\text{C}$ $\vartheta_{нач} = 30^\circ\text{C}; \beta = 234,5^\circ\text{K}; K_1 = 226; \varepsilon = 1$	Темп. нагрева при метал. замыкании в конце кабеля $\vartheta_{кон} = (\vartheta_{нач} + \beta) \times \text{EXP}(((I_{КЗ.КЗ}^2 \times t) / (K_1^2 \times S_{пр}^2 \times \varepsilon^2)) - \beta \leq 350^\circ\text{C}$ $\vartheta_{нач} = 30^\circ\text{C}; \beta = 234,5^\circ\text{K}; K_1 = 226; \varepsilon = 1$
ПУ 9 АВ3	$\vartheta_{кон} = (30 + 234,5) \times \text{EXP}((1750)^2 \times 0,01 / (226^2 \times 4^2 \times 1)) - 234,5 = 40 < 160$	$\vartheta_{кон} = (30 + 234,5) \times \text{EXP}(368^2 \times 0,1 / (226^2 \times 4^2 \times 1)) - 234,5 = 34 < 350$
ПУ 9 АВ4	$\vartheta_{кон} = (30 + 234,5) \times \text{EXP}((1750)^2 \times 0,01 / (226^2 \times 4^2 \times 1)) - 234,5 = 40 < 160$	$\vartheta_{кон} = (30 + 234,5) \times \text{EXP}(368^2 \times 0,1 / (226^2 \times 4^2 \times 1)) - 234,5 = 34 < 350$
ПУ 11 АВ3	$\vartheta_{кон} = (30 + 234,5) \times \text{EXP}((1750)^2 \times 0,01 / (226^2 \times 4^2 \times 1)) - 234,5 = 40 < 160$	$\vartheta_{кон} = (30 + 234,5) \times \text{EXP}(368^2 \times 0,1 / (226^2 \times 4^2 \times 1)) - 234,5 = 34 < 350$
ПУ 11 АВ4	$\vartheta_{кон} = (30 + 234,5) \times \text{EXP}((1750)^2 \times 0,01 / (226^2 \times 4^2 \times 1)) - 234,5 = 40 < 160$	$\vartheta_{кон} = (30 + 234,5) \times \text{EXP}(368^2 \times 0,1 / (226^2 \times 4^2 \times 1)) - 234,5 = 34 < 350$

Таблица 28 – Результаты проверки выбранных автоматических выключателей в СОПТ

Наименование автомата	Исходные данные					Проверка автоматического выключателя							Проверка резервирования, АВ на вводе
	ЩПТ	Автоматические выключатели на ПУ				Проверка на откл. способность	Проверка по длит. допустимому току	Отстройка от тока нагрузки	Проверка чувствительности автоматического выключателя к токам дугового КЗ на зажимах ЭП				
		Но м. ток АВ, $I_{н.А}$	Но м ток АВ, $I_{н.АВ}$, А	Хар-ка срабат-я	Мин. кратность АВ, K_{min}				Макс. кратность АВ, K_{max}	$I_{откл.АВ} > I_{К.З. макс} I_{откл.} = 6000 \text{ А}$	$I_{н.АВ} \leq I_{д.д.}$	$I_{нагр.} \leq I_{н.АВ}$	
ПУ 9 АВ3	60	4	С	5	15	$6000 > 293$	$4 \leq 38$	$1,091 \leq 4$	$R_{дкз} = 1,5 \times (104 \times 0,00025) + 0,04 + 0,04 + 0,4738 = 0,59$	$I_{К.З. дуг. min} = 0,555 \times (104 \times 1,9) / 0,59 = 196,3$	$K_{ч} = 196,3 / (4 \times 15) = 3,27 > 1,1$	$K_{ч} = 196,3 / 60 = 3,27 > 1,1$	
ПУ 9 АВ4	60	4	С	5	15	$6000 > 293$	$4 \leq 38$	$1,091 \leq 4$	$R_{дкз} = 1,5 \times (104 \times 0,00025) + 0,04 + 0,04 + 0,5179 = 0,64$	$I_{К.З. дуг. min} = 0,555 \times (104 \times 1,9) / 0,64 = 181$	$K_{ч} = 181 / (4 \times 15) = 3,01 > 1,1$	$K_{ч} = 181 / 60 = 3,01 > 1,1$	
ПУ 11 АВ3	60	4	С	5	15	$6000 > 293$	$4 \leq 38$	$1,091 \leq 4$	$R_{дкз} = 1,5 \times (104 \times 0,00025) + 0,04 + 0,04 + 0,5179 = 0,64$	$I_{К.З. дуг. min} = 0,555 \times (104 \times 1,9) / 0,64 = 181$	$K_{ч} = 181 / (4 \times 15) = 3,01 > 1,1$	$K_{ч} = 181 / 60 = 3,01 > 1,1$	
ПУ 11 АВ4	60	4	С	5	15	$6000 > 293$	$4 \leq 38$	$1,091 \leq 4$	$R_{дкз} = 1,5 \times (104 \times 0,00025) + 0,04 + 0,04 + 0,5179 = 0,64$	$I_{К.З. дуг. min} = 0,555 \times (104 \times 1,9) / 0,64 = 181$	$K_{ч} = 181 / (4 \times 15) = 3,01 > 1,1$	$K_{ч} = 181 / 60 = 3,01 > 1,1$	

Таблица 29 - Проверка выбранных автоматических выключателей на падение напряжения

Наименование автомата	Напряжение на АБ в момент короткого замыкания, В	Остаточное напряжение на шинках ЭП, В	Продолжительность провала напряжения, с		Результат проверки	
	$U_{AB2} = E_{AK} \times N - I_{K3} \times R_{AB} \times N$		Расчетная кратность $I_{K3}/I_{ном. AB}$	Ток КЗ по хар. срабатывания	$U_{ост2} > 154$ В	$t_{пров} < 0,5$
ПУ 9 АВ3	$2,23 \times 104 - 0,00025 \times 104 \times 368 = 222,35$	$222,35 - 368 \times 0,02758 = 212,2$	92	0,01	$212,2 > 154$	$0,01 < 0,5$
ПУ 9 АВ4	$2,23 \times 104 - 0,00025 \times 104 \times 344 = 222,98$	$222,98 - 344 \times 0,02758 = 213,49$	86	0,01	$213,49 > 154$	$0,01 < 0,5$
ПУ 11 АВ3	$2,23 \times 104 - 0,00025 \times 104 \times 344 = 222,98$	$222,98 - 344 \times 0,02758 = 213,49$	86	0,01	$213,49 > 154$	$0,01 < 0,5$
ПУ 11 АВ4	$2,23 \times 104 - 0,00025 \times 104 \times 344 = 222,98$	$222,98 - 344 \times 0,02758 = 213,49$	86	0,01	$213,49 > 154$	$0,01 < 0,5$

Выводы по разделу.

Выполнен расчет нагрузок от вновь устанавливаемых терминалов, получающих питание от панели управления в системе СОПТ, суммарный дополнительный ток составил 4,4 А.

Составлены расчетная схема и схема замещения СОПТ для расчета токов КЗ. Определены сопротивления входящих в нее элементов и произведены расчеты металлического и дугового токов КЗ в трех точках.

Проводники в системе СОПТ проверены по условию длительного протекания тока, по термической стойкости и невозгораемости кабеля.

Выбор автоматических выключателей в ПУ выполнялся выбором номинального тока и защитной характеристики АВ. Предварительно выбранные автоматические выключатели были проверены на чувствительность к токам дугового КЗ на зажимах ЭП и резервирования АВ на вводе.

Также выбранные автоматические выключатели были проверены на падение напряжения на АВ в момент короткого замыкания.

Заключение

Целью бакалаврской работы было повышение надежности функционирования линий электропередач 110 кВ ПС Садовая и снижение негативных последствий возможных аварийных ситуаций на ЛЭП.

Для достижения поставленной в данной бакалаврской работе цели в работе были решены следующие задачи:

- произведен расчет характеристик ТТ с учетом изменений, вызываемых процессом насыщения при КЗ;
- определены технические решения по оборудованию РЗА и регистратору аварийных событий;
- произведен расчет системы оперативного постоянного тока на подстанции.

Расчет времени до насыщения ТТ (существующих) показал, что для всех устанавливаемых защит в составе проектируемых шкафов ДФЗ+СЗ (ДФЗ, ДЗ, ТНЗНП) ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 1,2,3,4 для максимальных токов короткого замыкания не обеспечивается их корректная работа в режиме, когда остаточное намагничивание сердечников ТТ максимально.

Необходима установка новых ТТ. Вновь устанавливаемые ТТ выбираются с классом точности 10PR.

Расчет времени до насыщения ТТ (проектируемых) показал, что для всех устанавливаемых защит в составе шкафов проектируемых шкафов ДФЗ+СЗ (ДФЗ, ДЗ, ТНЗНП) ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 1,2,3,4 для максимальных токов короткого замыкания обеспечивается их корректная работа.

При переводе проектируемых шкафов ДФЗ+СЗ (ДФЗ, ДЗ, ТНЗНП) ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая 1,2,3,4 на ОВМ 110 кВ возможна некорректная их работа. При наличии остаточной намагниченности сердечника время до насыщения ТТ составляет 4,12 мс при трехфазном КЗ и 3,78 мс при однофазном КЗ, что при неблагоприятной ситуации ведет к рискам

неправильной работы защит. Для ДФЗ (согласно ЭКРА.650323.085 Д) существуют риски неселективного срабатывания защит при КЗ вне защищаемой зоны и замедления при близком КЗ в зоне действия. Для ТНЗНП и ДЗ существуют риски замедления работы защиты и отключения КЗ с выдержкой времени второй ступени. После проведения общих для данного случая мероприятий (увеличение сечения проводников контрольных кабелей для цепей тока) было выявлено, что они не приводят к существенному улучшению ситуации. В связи с этим при ближайшей реконструкции необходима замена ТТ в ячейке ОВМ 110 кВ на новые с характеристиками, обеспечивающими правильную работу устройств РЗА. Сечение контрольных кабелей токовых цепей необходимо принять 4 мм². Сечение контрольных кабелей токовых цепей в схеме перевода необходимо принять 12 мм².

Проектируемые устройства РЗА должны быть выполнены с использованием микропроцессорной техники. Выбран шкаф дифференциально-фазной защиты ЛЭП 110 – 220 кВ с комплектом ступенчатых защит ШЭТ 220.02-0.

Дистанционные защиты должны иметь автоматическую блокировку ступеней, которые могут неправильно работать при качаниях в энергосистеме.

Резервные защиты ЛЭП должны иметь в своем составе функцию ненаправленной токовой защиты от всех видов КЗ, вводимую автоматически при срабатывании БНН при отсутствии возможности селективной и чувствительной защиты данной ЛЭП другими устройствами РЗА, выполняющими функцию ближнего резервирования.

Функции телеотключения и телеускорения в проектируемых шкафах ДФЗ + СЗ со стороны Ижевской ТЭЦ-2 не предусматриваются, на основании этого в проектируемых в данной работе шкафах эти функции выводятся в резерв.

В качестве полуккомплектов основных защит ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая I (II, III, IV) цепь со стороны Ижевской ТЭЦ-2 предусматривается использование шкафов типа ШЭ2607 083 производства ООО НПП «ЭКРА»,

следовательно, на стороне ПС 220 кВ Садовая также должны быть установлены шкафы, обеспечивающие функциональную совместимость комплектов основных защит ВЛ 110 кВ.

Основные функции, необходимые для реализации в МП ИЭУ в составе шкафа ДФЗ+СЗ ВЛ 110 кВ Ижевская ТЭЦ-2 – Садовая-1,2,3,4: ДФЗ, трехступенчатая ДЗ, пятиступенчатая ТНЗНП, МФТО, аварийная МТЗ, ПО УРОВ, БНН, ОУ, АУ, РАС.

В работе разработаны основные решения в части существующих и проектируемых устройств РЗА, а также УРОВ 110 кВ. Рассмотрена организация схемы перевода защиты на ОВМ 110 кВ.

Определены решения по организации токовых цепей и цепей напряжения, а также решения в части РАС.

Выполнен расчет нагрузок от вновь устанавливаемых терминалов, получающих питание от панели управления в системе СОПТ, суммарный дополнительный ток составил 4,4 А.

Составлены расчетная схема и схема замещения СОПТ для расчета токов КЗ. Определены сопротивления входящих в нее элементов и произведены расчеты металлического и дугового токов КЗ в трех точках.

Проводники в системе СОПТ проверены по условию длительного протекания тока, по термической стойкости и невозгораемости кабеля.

Выбор автоматических выключателей в ПУ выполнялся выбором номинального тока и защитной характеристики АВ. Предварительно выбранные автоматические выключатели были проверены на чувствительность к токам дугового КЗ на зажимах ЭП и резервирования АВ на вводе.

Также выбранные автоматические выключатели были проверены на падение напряжения на АВ в момент короткого замыкания.

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: 16.11.2024).
4. ГОСТ 29176–91 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках постоянного тока [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004631> (дата обращения: 15.12.2024).
5. ГОСТ Р 58601–2019 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Релейная защита и автоматика. Автономные регистраторы аварийных событий. Нормы и требования [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169612> (дата обращения: 13.12.2024).
6. 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: 13.12.2024).
7. ГОСТ Р 58887-2020 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Дистанционная и токовые защиты линий электропередачи и оборудования классом напряжения 110–220 кВ. Функциональные требования [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565797990> (дата обращения: 23.11.2024).

8. ГОСТ Р 58981-2020 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Дифференциально-фазная защита линий электропередачи классом напряжения 110-220 кВ. Функциональные требования [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200175080> (дата обращения: 23.11.2024).

9. Кудряков А.Г., Сазыкин В.Г. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018. 263 с.

10. Матаев У.М. Практикум по электроэнергетике (в примерах с решениями): учебное пособие. Алматы: Нур-Принт, Казахский национальный аграрный университет, 2014. 195 с.

11. 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.

12. 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).

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

14. 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 16.12.2024).

15. 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: 16.12.2024).

16. Рекомендации по расчету сечений жил контрольных кабелей в токовых цепях релейной защиты 5915тм-т1 [Электронный ресурс]. URL:

<http://retro-rzia.ru/download/45e76d51fb1f05efc668932ba41ff8c6.html> (дата обращения: 15.12.2024).

17. СТО-56947007-29.120.40.216-2016 Методические указания по выбору оборудования СОПТ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/7ee/a35t2h25qgh0s3bxehuqydtukqqcd8va.pdf> (дата обращения: 15.12.2024).

18. 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).

19. СТО 56947007-33.040.20.022-2009 Устройства РЗА присоединений 110-220 кВ. Типовые технические требования. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200088454> (дата обращения: 15.12.2024).

20. СТО 56947007-33.040.20.282-2019 Типовые шкафы ШЭТ РЗА ЛЭП 110-750 кВ. Архитектура I типа [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/564138877> (дата обращения 04.12.2024).

21. Техническая информация о ПС 220 кВ Садовая [Электронный ресурс]: URL: https://energybase.ru/substation/PS_220_kV_Sadovaya (дата обращения 15.12.2024).

22. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. СПб.: ПЭИПК, 2003. 350 с.

23. 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: 17.11.2024).

24. Шкафы РЗА серий ШЭ2607, ШЭ2710. Методические указания по проверке и выбору трансформаторов тока. ЭКРА.650323.085 Д [Электронный ресурс]: URL: <https://rzia.ru/uploads/files/678/f3ce9a79f9953dabdc81ed090a5e0cbb.pdf> (дата обращения 15.12.2024).

25. Hickey R.B., Robert B. Electrical Engineer's Portable Handbook. USA:

McGraw-Hill Companies, 2012. 575 p.

26. Maria Louis M. Elements of electrical engineering. PHI Learning Pvt. Ltd., 2014. 992 p.

27. Meier von. A. Electric power systems: a conceptual introduction. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 328 p.

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

29. Whitaker J.C. AC power systems. 4rd ed. California: CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, 2014. 428 p.