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

Институт энергетики и электротехники
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»
(наименование кафедры)

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
(код и наименование направления подготовки)
Электроснабжение
(направленность (профиль)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Проектирование электрической части ГПП 110/6 кВ предприятия по выпуску электротехнических изделий»

Студент А.О. Козлов _____
(И.О. Фамилия) (личная подпись)

Руководитель Ю.В. Черненко _____
(И.О. Фамилия) (личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

«____» _____2019 г.

Тольятти 2019

АННОТАЦИЯ

Бакалаврская работа посвящена новому проектированию главной понизительной подстанции 110/6 кВ, одного из крупнейших предприятий Свердловской области и Российской Федерации (далее по тексту РФ) в целом, «Уралэлектротяжмаш» г. Екатеринбург (далее по тексту «УЭТМ).

Объект бакалаврской работы – подстанция «УЭТМ» 110/6 кВ, находящаяся на территории производственной площадки одноименного предприятия «Уралэлектротяжмаш». Предмет бакалаврской работы – электрическая часть нового проектирования подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ.

В бакалаврской работе рассмотрены нагрузки подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ, существующие и прогнозные. В соответствии с прогнозными нагрузками приняты и обоснованы расчетами основные технические решения по электрической части подстанции.

Представленный далее перечень выражает основные разделы, вошедшие в бакалаврскую работу:

- описание объекта проектирования - подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ;
- анализ нагрузок предприятия «УЭТМ»;
- выбор и расчет, требуемого к установке силового трансформатора;
- аналитический выбор главной электрической схемы.
- расчет токов короткого замыкания подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ;
- выбор и расчет необходимого электрооборудования 110 кВ и 6 кВ подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ;
- выбор системы оперативного тока подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ;
- выбор и расчет трансформатора системы собственных нужд подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ;
- заземление и молниезащита подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ.

Бакалаврская работа изложена на 64 страницах машинописного текста. Основное содержание бакалаврской работы включает в себя 2 рисунка, 18 таблиц, 34 библиографических источника.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение…….4

1 Описание объекта проектирования - подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ.....7

2 Анализ нагрузок предприятия «УЭТМ».....10

3 Выбор и расчет, требуемого к установке силового трансформатора на подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ.....16

4 Аналитический выбор главной электрической схемы подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ.....25

5 Расчет токов короткого замыкания подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ.....30

6 Выбор и расчет необходимого электрооборудования 110 кВ и 6 кВ подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ ……..... 34

7 Выбор системы оперативного тока подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ.....55

8 Выбор и расчет трансформатора системы собственных нужд подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ.....56

9 Заземление подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ.....57

10 Молниезащита подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ.....58

Заключение……..59

Список используемых источников…….....…..60

ВВЕДЕНИЕ

Свердловская область, с областным центром в г. Екатеринбург, является одним из самых динамично развивающихся, в области промышленности, регионом РФ. Область расположена на стыке Европейской и Азиатской части континента, и является средоточием природных богатств (уже разведанных и перспективных), крупным транспортным узлом, обладает внушительным научным потенциалом [2].

Промышленность является основой экономики Свердловской области и составляет более 30 % от валового регионального продукта (далее по тексту ВРП) области. Высокая степень развитости промышленности позволила области войти в десятку регионов РФ по объему ВРП (1587,0 миллиардов рублей на 2013 г.).

Промышленность Свердловской области объединяется в себе все базовые отрасли промышленного комплекса: металлургия с удельным весом в экономике 55 %; машиностроение с удельным весом в экономике 26 %; химическая промышленность, пищевая промышленность, агропромышленный комплекс, сельскохозяйственное производство. Согласно данным в [2], более 50 % всей производимой в РФ промышленной продукции относится к деятельности предприятий Свердловской области.

Географическое положение Свердловской области позволяет ей занимать позиции крупного транспортно-логистического узла РФ, что дает мощный импульс экономическому развитию области (торговля продукцией, выпущенной предприятиями региона, и иные экономические связи).

В рамках настоящей бакалаврской работы рассматривает промышленное предприятие «УЭТМ» которое относится к сфере электротехнического машиностроения.

В сфере электротехнического машиностроения согласно [2] планируется рывок за счет увеличения производства высоковольтного оборудования (на 25

% минимум), расширения номенклатуры производимой продукции (инновационное оборудование).

Однако, в электроэнергетическом секторе Свердловской области и города Екатеринбург конкретно, наблюдаются некоторые проблемы, которые могут не позволить выйти на необходимые темпы роста предприятиям, в том числе электротехнической промышленности. Данными проблемами являются значительный физический износ электросетевых объектов (оборудование подстанций и сетей) и значительный моральный износ электросетевых объектов (сильно устаревшее неэкологичное оборудование) [2, 3].

С подобной проблемой столкнулось и предприятие «УЭТМ», на производственной площадке которого находится одноименная понизительная подстанция «УЭТМ» 110/6 кВ. Подстанция введена в эксплуатацию в 1968 г. и на сегодняшний день выделяется сильной изношенностью основного электрооборудования (многократное превышение нормативных сроков эксплуатации), инженерных сетей (кабельные линии, водопроводы, маслопроводы и т.п.), подстанционных зданий, таких как закрытое распределительное устройство (далее по тексту ЗРУ), а также моральным устареванием электрооборудования (различные устройства автоматизации и устройства релейной защиты выполненные на старой элементной базе, маслонаполненное коммутационное оборудование, короткозамыкатели и отделители).

В условиях прогнозного роста производства оборудования предприятия «УЭТМ» и в связи с расширением номенклатуры производимой продукции, а также с учетом прогнозного роста энергопотребления г. Екатеринбург (центральной части города в особенности), остро встает проблема устаревания и износа основных фондов электросетевых объектов. Проблема требует максимально оперативного решения для обеспечения надежного и качественного снабжения потребителей электроэнергии и, в особенности, промышленных потребителей, таких как «УЭТМ» [3].

В соответствии с [3] одна из основных задач, поставленных для развития электрических сетей напряжением 110 кВ – «обновление электросетевого оборудования, связанное с физическим и моральным старением основных фондов и необходимостью повышения надежности электроснабжения существующих потребителей» [3].

Для решения вышеобозначенной задачи в [3] выделяется следующее мероприятие «реконструкция объектов электросетевого хозяйства и новое проектирование» [3].

В соответствии с вышеобозначенным, необходимо новое проектирование подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ или другими словами полное перепроектирование всей подстанции, включающее в себя множество разрабатываемых разделов проектной документации.

В рамках настоящей бакалаврской работы будет рассмотрена электрическая часть нового проектирования подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ.

Целью бакалаврской работы является: обеспечение надежного и качественного электроснабжения промышленного предприятия «УЭТМ».

Достижение цели возможно путем постановки и решения следующих основных задач:

- сбор информации о нагрузках и расчет мощности новых силовых трансформаторов подстанции промышленного предприятия «УЭТМ»;
- расчет токов короткого замыкания новой подстанции;
- выбор схемы внешнего электроснабжения подстанции;
- выбор и обосновывающий расчет электрооборудования подстанции промышленного предприятия «УЭТМ»;
- выбор системы оперативного тока подстанции промышленного предприятия «УЭТМ»;
- выбор и расчет трансформатора системы собственных нужд подстанции промышленного предприятия «УЭТМ»;
- обоснование заземления и молниезащиты подстанции промышленного предприятия «УЭТМ».

1 Описание объекта проектирования - подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

Подстанция «УЭТМ» 110/6 кВ находится на территории производственной площадки одноименного промышленного предприятия «УЭТМ». Административно подстанция «УЭТМ» 110/6 кВ расположена по следующему адресу: Свердловская область, Екатеринбургский промышленный район, г. Екатеринбург, микрорайон Эльмаш, Орджоникидзевский район, ул. Фронтовых Бригад, 22, территория предприятия «Уралэлектротяжмаш».

Координаты подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ - 56.881713° градусов северной широты, 60.646103° градуса восточной долготы (рисунок 1.1).

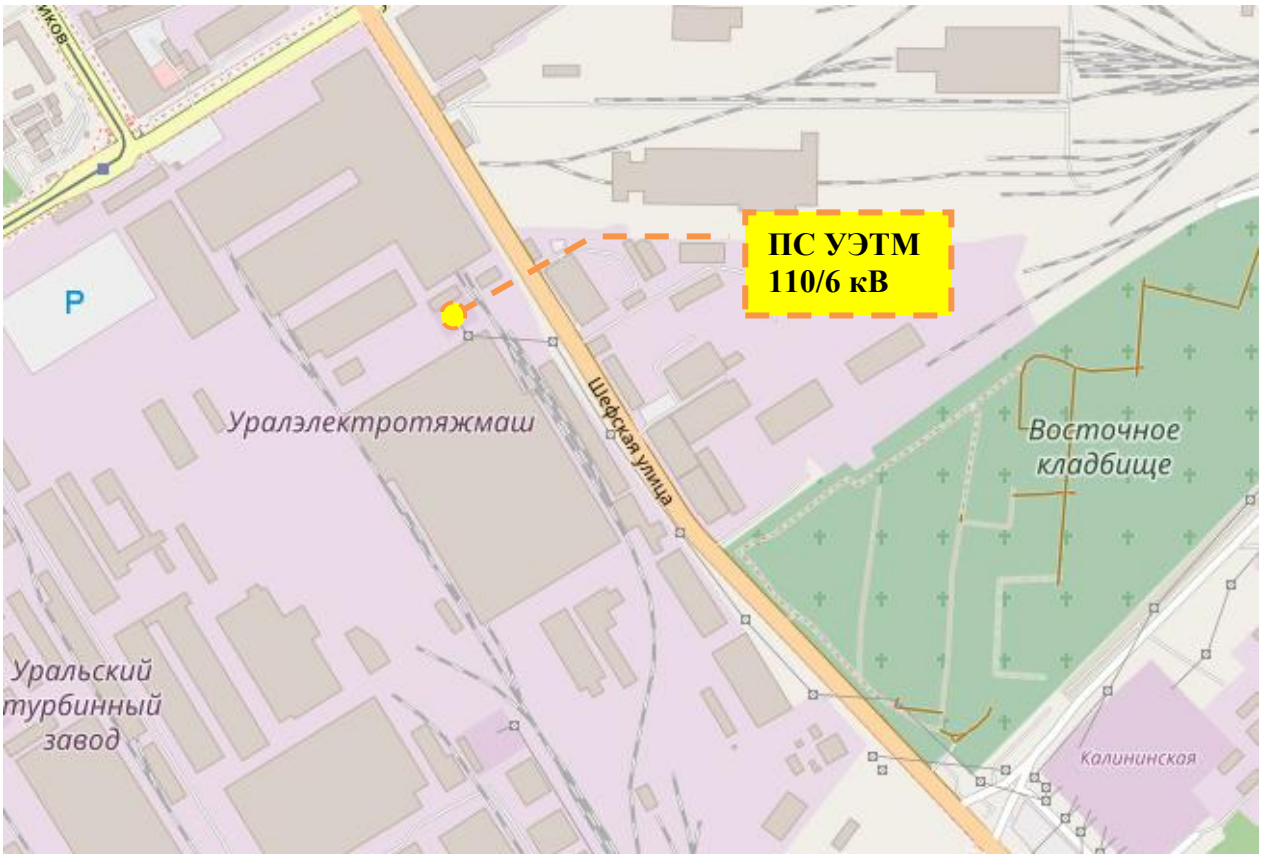

Рисунок 1.1 – Подстанция «УЭТМ» 110/6 кВ

Подстанция «УЭТМ» была введена в эксплуатацию в 1968 г.

Площадь земельного участка, отведенного под подстанцию, составляет 2895,2 м^2.

Подстанция «УЭТМ» 110/6 кВ получает питание от мощной узловой подстанции «Калининская» 220/110/10 кВ, принадлежащей ПАО «ФСК ЕЭС» - МЭС Урала, по двухцепной воздушной линии, «Калининская – УЭТМ1» и «Калининская – УЭТМ2», сталеалюминиевым проводом АС 300/39, от ячеек № 7 и № 8 открытого распределительного устройства (далее по тексту ОРУ) напряжением 110 кВ.

Подстанция «УЭТМ» 110/6 кВ является тупиковой [31], а значит дальнейшего распределения, кроме как на потребителей 6 кВ промышленного предприятия «УЭТМ», не осуществляется.

По категории надежности электроснабжения, электроприемники промышленного предприятия «УЭТМ» относятся к I и II. Преимущественно, на промышленном предприятии преобладают электроприемники II категории надежности электроснабжения. В процентном соотношении, потребителей, относящихся к I категории, 30%, а потребителей, относящихся ко II категории, 70 %.

Основное и единственное предназначение подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ – электроснабжение цехов, корпусов, административных зданий, зданий хозяйственного назначения и прочих возможных объектов на производственной площадке промышленного предприятия «Уралэлектротяжмаш».

Конструктивное исполнение распределительных устройств (далее по тексту РУ) 110 кВ и 6 кВ будет определено далее (п.4) в настоящей бакалаврской работе. В данный момент РУ 110 кВ выполнено по типу ОРУ 110 кВ, а РУ 6 кВ выполнено по типу ЗРУ 6 кВ.

Электрические схемы распределительных устройств 110 кВ и 6 кВ также как и их конструктивное исполнение будет определены далее (п.4) в настоящей бакалаврской работе. В данный момент РУ 110 к выполнено по типовой схеме № 110-4Н «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий» [20], а РУ 6 кВ выполнено по типовой схеме № 6-1 «Две одиночные, секционированные выключателем, системы шин» [20].

Трансформаторы, в настоящий момент осуществляющие электроснабжение промышленного предприятия «УЭТМ», имеют мощность по 25 МВА каждый. Тип трансформаторов ТРДН-25000/110/6/6 кВ.

Обслуживание подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ выполняется ремонтно-эксплуатационным персоналом промышленного предприятия.

Основные расчетные климатические параметры района размещения подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ:

- абсолютный минимум температуры окружающего воздуха – минус 47˚С;

- средний из абсолютных минимумов температуры окружающего воздуха – минус 36 □С;

- абсолютный максимум температуры воздуха - + 38 □С;

- максимальная скорость ветра/расчетная – 29/23 м/с;

- расчетный район по гололеду – 2-й и 3-й;

- среднегодовая продолжительность гроз – 40-60 ч.;

- расчетная снеговая нагрузка – 1,8 кПа (III район);

- сейсмичность по шкале MSK-64 – 6 баллов;

- климатический район в соответствии с ГОСТ 15150-69 – II.

2 Анализ нагрузок предприятия «УЭТМ»

2.1 Краткое описание промышленного предприятия «УЭТМ»

«Уралэлектротяжмаш» - одно из самых масштабных предприятий электротехнической промышленности в РФ. Предприятие основано в 1934 г. (строительство длилось 2 года с 1932 г.)

Возможности промышленного предприятия охватывают широкий круг потребностей лиц, заинтересованных в производимой предприятием продукции. Конкретно говоря, «Уралэлектротяжмаш» располагает возможностями производства продукции с «нуля»: конструкторская разработка, постановка на заводской сборочный поток, монтаж на объектах Заказчиков, гарантийное обслуживание, постгарантийное обслуживание, организация обучения обслуживающего персонала предприятий Заказчиков [30].

Предприятие обладает широким спектром разрабатываемого и изготавливаемого оборудования. Номенклатура, производимой предприятием продукции, включает более 2000 различных наименований оборудования. По данным [30] за всю историю «УЭТМ» изготовлено более 500 тысяч единиц различного электрооборудования (трансформаторы, реакторы, выключатели, разъединители и т.д.).

«Уралэлектротяжмаш» производит поставку своего оборудования по всему земному шару. Организуются поставки в такие страны как: Китай, Австрия, США, Египет, Турция, Иран, Сирия, а также страны СНГ (Казахстан, Беларусь) [30]. Общее количество стран поставки – 60.

Также «Уралэлектротяжмаш» активно развивает партнерские связи внутри страны и ведет сотрудничество с такими предприятиями как ПАО «ФСК ЕЭС», ПАО «Россети», ОАО «РЖД», а также с предприятиями нефтегазовой и металлургической отрасли промышленности [30].

2.2 Характеристика существующего источника электроснабжения промышленного предприятия «Уралэлектротяжмаш»

Источник электроснабжения предприятия – подстанция «УЭТМ» 110/6 кВ, введенная в эксплуатацию в 1968 г. (полное описание представлено в п.1 настоящей бакалаврской работы).

Понизительная подстанция «УЭТМ» 110/6 кВ – основополагающий элемент системы внешнего электроснабжения промышленного предприятия «Уралэлектротяжмаш». Подстанция осуществляет прием, понижение напряжения и выдачу электроэнергии электроприемникам промышленного предприятия «Уралэлектротяжмаш».

На предприятии «Уралэлектротяжмаш» установлена всего одна понизительная подстанция. Плотная застройка производственной площадки, невозможность строительства сетей напряжением 110 кВ (до территории промышленного предприятия, ввиду застроенности промышленной зоны в котором расположено предприятие), экономическая нецелесообразность (дешевле увеличить трансформаторную мощность существующей подстанции) [8] – все это, есть причины отсутствия необходимости строительства дополнительной, второй, понизительной подстанции на территории промышленного предприятия.

К тому же, согласно данным в [7], несколько понизительных подстанций, для одного предприятия, сооружаются при полной нагрузке предприятия порядка 90 МВА и более (энергоемкое производство). В данном случае, согласно п.2.4 настоящей бакалаврской работы данное значение не достигается (52,1 МВА).

Введенное в эксплуатацию в 1968 г. оборудование подстанции, а также все строительные конструкции, инженерные сети и коммуникации функционируют более 50 лет. Подстанция «УЭТМ» 110/6 кВ на данный момент имеет сильный физический износ всего, включая электрооборудование. Также имеет место моральный износ, ввиду производства на данный момент нового технически совершенного оборудования, строительных материалов и изделий.

2.3 Причины роста электрических нагрузок предприятия

Как уже говорилось в п.2.1 настоящей бакалаврской работы, «УЭТМ» выпускает более 2000 различных наименований электрооборудования, основными из них являются трансформаторы, реакторы, выключатели, разъединители, трансформаторы тока и напряжения, КРУ.

В настоящий момент в рамках реализации инвестиционных программ, рассчитанных до 2024 г., различных крупных компаний, таких как ПАО «Россети» и ПАО «ФСК ЕЭС» [1], производятся реконструкции понизительных подстанций всех классов напряжений. В связи с этим возрастают потребности в основном электрооборудовании распределительных устройств.

Согласно данным инвестиционной программы только ПАО «ФСК ЕЭС», на техническое перевооружение и реконструкцию объектов электросетевого хозяйства будет направлено более чем 240 миллиардов рублей [1].

Соответственно «УЭТМ» планирует наращивание объемов производства.

Также «УЭТМ» активно развивается в области внедрения инновационных решений в электроэнергетики. На данный момент развиваются два решения, которые зарегистрированы в реестре инноваций ПАО «Россети» [28]. Данными решениями являются:

1. «Трансформаторы напряжения антирезонансные элегазовые ЗНГ-УЭТМ на напряжение 110 и 220 кВ мощностью до 150 кВА» [28],

2. «Распределительные устройства с элегазовой изоляцией наружной установки серии РУЭН-УЭТМ-110» [28].

Антирезонансные трансформаторы напряжения типа ЗНГ, разработанные «УЭТМ», отличаются пожаро- и взрывобезопасностью, необслуживаемостью и отсутствием явления феррорезонанса. Также данный трансформатор напряжения, помимо функций питаний различных микропроцессорных устройств , можно использовать для питания собственных нужд подстанции, что сокращает затраты на установку отдельного трансформатора собственных нужд [28].

Распределительное устройство с элегазовой изоляцией наружной установки типа РУЭН-УЭТМ, разработанное «УЭТМ», отличается крайне низкими эксплуатационными температурами. Данное РУ рассчитано для эксплуатация в условиях крайнего севера при температуре окружающего воздуха, достигающего минус 60□С. Применение РУЭН-УЭТМ позволяет сократить размеры подстанции, а также в значительной степени снизить число устанавливаемых фундаментов, опорных металлических конструкций и т.п., что в условиях крайнего севера значительно снижает строительные и эксплуатационные расходы, а также облегчит процесс монтажа.

Для реализации программ наращивания производства, а также реализации научно-инновационной деятельности «УЭТМ» необходимо обеспечить предприятие электропитанием соответствующей мощности и качества, что, согласно п.2.2 настоящей бакалаврской работы, невозможно осуществить на данный момент, ввиду сильного морального и физического износа подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ.

В соответствии с вышесказанным, требуется новое проектирование подстанции «УЭТМ» с разработкой всех необходимых разделов проектной документации. Настоящей бакалаврской работой рассмотрена электрическая часть нового проектирования.

Переустройство подстанции «УЭТМ» будет проходить поэтапно и в короткие сроки для сохранения в работе производства.

2.4 Перечень цехов и ожидаемая суммарная нагрузка предприятия «УЭТМ»

Перечень цехов промышленного предприятия (включая административные и административно-хозяйственные здания) представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Перечень цехов

№ п/п	Наименование цеха
1	Механический
2	Сварочный
3	Сборочный
4	Инструментальный
5	Прессовый
6	Термический
7	Кислородная станция
8	Склад готовой продукции
9	Ремонтно-механический
10	Токарный
11	Медпункт
12	Заводоуправление
13	Столовая
14	Испытательный центр

Ожидаемая нагрузка предприятия $S_{ожид}$ составляет 52,1 МВА.

2.5 Максимальная продолжительность годовой нагрузки и коэффициент заполнения графика нагрузки

Как уже было обозначено в п.2.4 настоящей бакалаврской работы, ожидаемая нагрузка предприятия составит 52,1 МВА.

В случае если не менять трансформаторы на подстанции (2х25 МВА на данный момент), перегруженность подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ составит 52,1/50 = 104,2 %, что недопустимо.

Ожидаемое потребление электрической энергии, предприятием «УЭТМ» составит 261583,68 МВт·ч ($W_{ПС}$ = 261583,68 МВт·ч).

Число часов, на протяжении которых наблюдается максимальная продолжительность годового графика нагрузки, можно найти при помощи использования следующей формулы [9]:

$$T_м = \frac{W_{ПС}}{S_{ожид}}, \tag{2.1}$$

$$T_м = \frac{261583{,}68}{52{,}1} = 5020{,}8\,ч.$$

Коэффициент, отражающий величину заполнения годового графика нагрузки, можно найти при помощи использования следующей формулы [9]:

$$K_{зап} = \frac{T_м}{8760}, \tag{2.2}$$

где 8760 – число часов в году.

$$K_{зап} = \frac{5020{,}8}{8760} = 0{,}572.$$

3 Выбор и расчет, требуемого к установке силового трансформатора на подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

3.1 Тип, устанавливаемых на подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ, силовых трансформаторов

В соответствии с нормами технологического проектирования на электроснабжение промышленного предприятия [17] для установки на открытом распределительном устройстве обязательны к применению силовые трансформаторы с масляной изоляцией.

Исходя из экономических (меньшие затраты), территориальных (мало свободной площади) и логических соображений (максимально равномерное распределение нагрузки), а также ввиду выполнения существующего захода на подстанцию «УЭТМ» 110/6 кВ двухцепной воздушной линией типа АС 300/39, каждая из цепей состоит из 3-х проводов с фазами А, В, С, для установки принимаются трехфазные трансформаторы.

Значительная мощность потребителей подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ и число отходящих линий (44 присоединения) обуславливает применение расщепленной обмотки со стороны низкого напряжения, для ограничения токов короткого замыкания.

Для поддержания стабильного уровня напряжения, силовые трансформаторы имеют устройство регулирования напряжения под нагрузкой (далее по тексту РПН) на стороне высокого напряжения с использованием системы регулирования напряжения и автоматическим регулятором.

Таким образом, на основании вышесказанного, к установке принимаются трансформаторы типа ТРДН.

3.2 Число, устанавливаемых на подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ, силовых трансформаторов

Согласно п.1 настоящей бакалаврской работы, потребители промышленного предприятия «УЭТМ» делятся на потребителей I и II

категории надежности электроснабжения. Согласно [7, 17] для электроснабжения указанных потребителей используется не меньше, чем 2 трансформатора (при отсутствии резервирования со стороны низкого напряжения). Три и большее число трансформаторов выбирают при наличии условий, обозначенных в [7], которые в настоящей работе отсутствуют.

Таким образом, к установке принимаются 2 трансформатора.

3.3 Мощность, устанавливаемых на подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ, силовых трансформаторов

Выбор мощности силовых трансформаторов производится исходя из условия обеспечения работоспособности оставшегося в работе силового трансформатора, при выходе из строя одного из них, с учетом обеспечения его допустимой перегрузки, которая позволит продолжить работу производства [17, 15].

Выполнение данного условия подтверждается расчетами. Формула для расчета мощности трансформатора для двухтрансформаторной подстанции [9] представлена далее:

$$S_{ном.Т} \geq \frac{S_{ожид}}{К_{пер}}, \qquad (3.1)$$

где $S_{ожид}$ – 52,1 МВА, согласно п.2.4 настоящей бакалаврской работы,

$К_{пер}$ - 1,4 коэффициент допустимой перегрузки, определяемый по [6].

$$S_{ном.Т} \geq \frac{52{,}1}{1{,}4} = 37{,}21 МВА.$$

Исходя из полученного по формуле (3.1) значения, согласно указаниям [9] выбирается два ближайших (больших), по шкале стандартных мощностей,

трансформатора и проводится их технико-экономическое сравнения для выбора наиболее подходящего варианта. Технико-экономическое сравнение представлено далее в п.3.4. настоящей бакалаврской работы.

3.4 Технико-экономическое сравнение, предполагаемых к установке на подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ, силовых трансформаторов

К технико-экономическому сравнению выбираем трансформаторы типа ТРДН-40000/110/6/6 кВ и ТРДН-63000/110/6/6 кВ. Номинальные параметры трансформаторов принимаем согласно номенклатурному каталогу предприятия ООО «Тольяттинский Трансформатор» [23]. Параметры трансформаторов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры трансформаторов типа ТРДН 40 МВА и 63 МВА

Мощность., МВА	Напряжения обмоток, кВ			Потери х.х. и к.з., кВт		Напряжение к.з. $U_к$, %	$I_{х.х.}$,%
	ВН	НН1	НН2	$P_{х.х}$	$P_{к.з.}$	ВН-НН1(2)	
40	115	6,3	6,3	22	170	10,5	0,28
63	115	6,3	6,3	35	245	10,5	0,25

Дальнейшее технико-экономическое сравнение силовых трансформаторов производится по методике, обозначенной в [9].

3.4.1 ТРДН-40000/110/6/6 кВ

«Приведенные потери мощности определяются из формулы:

$$P'_{Т} = P'_{х.х} + к^2_{з.в} \cdot P'_{к.в} + к^2_{з.н1} \cdot P'_{к.н1} + к^2_{з.2} \cdot P'_{к.н2}, \quad (3.2)$$

где $P'_{х.х}$ - приведенные потери активной мощности трансформатора в режиме холостого хода,

$к_{з.в.}, к_{з.н1}, к_{з.н2}$ - коэффициенты загрузки обмоток трансформатора высшего и низшего напряжений,

$P'_{к.в}, P'_{к.н1}, P'_{к.н2}$ - приведенные потери активной мощности короткого замыкания соответствующих обмоток» [9].

«Приведенные потери мощности в режиме холостого хода определяются из формулы:

$$P'_{х.х} = P_{х.х} + к_{un} \cdot Q_{х.х}, \qquad (3.3)$$

где $к_{un} = 0{,}05\,кВт/квар$ - коэффициент изменения потерь, определяемый из [9],

$Q_{х.х} = \frac{I_{х.х.}}{100} \cdot S_{ном.Т} = 112\,квар$ - потери реактивной мощности трансформатора в режиме холостого хода» [9].

$$P'_{х.х} = 22 + 0{,}05 \cdot 112 = 27{,}6\,кВт.$$

«Коэффициент загрузки обмоток трансформатора определяется из формулы:

$$к_{з.в.(н1,н2)} = \frac{S_{В(н1,н2)}}{S_{ном.Т}}, \qquad (3.4)$$

где $S_{В(н1,н2)}$ - расчетные нагрузки обмоток трансформатора высшего и низшего напряжений» [9].

$$к_{з.в.} = \frac{52100}{40000} = 1{,}3025,$$

$$к_{з.н1(н2)} = \frac{26050}{40000} = 0{,}65125.$$

«Приведенные потери мощности в режиме короткого замыкания определяются из формулы:

$$P'_{к.в.(н1,н2)} = P_{к.з.в.(н1,н2)} + к_{un} \cdot Q_{к.в.(н1,н2)}, \qquad (3.5)$$

где $P_{к.з.в.} = 0\,кВт$, $P_{к.з.н1(н2)} = 2 \cdot P_{к.з.} = 2 \cdot 170 = 340\,кВт$ - потери активной мощности в режиме короткого замыкания соответствующих обмоток при их 100 % загрузке,

$Q_{к.в.} = \frac{0{,}125 \cdot U_к}{100} \cdot S_{ном.Т} = 525\,квар$, $Q_{к.н1(н2)} = \frac{1{,}75 \cdot U_к}{100} \cdot S_{ном.Т} = 7350\,квар$ - потери реактивной мощности в режиме короткого замыкания соответствующих обмоток» [9].

$$P'_{к.в.} = 0 + 0{,}05 \cdot 525 = 26{,}25\,кВт,$$

$$P'_{к.н1(н2)} = 340 + 0{,}05 \cdot 7350 = 707{,}5\,кВт.$$

После нахождения всех составляющих, произведем расчет по формуле (3.2):

$$P'_Т = 27{,}6 + 1{,}3025^2 \cdot 26{,}25 + 0{,}65125^2 \cdot 707{,}5 + 0{,}65125^2 \cdot 707{,}5 = 672{,}27\,кВт.$$

«Потери электроэнергии определяются из следующего выражения:

$$\Delta W_{п.с} = \sum n_i \cdot P'_{х.х} \cdot T_i + \sum_{i=1}^{k} (\frac{1}{n} \cdot P'_{к.в} \cdot к^2_{з.в.i} \cdot T_i + \frac{1}{n} \cdot P'_{к.н1} \cdot к^2_{з.н1.i} \cdot T_i + \\ + \frac{1}{n_т} \cdot P'_{к.н2} \cdot К^2_{з.н2.i} \cdot T_i), \quad (3.6)$$

где i – ступень годового графика нагрузки,

n = 2 – число трансформаторов, одновременно работающих на соответствующей ступени годового графика нагрузки,

T_i – продолжительность соответствующей ступени годового графика нагрузки» [9].

Расчет потерь электроэнергии для соответствующих ступеней годового графика нагрузки и для трансформатора в целом представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Расчёт потерь электроэнергии

i	$S_В$	$S_{н1}$	$S_{н2}$	n_i	T_i	$\Delta W_{х.х}$	$К_{з.в.}$	$К_{з.н1}$	$К_{з.н2}$	$\Delta W_{к.зв}$	$\Delta W_{к.зн1}$	$\Delta W_{к.зн2}$
1	52100	26050	26050	2	500	27600	1,70	0,42	0,42	11133	75017	75017
2	48465	24233	24233	2	120	6624	1,47	0,37	0,37	2312	15580	15580
3	42685	21342	21342	2	680	37536	1,14	0,28	0,28	10163	68481	68481
4	41189	20595	20595	2	700	38640	1,06	0,27	0,27	9742	65641	65641
5	39491	19745	19745	2	830	45816	0,97	0,24	0,24	10618	71545	71545
6	34843	17421	17421	2	1160	64032	0,76	0,19	0,19	11552	77839	77839
7	31488	15744	15744	2	1150	63480	0,62	0,15	0,15	9353	63024	63024
8	26476	13238	13238	1	980	27048	0,44	0,11	0,11	11270	75940	75940
9	22959	11480	11480	1	180	4968	0,33	0,08	0,08	1557	10489	10489
10	20655	10328	10328	1	1230	33948	0,27	0,07	0,07	8610	58012	58012
11	18190	9095	9095	1	270	7452	0,21	0,05	0,05	1466	9876	9876

Продолжение таблицы 3.2

12	14309	7155	7155	1	960	26496	0,13	0,03	0,03	3225	21729	21729
Итого по трансформатору:						383640				91001	613175	613175
					1700991							

«Стоимость годовых потерь электроэнергии в трансформаторах рассчитывается по следующему выражению:

$$И_Э = \Delta W_{п.с} \cdot C_Э, \qquad (3.7)$$

где $C_Э$ - стоимость 1 кВт·ч электроэнергии» [9].

«Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии $C_Э$ рассчитывается из выражения:

$$C_Э = \frac{\alpha}{T_м} + \beta, \qquad (3.8)$$

где α = 4,37 – основная ставка двухставочного тарифа за 1 кВт договорной мощности,

β = 2,06 – дополнительная ставка двухставочного тарифа за 1 кВт договорной мощности» [9, 29].

$$И_Э = 1700991 \cdot (\frac{4,37}{5020,8} + 2,06) = 3505521,96 \text{ руб.}$$

«Приведенные затраты на трансформатор определяются из формулы:

$$З_{пр} = E_Н \cdot К + И = E_Н \cdot К + И_о + И_Э, \qquad (3.9)$$

где $E_Н$ = 0,15 – нормативный коэффициент дисконтирования,

К – стоимость силового трансформатора (25 000 000 руб.),

$И_Э$ – стоимость годовых потерь электроэнергии,

$И_о$ = 2350000 руб – годовые отчисления на силовой трансформатор» [9].

$$З_{пр} = 0{,}15 \cdot 25000000 + 2350000 + 3505521{,}96 = 9605521{,}96 \text{ руб.}$$

3.4.2 ТРДН-63000/110/6/6 кВ

Расчет для ТРДН-63000/110/6/6 кВ аналогичен и производится по формулам (3.2-3.5):

$$P'_{х.х} = 35 + 0{,}05 \cdot 157{,}5 = 42{,}875 \text{ кВт},$$

$$к_{з.в.} = \frac{52100}{63000} = 0{,}826,$$

$$к_{з.н1(н2)} = \frac{26050}{63000} = 0{,}4134,$$

$$P'_{к.в} = 0 + 0{,}05 \cdot 826{,}875 = 41{,}34 \text{ кВт},$$

$$P'_{к.н1(н2)} = 490 + 0{,}05 \cdot 11576{,}25 = 1068{,}81 \text{ кВт},$$

$$P'_{Т} = 42{,}875 + 0{,}826^2 \cdot 41{,}34 + 0{,}4134^2 \cdot 1068{,}81 + 0{,}4134^2 \cdot 1068{,}81 = 436{,}39 \text{ кВт}.$$

В таблице 3.3 представлен расчет потерь электроэнергии ТРДН-63000/110/6/6 кВ.

Таблица 3.3 – Расчёт потерь электроэнергии

i	$S_В$	$S_{н1}$	$S_{н2}$	n_i	T_i	$\Delta W_{х.х}$	$К_{з.в.}$	$К_{з.н1}$	$К_{з.н2}$	$\Delta W_{к.зв}$	$\Delta W_{к.зн1}$	$\Delta W_{к.зн2}$
1	52100	26050	26050	2	500	42875	0,68	0,17	0,17	7068	45685	45685

Продолжение таблицы 3.3

2	48465	24233	24233	2	120	10290	0,59	0,15	0,15	1468	9488	9488
3	42685	21342	21342	2	680	58310	0,46	0,11	0,11	6452	41705	41705
4	41189	20595	20595	2	700	60025	0,43	0,11	0,11	6185	39975	39975
5	39491	19745	19745	2	830	71172,5	0,39	0,10	0,10	6741	43571	43571
6	34843	17421	17421	2	1160	99470	0,31	0,08	0,08	7334	47404	47404
7	31488	15744	15744	2	1150	98612,5	0,25	0,06	0,06	5938	38381	38381
8	26476	13238	13238	1	980	42017,5	0,18	0,04	0,04	7155	46247	46247
9	22959	11480	11480	1	180	7717,5	0,13	0,03	0,03	988	6388	6388
10	20655	10328	10328	1	1230	52736,25	0,11	0,03	0,03	5466	35329	35329
11	18190	9095	9095	1	270	11576,25	0,08	0,02	0,02	930	6014	6014
12	14309	7155	7155	1	960	41160	0,05	0,01	0,01	2047	13233	13233
Итого по трансформатору:						595962,5				57773	373420	373420
					1400575							

Произведем расчет по формулам (3.7-3.9):

$$И_Э = 1400575 \cdot (\frac{4,37}{5020,8} + 2,06) = 2886403,53 \text{ руб},$$

$$З_{пр} = 0,15 \cdot 40000000 + 3760000 + 2886403,53 = 12646403,53 \text{ руб}.$$

Методическими указаниями предусмотрен выбор варианта, обладающего наименьшими приведенными затратами. В данном случае по расчетам, трансформатор ТРДН-40000/110/6/6 кВ предполагает наименьшие приведенные затраты 9605521,96 руб., против 12646403,53 руб. у ТРДН-63000/110/6/6 кВ. К установке на подстанции принимаем трансформатор ТРДН-40000/110/6/6 кВ.

4 Аналитический выбор главной электрической схемы подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

Понизительная подстанция «УЭТМ» имеет на территории предприятия, свою четкую границу. Перемещения, изменения границ подстанции, не предусматривается.

Существующие распределительные устройства подстанции «УЭТМ» будут полностью перестроены (полный демонтаж ОРУ, ЗРУ и находящихся на них оборудования, зданий и сооружений, а затем новое строительство). Для исключения нарушения электроснабжения промышленного предприятия, работы будут вестись поэтапно, что позволит обеспечит бесперебойное функционирование предприятия.

4.1 Уровни напряжений распределительных устройств

Уровни напряжений распределительных устройств понизительной подстанции следует выбирать исходя из наличия конкретных источников питания, расстояния до них, а также учитывая существующие уровни напряжений (для нового строительства не подходит, для нового проектирования – справедливо) [7, 10].

Согласно [17], определяющим фактором, при выборе напряжения распределительного устройства высокого напряжения, является характеристика источника питания и его удаленность от объекта проектирования (наилучший вариант – максимальная приближенность).

Как уже отмечалось в п.1 настоящей бакалаврской работы, источником питания для подстанции «УЭТМ» является подстанция «Калининская» 220/110/10 кВ. От подстанции «Калининская» до подстанции «УЭТМ» проложена двухцепная воздушная линия напряжением 110 кВ, выполненная проводом типа АС 300/39. Длина участка воздушной линии – 1,4 км.

Бесперебойность электроснабжения соблюдается, т.к. распределительное устройство 110 кВ подстанции «Калининская», которая является источником

питания для подстанции «УЭТМ», выполнено по схеме 110-13Н. Данная схема отличается высокой надежностью питания каждой воздушной линии, присоединенной к ней [20].

Ввиду вышеобозначенных факторов, уровень напряжения распределительного устройства высокого напряжения подстанции «УЭТМ» не изменяется и остается равным 110 кВ.

Для распределительного устройства низкого напряжения, согласно [17], определяющим фактором, при выборе конкретного значения уровня напряжения, является потребитель электроэнергии. Другими словами, уровень напряжения распределительного устройства низкого напряжения предприятия зависит от номинальных параметров электроприемников, функционирующих в цехах.

На промышленном предприятии «УЭТМ» подавляющее большинство электроприемников выполнено на номинальное напряжение 6 кВ. Соответственно данный уровень напряжения сохраняется для распределительного устройства низкого напряжения подстанции «УЭТМ».

Необходимая надежность электроснабжения достигается секционированием.

Общая надежность, в том числе достигается минимальным числом ступеней трансформации до объекта.

4.2 Конструктивное исполнение распределительных устройств

Ввиду того, что предприятие «УЭТМ» не относится к химической промышленности и ввиду слабой загрязненности атмосферы (как указано в п.1 настоящей бакалаврской работы – II в соответствии с ГОСТ 15150-69) применение РУ 110 кВ в элегазовом исполнении (комплектное распределительное устройство 110 кВ с элегазовой изоляцией) – нецелесообразно и экономически не обосновано.

Распределительное устройство 110 кВ подстанции «УЭТМ» будет выполнено в виде открытого распределительного устройства.

Применяемое оборудование 110 кВ устанавливается на отдельностоящие и блочные металлоконструкции с использованием фундаментов из металлических винтовых свай.

Для уменьшения габаритов применена жесткая ошиновка в ремонтной перемычке. Перемычки между оборудованием и спуски к нему выполнены неизолированным сталеалюминиевым проводом.

Для проезда предусмотрена автодорога шириной 4,5 м.

Распределительное устройство 6 кВ будет выполнено в виде блочно-модульного здания ЗРУ 6 кВ, совмещенного с ОПУ. В здании ЗРУ 6 кВ также будет размещен главный щит управления, комната связи, помещения для персонала.

Здание ЗРУ 6 кВ, совмещенное с ОПУ устанавливается на фундаменты из металлических винтовых свай.

Размещение зданий, сооружений и автодорог предусматривает:

- использование индустриальных методов производства строительных и монтажных работ;

- ревизию, ремонты трансформаторов с применением машин, механизмов и передвижных лабораторий;

- проезд (подъезд) пожарных машин;

- доставку тяжеловесного оборудования с помощью автотранспортных средств;

- взаимное расположение зданий и сооружений ПС обеспечивает минимальное количество и длину высоковольтных кабелей, минимальную протяженность внутриплощадочных дорог.

Ячейки ввода РУ 6 кВ применяются с воздушными выводами, ячейки отходящих линий – кабельными.

Прокладка силовых и контрольных кабелей на территории подстанции организована в наземных ж/б лотках. По металлоконструкциям к оборудованию разводка выполняется с использованием металлических лотков и гофрированной трубы.

В помещениях ОПУ прокладка кабелей предусмотрена в кабельных каналах в фальшполе и в пластиковых каналах по стенам. В помещении РУ 6 кВ прокладка кабелей предусмотрена в подвесных металлических кабельных лотках.

Пути прокладки кабельных трасс выбраны с учетом требований электромагнитной совместимости с максимальным удалением от источников импульсных помех.

4.3 Схемы распределительных устройств

«В соответствии с СТО 56947007-29.240.30.010-2008 электрические схемы подстанций должны:

- обеспечивать требуемую надежность работы РУ исходя из условий электроснабжения потребителей в соответствии с категориями электроприемников;

- учитывать требование секционирования сети и обеспечить работу РУ при расчетных значениях токов короткого замыкания;

- обеспечивать возможность и безопасность проведения ремонтных и эксплуатационных работ на отдельных элементах схемы;

- обеспечивать требования наглядности, удобства эксплуатации, компактности и экономичности» [20].

Схема электроснабжения промышленного предприятия должна быть выбрана таким образом, чтобы обеспечивать необходимый уровень надежности и резервирования при использовании минимального числа оборудования и проводников [32].

Также схема должна предусматривать, раздельную работу трансформаторов и секций шин. Параллельная работа допускается только при отдельном обосновании.

Согласно указаниям в [17, 34], электрическую схему подстанции следует выбирать начиная с простейших вариантов с использованием разработанных типовых решений.

С учетом вышесказанного, а также учитывая рекомендации по выбору схем ПАО «ФСК ЕЭС» [20] принимаем на подстанции «УЭТМ» типовую схему 110 кВ № 110-4Н «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий» [20, 19].

Схема 110-4Н типичная для тупиковых подстанций, подключенных к двухцепной воздушной линии. Основные преимущества схемы выражаются в следующем:

- минимально отчуждаемая земельная площадь, что в условиях промышленного предприятия является значимым преимуществом;

- дешевизна схемы (в виду минимального количества соединяющих проводников и оборудования).

Также выбранная схема 110 кВ обеспечивает требуемую надежность благодаря наличию перемычки, при помощи которой в случае аварии будет произведен ввод резерва.

Простота и наглядность схем позволяет минимизировать отказы по вине обслуживающего персонала.

Согласно данным [19], схема № 110-4Н является лучшей при рассмотрении с позиций экономичности и надежности.

Схема РУ 6 кВ согласно рекомендациям [17, 20], а также с учетом выбранного типа трансформатора (ТРДН) необходимо выполнить двумя одиночными, секционированными выключателями системами шин.

Соответственно принимаем на подстанции «УЭТМ» типовую схему 6 кВ № 6-2 «две, секционированные выключателями, системы шин» [20].

Схема проста, наглядна и применяется при значительном числе отходящих присоединений от РУ 6 кВ. Использование данной схемы в сочетании с трансформатором с расщепленной обмоткой низкого напряжения позволяет ограничить токи короткого замыкания.

5 Расчет токов короткого замыкания подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

Согласно данным, предоставленным ПАО «ФСК ЕЭС» - МЭС Урала, максимальный ток трехфазного короткого замыкания на шинах подстанции «УЭТМ» $I^{(3)}_{К110}$ = 19550 А.

Соответственно расчет токов короткого замыканиях необходимо выполнить только на шинах 6 кВ трансформатора ТРДН-40000/110/6/6 кВ подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ.

Расчет выполняется в соответствии с методикой представленной в ГОСТ Р 52735-2007 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ» [4].

Исходными данными для расчета являются:

- максимальный ток трехфазного короткого замыкания на шинах 110 кВ $I^{(3)}_{К110}$ = 19550 А;

- напряжение источника эквивалентного энергосистеме E_C = 115 кВ;

- параметры силового трансформатора ТРДН-40000/110/6/6 кВ, представленные в таблице 3.1 настоящей бакалаврской работы.

Расчет токов короткого замыкания за трансформатором будет произведен в системе относительных единиц.

Принимаем следующую мощность за базисную – $S_б$ = 100 МВА.

Принимаем следующие напряжения на выводах обмоток трансформатора за базисные – $U_{б1}$ = 115 кВ и $U_{б2}$ = 6,3 кВ.

Расчет базисных токов для соответствующих ступеней базисных напряжений производится по следующей формуле:

$$I_{бi} = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_{бi}}, \qquad (5.1)$$

$$I_{б1} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0{,}502\,кА,$$

$$I_{б2} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6{,}3} = 9{,}164\,кА.$$

Для произведения дальнейших расчетов необходимо составить схему замещения. На рисунке 5.1 представлена схема замещения.

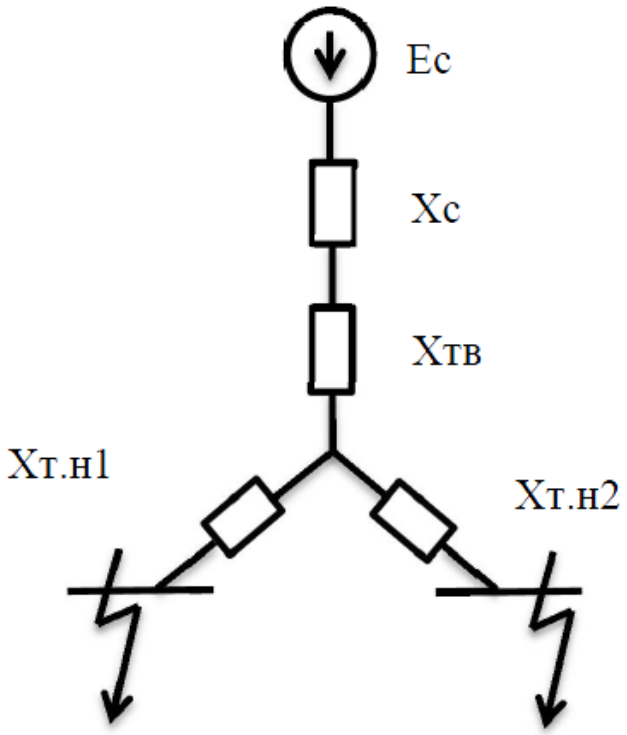

Рисунок 5.1 – Схема замещения

Для произведения дальнейших расчетов необходимо перевести параметры элементов схемы замещения в систему относительных единиц.

Напряжение источника эквивалентного энергосистеме в относительные единицы можно перевести по следующей формуле:

$$E_{*С(б)} = \frac{E_С}{U_{б1}}, \qquad (5.2)$$

$$E_{*C(б)} = \frac{115}{115} = 1.$$

Сопротивление источника эквивалентного энергосистеме в относительные единицы можно перевести по следующей формуле:

$$X_{*C(б)} = \frac{E_C \cdot S_б}{\sqrt{3} \cdot I^{(3)}_{K110} \cdot U^2_{б1}}, \qquad (5.3)$$

$$X_{*C(б)} = \frac{115 \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot 19{,}55 \cdot 115^2} = 0{,}025.$$

Сопротивление ветвей трансформатора в относительные единицы можно перевести по следующим формулам:

$$X_{*TB(б)} = \frac{(U_к - 0{,}25 \cdot U_{кн1н2}) \cdot U^2_{ВН} \cdot S_б}{S_{ном.T} \cdot U^2_{б1}}, \qquad (5.4)$$

$$X_{*TH1(б)} = X_{*TH2(б)} = 0{,}5 \cdot U_{кн1н2} \cdot \frac{U^2_{ВН} \cdot S_б}{S_{ном.T} \cdot U^2_{б1}}, \qquad (5.5)$$

где $U_{кн1н2}$ = 30 % - напряжение короткого замыкания между расщепленными обмотками низкого напряжения трансформатора ТРДН-40000/110/6/6 кВ.

$$X_{*TB(б)} = \frac{(10{,}5 - 0{,}25 \cdot 30) \cdot 115^2 \cdot 100}{40 \cdot 115^2} = 0{,}075,$$

$$X_{*TH1(б)} = X_{*TH2(б)} = 0{,}5 \cdot 30 \cdot \frac{115^2 \cdot 100}{40 \cdot 115^2} = 0{,}375.$$

Периодическая составляющая тока короткого замыкания в начальный момент времени в относительных единицах в точках К1 и К2 рассчитывается по следующей формуле:

$$I^{(3)}_{*К1(б),К2(б)} = \frac{E_{*С(б)}}{X_{*С(б)} + X_{*ТВ(б)} + X_{*ТН1(б),ТН2(б)}}, \quad (5.6)$$

$$I^{(3)}_{*К1(б)} = I^{(3)}_{*К2(б)} = \frac{1}{0{,}025 + 0{,}075 + 0{,}375} = 2{,}1\,кА.$$

Периодическая составляющая тока короткого замыкания в точках К1 и К2 переводится в именованные единицы по следующей формуле:

$$I^{(3)}_{К1} = I^{(3)}_{К2} = I^{(3)}_{*К1(б),К2(б)} \cdot I_{б2}, \quad (5.7)$$

$$I^{(3)}_{К1} = I^{(3)}_{К2} = 2{,}1 \cdot 9{,}164 = 19{,}24\,кА.$$

Результаты расчетов представлены в сводной таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты расчетов токов короткого замыкания

Расчетная точка короткого замыкания	$I^{(3)}_{К1}$
	ТРДН-40000/110/6/6 кВ
Шины 110 кВ подстанции «УЭТМ»	19550 А
Шины 6 кВ подстанции «УЭТМ»	19240 А

6 Выбор и расчет необходимого электрооборудования 110 кВ и 6 кВ подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

Для проверки параметров оборудования на соответствие нормируемым значениям, основными критериями, по которым будет вестись проверка, это: величины максимальных рабочих токов и токов короткого замыкания.

Необходимые для проверки формулы взяты из методических указаний [9]. Исходные данные для проверки основного оборудования представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Исходные данные для проверки основного оборудования

Наименование параметра	Уровень напряжения	Значение параметра
Максимальный рабочий ток на шина РУ, $I_{макс.раб}$	110 кВ	622 А*
	6 кВ	$I_{макс.раб} = \frac{40000 \cdot 1{,}4}{\sqrt{3} \cdot 6{,}3 \cdot 2} = 2566\,А$
Периодическая составляющая тока короткого замыкания в начальный момент времени на шинах РУ, $I_{п0}$	110 кВ	19,55 кА
	6 кВ	19,24 кА
Апериодическая составляющая тока короткого замыкания в произвольный момент времени на шинах РУ, $i_{a\tau}$	110 кВ	$i_{a\,t} = \sqrt{2} \cdot I_{п0} \cdot e^{-\tau/T_a}$ **
	6 кВ	
Ударный ток короткого замыкания на шинах РУ, $i_{уд}$	110 кВ	$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{п0} \cdot (1 + e^{-\tau/T_a})$ **
	6 кВ	

*по данным предоставленным ПАО «ФСК ЕЭС» - МЭС Урала,

** $\tau = t_{рз} + t_{св}(t_{ов})$; – $t_{рз}$ минимальное время действия релейной защиты; $t_{св}/t_{ов}$ – собственное время отключения/полное время отключения оборудования; T_a –

постоянная времени затухания апериодической составляющей в токе короткого замыкания. Данные параметры определяются из методических указаний и каталогов на оборудование.

6.1 Выбор выключателей 110 кВ подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

В качестве выключателя 110 кВ на подстанции «УЭТМ» выбираем элегазовый баковый выключатель ВЭБ-УЭТМ-110 производства «УЭТМ».

Выключатель выпускается ВЭБ-УЭТМ-110 с 2001 г. и успел зарекомендовать себя как надежное оборудование, отвечающее всем необходимым для эксплуатации требованиям. Выключатель оснащен пружинным приводом и имеет встроенные во ввода трансформаторы тока. Встроенные во ввода трансформаторы тока оказали значительное влияние на выбор данного выключателя в силу экономических и территориальных соображений.

«Основные преимущества выключателя ВЭБ-УЭТМ-110:

- большая заводская готовность, позволяющая значительно сократить сроки монтажа, а значит и сроки ввода подстанции;

- надежность, используемой в качестве изоляционной среды газа SF6 (шестифтористая сера), она взрывобезопасна и не поддерживает горение;

- экологичность, используемый в качестве изоляционной среды газ SF6 (шестифтористая сера) является экологически чистым газом, не наносящим вред окружающей среде (уровень утечек не более 0,5 % подтвержден испытаниями);

- наличие встроенных трансформаторов тока с высокими классами точности, благодаря использованию сердечников из нанокристаллического магнитомягкого сплава;

- незначительные габаритные размеры выключателя и масса;

- высокий механический и коммутационный ресурс (не менее 40 лет эксплуатации при нормальных условиях эксплуатации) с минимальным техническим обслуживанием» [21, 11].

Проверка выключателя ВЭБ-УЭТМ-110 по параметрам [9, 21] представлена в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Проверка выключателя ВЭБ-УЭТМ-110

Сравнительная характеристика	Минимально допустимое значение	Значение характеристики оборудования
Номинальное напряжение	$U_{ном.сети}$ = 110 кВ	$U_{ном}$ = 110 кВ
Длительный рабочий ток	$I_{макс.раб}$ = 622 А	$I_{ном}$ = 2500 А
Электродинамическая стойкость при токах короткого замыкания:		
- действующее значение	$I_{п0}$ = 19,55 кА	$I_{скв}$ = 40 кА
- амплитудное значение	$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 19{,}55 \cdot (1 + e^{-0{,}01/0{,}02}) = 44{,}41$ кА	$i_{дин}$ = 102 кА
Отключающая способность:		
- периодическая составляющая	$I_{пτ} = I_{п0}$ = 19,55 кА	$I_{откл}$ = 40 кА
- апериодическая составляющая	$i_{aτ} = \sqrt{2} \cdot 19{,}55 \cdot e^{-0{,}045/0{,}02}) = 2{,}91$ кА где $\tau = t_{рз} + t_{св}$ = 0,01+0,035 = 0,045 с [9, 21], $T_а$ = 0,02 [9]	$i_{дин} = \sqrt{2} \cdot I_{откл} \cdot \beta_н / 100 = \sqrt{2} \cdot 40 \cdot 40/100 = 22{,}62$ кА где $\beta_н$ = 40 % [21]
Термическая стойкость	При $t_{откл} \geq 3 \cdot T_а$ = 0,06 с $B_к = I_{п0}^2 \cdot (t_{откл} + T_а)$ = 19,55²·(0,155+0,02) = = 66,88 кА2·с где $t_{откл} = t_{рз} + t_{ов}$ = 0,1+0,055 = 0,155 с [9, 21], $T_а$ = 0,02 [9]	При $t_{откл} < t_{терм.н}$ = 3 с $B_{терм.доп} = I_{тер}^2 \cdot t_{откл}$ = = 40²·0,155 = 248 кА2·с

Характеристики выключателя ВЭБ-УЭТМ-110 удовлетворяют условиям выбора и проверки.

6.2 Выбор разъединителей 110 кВ подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

В качестве разъединителей на подстанции «УЭТМ» выбираем трехполюсные разъединители наружной установки с одним и двумя заземляющими ножами РПД-УЭТМ-110 производства «УЭТМ».

«Основные преимущества разъединителя РПД-УЭТМ-110:

- наличие высокопрочных стержневых фарфоровых изоляционных поворотных колонок;

- токопроводящие части выполнены сварным алюминием с минимальным количеством контактных соединений, что обеспечивает стабильное переходное электрическое сопротивление;

- требуется минимальное техническое обслуживание (не менее 40 лет эксплуатации при нормальных условиях эксплуатации);

- поставка в максимальной заводской готовности» [25].

Проверка разъединителя РПД-УЭТМ-110 по параметрам [9, 25] представлена в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Проверка разъединителя РПД-УЭТМ-110

Сравнительная характеристика	Минимально допустимое значение	Значение характеристики оборудования
Номинальное напряжение	$U_{ном.сети}$ = 110 кВ	$U_{ном}$ = 110 кВ
Длительный рабочий ток	$I_{макс.раб}$ = 622 А	$I_{ном}$ = 2500 А

Продолжение таблицы 6.3

Электродинамическая стойкость при токах короткого замыкания:		
- действующее значение	$I_{п0}$ = 19,55 кА	$I_{скв}$ = 40 кА
- амплитудное значение	$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 19{,}55 \cdot (1 + e^{-0{,}01/0{,}02}) = 44{,}41$ кА	$i_{дин}$ = 102 кА
Термическая стойкость	При $t_{откл} \geq 3 \cdot T_а$ = 0,06 с $B_к = I_{п0}^2 \cdot (t_{откл} + T_а) =$ $19{,}55^2 \cdot (0{,}155+0{,}02) =$ $= 66{,}88$ кА2·с где $t_{откл} = t_{рз} + t_{ов}$ = 0,1+0,055 = 0,155 с [9, 25], $T_а$ = 0,02 [9]	При $t_{откл} < t_{терм.н}$ = 3 с $B_{терм.доп} = I_{тер}^2 \cdot t_{откл} =$ $= 40^2 \cdot 0{,}155 = 248$ кА2·с

Характеристики разъединителя РПД-УЭТМ-110 удовлетворяют условиям выбора и проверки.

6.3 Проверка трансформаторов тока 110 кВ подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

На подстанции «УЭТМ» трансформаторы тока 110 кВ встроены во ввода выключателей 110 кВ ВЭБ-УЭТМ-110 и во ввода силовых трансформаторов ТРДН-40000/110/6/6 кВ.

В качестве трансформаторов тока на подстанции «УЭТМ» выбираем трансформаторы тока встроенные ТВТ-110.

Трансформаторы тока проверяются по допустимой нагрузке вторичных цепей. Ко вторичным цепям подключается следующее основное оборудование: счетчики электроэнергии, измерительные преобразователи, амперметры, комплекты различных защит. Нагрузки трансформаторов тока симметричны, расчет производится для одной фазы.

Вторичные обмотки трансформаторов тока соединены по схеме «полная звезда». В расчетах вводится коэффициент $к_{сх}$, учитывающий изменение нагрузки элемента цепи на ТТ в данной схеме по отношению к схеме соединения звезда. Для схемы полной звезды (в данном случае так и есть) $к_{сх}$=1.

Данные о приборах $Z_{приб.сх.}$, включенных во вторичные цепи трансформаторов тока, предоставлены ПАО «ФСК ЕЭС» - МЭС Урала.

Расчет производится по методике представленной в руководящем документе РД 153-34.0-11.209-99 [18] и представлен далее.

Общее сопротивление на одну фазу вторичных цепей трансформатора тока рассчитывается далее:

$$Z_{ном} = Z_{приб.} + R_{пров.} + R_{конт.}, \qquad (6.1)$$

где $Z_{приб.}$ - нагрузка приборов данной токовой цепи,

$R_{пров.}$ - сопротивление жил кабеля,

$R_{конт.}$ - сопротивление контактов токовой цепи.

С учетом схемы включения номинальная нагрузка вторичных цепей трансформаторов тока $Z_{Зном}$ должна удовлетворять условию:

$$Z_{Зном} \geq Z_{приб..сх} + (R_{пров.} + R_{конт.}) \cdot к_{сх}, \qquad (6.2)$$

где $Z_{приб.сх.}$ - нагрузка приборов данной токовой цепи с учетом схемы включения.

Нагрузка приборов рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{приб.сх.} = \sum_{j=1}^{n} Z_{приб.сх.j} \cdot к_{сх}, \qquad (6.3)$$

В целях расчета, сопротивление одного контакта $R_{конт.}$ принимается равным 0,05 Ом.

Сопротивление проводов $R_{пров.}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$R_{пров.} = \frac{\rho \cdot l_{пров.}}{q}, \qquad (6.4)$$

где ρ - удельное сопротивление материала проводника кабеля (медь 0,0175 Ом·м/мм^2, алюминий 0,028 Ом·м/мм^2)

$l_{пров.}$ - длина кабеля,

q - сечение жилы кабеля.

Минимально допустимое сечение жил кабеля по нагрузочной способности трансформатора тока находится исходя из формулы (6.2) и представлено далее:

$$R_{пров.доп} = \frac{Z_{Зном.} - Z_{приб.сх.} - R_{конт.}}{к_{сх.}}. \qquad (6.5)$$

Минимально допустимое сечение жил кабеля по нагрузочной способности трансформатора тока находится исходя из формулы (6.2) и (6.4), и представлено далее:

$$R_{пров.доп} = \frac{Z_{Зном.} - Z_{приб.сх.} - R_{конт.}}{к_{сх.}}, \qquad (6.6)$$

$$q_{мин.} = \frac{\rho \cdot l_{пров.}}{R_{пров.доп.}}. \qquad (6.7)$$

Расчеты по формулам (6.1-6.7) сведены в таблицу 6.4.

Таблица 6.4 – Расчет нагрузки вторичных цепей трансформаторов тока 110 кВ

	Трансформатор тока				Проводка токовых цепей									
Наименование	Фаза	Марка	Доп. нагрузка вторичных цепей, Ом (ZJном)	$к_{сх}$	Тип кабеля	Длина, м (lпров)	Сечение, мм^2 (q)	Сопротивление медного провода, Ом (Rпров.)	Сопротивление контактов, Ом (Rконт.)	Общее сопротивление с учетом $к_{сх}$, Ом (Rпров.+Rконт.)·$к_{сх}$	Нагрузка приборов с $к_{сх}$, Ом/фаза (Zприб.сх·$к_{сх}$)	Общая нагрузка, Ом/фаза (Zном)	Rпров.доп	Минимально допустимое расчетное сечение жил кабеля, мм2 (qмин)
Ввод Т1 110 кВ	A	ТВТ	1,6	1	КВВГнг-LS	70	2,5	0,518	0,05	0,568	0,004	0,572	1,65	0,78
	B													
	C													
Ввод Т2 110 кВ	A	ТВТ	1,6	1	КВВГнг-LS	70	2,5	0,518	0,05	0,568	0,004	0,572	1,65	0,78
	B													
	C													

Трансформаторы тока ТВТ-110 удовлетворяют условиям выбора и проверки.

6.4 Выбор трансформаторов напряжения 110 кВ подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

В качестве трансформаторов напряжения на подстанции «УЭТМ» выбираем антирезонансные элегазовые индуктивные заземляемые трансформаторы напряжения ЗНГ-УЭТМ-110 производства «УЭТМ».

«Основные преимущества трансформатора напряжения ЗНГ-УЭТМ-110:

- оснащение высокоэффективным взрывозащитным устройством, исключающим взрыв даже при коротком замыкании внутри трансформатора напряжения;

- высокий класс точности обмотки учета;

- сниженный уровень утечек элегаза (не более 0,2 % в год, что подтверждено заводскими испытаниями);

- отсутствие частичных разрядов ввиду отсутствия внутренней твердой изоляции;

- отсутствие явления феррорезонанса;

- необходимость в минимальном обслуживании (не менее 40 лет эксплуатации при нормальных условиях эксплуатации)» [27].

Трансформаторы напряжения необходимо проверить по допустимой нагрузке вторичных цепей и по падению напряжения.

К измерительным обмоткам трансформаторов напряжения подключаются счетчики, измерительные преобразователи, регистраторы, приборы измерения мощности.

На всех рассчитываемых присоединениях измерительные обмотки трансформаторов напряжения соединены по схеме звезда. Нагрузки измерительных обмоток трансформаторов напряжения симметричны. Для данной схемы включения коэффициент $к_{сх} = 1$, поэтому в расчетах его не учитываем.

Данные о приборах, включенных во вторичные цепи трансформаторов тока, предоставлены ПАО «ФСК ЕЭС» - МЭС Урала.

Активное сопротивление одной фазы вторичных цепей трансформатора напряжения рассчитывается по следующей формуле:

$$R_з = R_{приб.} + R_{пров.} + R_{конт.}, \qquad (6.8)$$

где $R_{приб.}$ - сопротивление приборов данной токовой цепи,

$R_{пров.}$ - сопротивление жил кабеля,

$R_{конт.}$ - сопротивление контактов токовой цепи (0,05Ом).

Сопротивление приборов токовой цепи рассчитывается по следующей формуле:

$$R_{приб.} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{m} \frac{n_i}{R_i}}, \qquad (6.9)$$

где n – число приборов i-го типа, подключенных к данному трансформатору,

R – сопротивление прибора i-го типа.

Падение напряжения в проводах от трансформатора напряжения до приборов рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta U = \frac{R_{конт.} + R_{пров.}}{R_{конт.} + R_{пров.} + R_{приб.}} \cdot 100\%. \qquad (6.10)$$

Расчеты по формулам (6.8-6.10) сведены в таблицу 6.5.

Таблица 6.5 – Расчет нагрузки вторичных цепей трансформаторов напряжения 110 кВ

Наименование	Трансформатор напряжения				Проводка цепей напряжения							Общая нагрузка, ВА/фаза	Падение напряжения в проводке, %
	Фаза	Марка	Напряжение в фазе (В)	Допустимая нагрузка вторичных цепей, ВА/фаза	Тип кабеля	Длина, м	Сечение, мм^2	Сопротивление контактов, Ом	Активное сопротивление цепи напряжения счетчика Rприб., Ом	Сопротивление медного провода, Ом (Rпров.)	Общее сопротивление, Ом		
ТН-110 кВ 1с.ш.	A	ЗНГ -110	100	75	КВВГнг-LS	10	2,5	0,05	12500	0,070	12500,120	0,800	0,00096
	B												
	C												
ТН-110 кВ 2с.ш.	A	ЗНГ -110	100	75	КВВГнг-LS	10	2,5	0,05	12500	0,070	12500,120	0,800	0,00096
	B												
	C												
	B												
	C												

Трансформаторы напряжения ЗНГ-УЭТМ-110 удовлетворяют условиям выбора и проверки.

6.5 Выбор ограничителей перенапряжений 110 кВ подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

В качестве ограничителя перенапряжений 110 кВ на ОРУ 110 кВ выбираем ОПН типа ОПН-110/88-10/650 (II) 4-УХЛ1 производства ЗАО «ФЕНИКС». В качестве ограничителя перенапряжений 110 кВ в нейтрали силового трансформатора выбираем ОПН-110/56-10/650 УХЛ1 производства ЗАО «ФЕНИКС».

Выбор ограничителей перенапряжения выполнен в соответствии с ПУЭ раздел 4 [16], «Методическими указаниями по применению ограничителей перенапряжений нелинейных в электрических сетях 6-35 кВ» [14], «Методическими указаниями по применению ограничителей в электрических сетях 110-750 кВ» [13].

Проверка ограничителей перенапряжений ОПН-110/88-10/650 (II) 4-УХЛ1 и ОПН-110/56-10/650 УХЛ1 по параметрам [9, 14, 13] представлена в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Проверка ограничителей перенапряжения 110 кВ

Единица электрооборудования	Параметр номинальный	Параметр расчетный	Условие проверки
Ограничитель перенапряжения ОРУ 110 кВ ОПН-110/88-10/650 (II) 4-УХЛ1	88 кВ	73 кВ	Длительно допустимое напряжение на ОПН $U_{д} \geq 1{,}15 \cdot U_{ном.сети} / \sqrt{3} = 73 кВ$
	10000 А	10000 А	Номинальный разрядный ток 10000 А согласно [24].
	40 кА	22,48 кА	Взрывобезопасность $I_{ср.опн} \geq 1{,}15 \cdot I^{(3)}_{К110} = 22{,}48 кА$, Iср.опн – ток срабатывания противовзрывного устройства.

Продолжение таблицы 6.6

Ограничитель перенапряжения 110 кВ в нейтрали силового трансформатора ОПН-110/56-10/650 УХЛ1	56 кВ	42 кВ	Длительно допустимое напряжение на ОПН $U_д \geq (1{,}15 \cdot U_{ном.сети} / \sqrt{3}) / \sqrt{3} = = 42\,кВ$
	10000 А	10000 А	Номинальный разрядный ток 10000 А согласно [24].
	40 кА	22,48 кА	Взрывобезопасность $I_{ср.опн} \geq 1{,}15 \cdot I^{(3)}_{К110} = 22{,}48\,кА$, Iср.опн – ток срабатывания противовзрывного устройства.

Ограничители перенапряжений 110 кВ на ОРУ 110 кВ типа ОПН-110/88-10/650 (II) 4-УХЛ1 и в нейтрали силового трансформатора типа ОПН-110/56-10/650 УХЛ1 удовлетворяют условиям выбора и проверки.

6.6 Выбор ошиновки 110 кВ подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

Как уже было сказано в п.4.2 настоящей бакалаврской работы, ремонтная перемычка ОРУ 110 кВ выполнена жесткой ошиновкой.

В качестве жесткой ошиновки выбираем жесткую ошиновку ЖО 110 производства «ЗЭТО». ЖО 110 производства «ЗЭТО» была разработана в 2001 г. с участием предприятия «Нижнегородскэнергосетьпроект», хорошо зарекомендовала себя и по настоящее время активно эксплуатируется на множестве подстанций в РФ.

ЖО 110 представляет собой трубчатые шины, которые в распределительном устройстве закрепляются на опорных изоляторах при помощи специальных креплений, также жесткая ошиновка крепится на опорные площадки разъединителей. Благодаря наличию внутри трубы гасителя, удается исключить вибрации при воздействии ветра. Между собой трубы соединяются токовыми компенсаторами, а соединение с гибкими

токопроводами выполняется при помощи использования специальных зажимов [26].

Материал из которого выполняется ЖО 110 – алюминиевый сплав 1915Т.

Проверка жесткой ошиновки ЖО 110 по параметрам [9, 26] представлена в таблице 6.7.

Таблица 6.7 – Проверка жесткой ошиновки ЖО 110

Сравнительная характеристика	Минимально допустимое значение	Значение характеристики оборудования
Номинальное напряжение	$U_{ном.сети}$ = 110 кВ	$U_{ном}$ = 110 кВ
Длительный рабочий ток	$I_{макс.раб}$ = 622 А	$I_{ном}$ = 2000 А
Электродинамическая стойкость при токах короткого замыкания:		
- амплитудное значение	$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 19{,}55 \cdot (1 + e^{-0{,}01/0{,}02}) = 44{,}41$ кА	$i_{дин}$ = 102 кА
Термическая стойкость	При $t_{откл} \geq 3 \cdot T_a$ = 0,06 с $B_к = I_{п0}^2 \cdot (t_{откл} + T_a) =$ $19{,}55^2 \cdot (0{,}155+0{,}02) =$ = 66,88 кА2·с где $t_{откл} = t_{рз} + t_{ов}$ = 0,1+0,055 = 0,155 с [9, 25], T_a = 0,02 [9]	При $t_{откл} < t_{терм.н}$ = 3 с $B_{терм.доп} = I_{тер}^2 \cdot t_{откл} =$ $= 40^2 \cdot 0{,}155$ = 248 кА2·с

Характеристики жесткой ошиновки ЖО 110 удовлетворяют условиям выбора и проверки.

Ошиновка между опорными изоляторами, спуски и перемычки между оборудованием выполнены гибким неизолированным проводом марки АС-300/39.

Выбор и проверка гибкой ошиновки производится по следующим параметрам:

- длительно допустимый ток проводника $I_{доп.} \geq I_{раб.сети}$;

- минимальное сечение проводника, отвечающее условию термической стойкости $S_{пров} \geq S_{терм.мин} = \frac{\sqrt{B_к}}{C_t}$, где C_t – температурный коэффициент для проводников.

Для провода АС 300/39 длительно допустимый ток согласно [5] составляет 710 А. Соответственно 710 А ≥ 622 А, условие выполняется.

По минимальному сечению $\frac{\sqrt{191{,}1}}{90} \cdot 10^3 = 153 мм^2 \leq$ 300 мм^2. Условие выполняется.

Характеристика гибкого неизолированного провода АС 300/39 удовлетворяют условиям выбора и проверки.

6.7 Выбор комплектного распределительного устройства 6 кВ подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

В качестве ячеек КРУ 6 кВ на подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ выбираем КРУ-6 кВ с выкатными ячейками двухстороннего обслуживания КРУ СЭЩ-59 производства ЗАО «ГК «Электрощит» - ТМ Самара» [22]. Каждая ячейка оснащена микропроцессорным блоком РЗиА «Сириус».

Основные параметры КРУ СЭЩ-59 представлены в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Параметры КРУ СЭЩ-59

Параметр	Значение
$U_{ном}$, кВ	6
Номинальный ток главных цепей/сборных шин $I_{ном}$, А	3150

Предполагается установка: 4-х вводных ячеек, 4-х секционных ячеек; 2 ячейки трансформатора напряжения; 2 ячейки трансформатора собственных нужд; 32 ячейки отходящих линий (включая резервные).

6.8 Выбор выключателей 6 кВ подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

В качестве вводных и секционных выключателей для установки в КРУ СЭЩ-59 выбраны выключатели ВВУ-СЭЩ-П-10-31,5.

В качестве линейных выключателей выбраны ВВУ-СЭЩ-ПЗ-10-20.

Проверка выбранных выключателей производится аналогично п.6.1 настоящей бакалаврской работы. Проверка представлена в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Проверка выключателей 6 кВ

Сравнительная характеристика	Минимально допустимое значение	Значение характеристики оборудования
Выключатели вводных ячеек		
Номинальное напряжение	$U_{ном.сети}$ = 6 кВ	$U_{ном}$ = 6 кВ
Длительный рабочий ток	$I_{макс.раб}$ = 3082 А	$I_{ном}$ = 3150 А
Электродинамическая стойкость при токах короткого замыкания:		
- действующее значение	$I_{п0}$ = 19,24 кА	$I_{скв}$ = 31,5 кА
- амплитудное значение	$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 19{,}24 \cdot (1 + e^{-0{,}01/0{,}05}) = 49{,}48$ кА	$i_{дин}$ = 80 кА
Отключающая способность:		
- периодическая составляющая	$I_{пτ} = I_{п0}$ = 19,24 кА	$I_{откл}$ = 31,5 кА
- апериодическая составляющая	$i_{aτ} = \sqrt{2} \cdot 19{,}24 \cdot e^{-0{,}05/0{,}05}) = 10$ кА где $\tau = t_{рз} + t_{св}$ = 0,01+0,04 = 0,05 с [9, 22], T_a = 0,05 [9]	$i_{дин} = \sqrt{2} \cdot I_{откл} \cdot \beta_н / 100 = \sqrt{2} \cdot 31{,}5 \cdot 40/100 = 17{,}81$ кА где $\beta_н$ = 40 % [22]

Продолжение таблицы 6.9

Термическая стойкость	При $t_{откл} \geq 3 \cdot T_а = 0,15$ с $B_к = I_{п0}^2 \cdot (t_{откл} + T_а) =$ $19,24^2 \cdot (0,155+0,02) =$ $= 134,41$ кА2·с где $t_{откл} = t_{рз} + t_{ов} = 0,1+0,048 =$ 0,148 с [9, 22], $T_а = 0,05$ [9]	При $t_{откл} < t_{терм.н} = 3$ с $B_{терм.доп} = I_{тер}^2 \cdot t_{откл} =$ $= 31,5^2 \cdot 0,148 = 146,8$ кА2·с
Выключатели линейных ячеек		
Номинальное напряжение	$U_{ном.сети} = 6$ кВ	$U_{ном} = 6$ кВ
Длительный рабочий ток	$I_{макс.раб} < 1250$ А	$I_{ном} = 1250$ А
Электродинамическая стойкость при токах короткого замыкания:		
- действующее значение	$I_{п0} = 19,24$ кА	$I_{скв} = 31,5$ кА
- амплитудное значение	$i_{уд} =$ $= \sqrt{2} \cdot 19,24 \cdot (1 + e^{-0,01/0,05}) =$ $= 49,48$ кА	$i_{дин} = 80$ кА
Отключающая способность:		
- периодическая составляющая	$I_{пτ} = I_{п0} = 19,24$ кА	$I_{откл} = 31,5$ кА
- апериодическая составляющая	$i_{aτ} =$ $= \sqrt{2} \cdot 19,24 \cdot e^{-0,05/0,05}) =$ $= 10$ кА где $\tau = t_{рз} + t_{св} = 0,01+0,04 =$ 0,05 с [9, 22], $T_а = 0,05$ [9]	$i_{дин} =$ $= \sqrt{2} \cdot I_{откл} \cdot \beta_н / 100 =$ $= \sqrt{2} \cdot 31,5 \cdot 40 / 100 =$ $= 17,81$ кА где $\beta_н = 40$ % [22]

Продолжение таблицы 6.9

Термическая стойкость	При $t_{откл} \geq 3 \cdot T_а = 0,15$ с $B_к = I_{п0}^2 \cdot (t_{откл} + T_а) =$ $19,24^2 \cdot (0,155+0,02) =$ $= 134,41$ кА2·с где $t_{откл} = t_{рз} + t_{ов} = 0,1+0,048 =$ 0,148 с [9, 22], $T_а = 0,05$ [9]	При $t_{откл} < t_{терм.н} = 3$ с $B_{терм.доп} = I_{тер}^2 \cdot t_{откл} =$ $= 31,5^2 \cdot 0,148 = 146,8$ кА2·с

Характеристики выключателей ВВУ-СЭЩ-П-10-31,5 и ВВУ-СЭЩ-ПЗ-10-20 удовлетворяют условиям выбора и проверки.

6.9 Выбор трансформаторов тока 6 кВ на подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

В качестве трансформаторов тока для установки в ячейках КРУ СЭЩ-59 выбираем трансформаторы тока с литой изоляцией ТОЛ-СЭЩ-10 с обмотками для измерения и защиты. Мощность вторичных обмоток составляет 20 ВА.

Расчеты трансформаторов тока 6 кВ производится аналогично п.6.3 настоящей бакалаврской работы, по формулам (6.1-6.7). Расчет произведен для одной ячейки и справедлив для всех остальных ячеек. Расчет сведен в таблицу 6.10.

Таблица 6.10 – Расчет нагрузки вторичных цепей трансформаторов тока 6 кВ

Наименование	Трансформатор тока				Проводка токовых цепей						Нагрузка приборов с $к_{сх}$, Ом/фаза ($Z_{приб.сх} \cdot к_{сх}$)	Общая нагрузка, Ом/фаза ($Z_{ном}$)	$R_{пров.доп}$	Минимально допустимое расчетное сечение жил кабеля, мм2 ($q_{мин}$)
	Фаза	Марка	Доп. нагрузка вторичных цепей, Ом ($Z_{Jном}$)	$к_{сх}$	Тип кабеля	Длина, м ($l_{пров}$)	Сечение, мм^2 (q)	Сопротивление медного провода, Ом ($R_{пров.}$)	Сопротивление контактов, Ом ($R_{конт.}$)	Общее сопротивление с учетом $к_{сх}$, Ом ($R_{пров.}+R_{конт.}) \cdot к_{сх}$				
Ячейка отходящие ВЛ	A B C	ТОЛ-СЭЩ-10	0,4	1	КВВГнг-LS	2	2,5	0,014	0,05	0,064	0,004	0,068	0,35	0,10

Характеристики трансформаторов тока ТОЛ-СЭЩ-10 удовлетворяют условиям выбора и проверки.

6.10 Выбор трансформаторов напряжения 6 кВ на подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

В качестве трансформаторов напряжения 6 кВ в ячейках КРУ СЭЩ-59 выбираем трехфазные антирезонансные группы трансформаторов напряжения НАЛИ-СЭЩ-10. Изоляция трансформаторов напряжения – литая.

Расчеты трансформаторов напряжения 6 кВ производится аналогично п.6.4 настоящей бакалаврской работы, по формулам (6.7-6.9). Расчет сведен в таблицу 6.11.

Таблица 6.11 – Расчет нагрузки вторичных цепей трансформаторов напряжения 6 кВ

	Трансформатор напряжения				Проводка цепей напряжения								
Наименование	Фаза	Марка	Напряжение в фазе (В)	Допустимая нагрузка вторичных цепей, ВА/фаза	Тип кабеля	Длина, м	Сечение, мм^2	Сопротивление контактов, Ом	Активное сопротивление цепи напряжения счетчика Rприб., Ом	Сопротивление медного провода, Ом (Rпров.)	Общее сопротивление, Ом	Общая нагрузка, ВА/фаза	Падение напряжения в проводке, %
ТН-1 10 кВ 1с.ш.	A	НАЛИ-СЭЩ-10	100	30	КВВГнг-LS	12	2,5	0,05	1563	0,084	1563,134	6,397	0,00857
	B												
	C												
ТН-2 10 кВ 2с.ш.	A	НАЛИ-СЭЩ-10	100	30	КВВГнг-LS	12	2,5	0,05	1786	0,084	1786,134	5,599	0,00750
	B												
	C												

Характеристики трансформаторов напряжения НАЛИ-СЭЩ-10 удовлетворяют условиям выбора и проверки.

6.11 Выбор ограничителей перенапряжений 6 кВ подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

В качестве ограничителя перенапряжений 6 кВ выбираем ОПН типа ОПН-10/13,7-10/650 УХЛ1 производства ЗАО «ФЕНИКС».

Проверка проводится аналогично п.6.5 настоящей бакалаврской работы и представлена в таблице 6.12.

Таблица 6.12 – Проверка ограничителей перенапряжения 6 кВ

Единица электрооборудования	Параметр номинальный	Параметр расчетный	Условие проверки
Ограничитель перенапряжения 6 кВ ОПН-10/13,7-10/650 УХЛ1	13,7 кВ	4,18 кВ	Длительно допустимое напряжение на ОПН $U_{д} \geq 1{,}15 \cdot U_{ном.сети} / \sqrt{3} = 4{,}18\,кВ$
	10000 А	10000 А	Номинальный разрядный ток 10000 А согласно [21].
	40 кА	22,126 кА	Взрывобезопасность $I_{ср.опн} \geq 1{,}15 \cdot I^{(3)}_{кз\,max} = 22{,}126\,кА$, Iср.опн – ток срабатывания противовзрывного устройства.

Ограничитель перенапряжений 6 кВ типа ОПН-10/13,7-10/650 УХЛ1 удовлетворяет условиям выбора и проверки.

7 Выбор системы оперативного тока подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

На подстанции предусматривается система оперативного постоянного тока. Напряжение системы – 220 В. Основные потребители это: центральная сигнализация, аппараты релейной защиты, панели телемеханики, шинки управления щита собственных нужд, щитовые приборы и оперативные блокировки разъединителей. Система состоит из:

- зарядно-подзарядное выпрямительное устройство (2 шкафа);
- распределительная система постоянного тока (1 шкаф ввода, 1 шкаф секционирования, 2 шкафа отходящих линий, 2 шкафа распределения);
- аккумуляторная батарея (1 стеллаж);
- распределительная сеть 220 В (кабели с медными жилами).

Выбор емкости аккумуляторной батареи произведен в таблице 7.1

Таблица 7.1 – Выбор емкости аккумуляторной батареи

Рассчитываемый параметр	Формула
Количество аккумуляторов в батарее, эл.	$N = \frac{U_{нб.норм.доп}}{U_{ак.пз}}$
Напряжение аккумуляторов батареи, В/эл	$U_{нм.раб.ак} = \frac{U_{нм.доп} + \Delta U_{АБ-Эп}}{N}$
Емкость аккумуляторной батареи, А·ч	$C' = k_{ср} \cdot t \cdot I_{ср}$
Емкость аккумуляторной батареи с учетом двухступенчатой диаграммы нагрузки, А·ч	$C_{пр} = k_1 \cdot I_{пост} + k_2 \cdot I_{кр}$
Емкость аккумуляторной батареи с учетом компенсации температурного и временного снижения емкости, А·ч	$C = k_э \cdot C_{пр}$
Данные предоставленные персоналом подстанции «УЭТМ»: Суммарный ток постоянной и временной нагрузки 10,91 А ($I_{ср}$, $I_{пост}$) в течении 2ч. Ток кратковременной нагрузки 10 А ($I_{кр}$) в течении 0,1 с. Остальные данные взяты согласно методике [12]. Формулы взяты также из [12].	

В результате расчетов емкость аккумуляторной батареи получилась равной С = 18 А·ч. Из ряда батарей ООО ПК «Электроконцепт» выбираем аккумуляторную батарею с наибольшей емкостью равной 100 А·ч. Данной батареей является аккумуляторная батарея АГЭМ 100/12, состоящая из 17 аккумуляторов (102 эл.), номинальной емкостью 100 А·ч.

8 Выбор и расчет трансформатора системы собственных нужд подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

На подстанции предусматривается: два трансформатора собственных нужд, щит собственных нужд и распределительная сеть 0,4 кВ. Трансформаторы собственных нужд устанавливаются на территории и подключаются к ячейкам 6 кВ. Щит собственных нужд состоит из двух панелей отходящих линий, одной панели ввода от трансформаторов собственных нужд и одной панели секционирования в комплекте с устройством АВР. Распределительная сеть выполняется кабелями с медными жилами.

Мощность трансформаторов собственных нужд можно определить путем суммирования номинальных мощностей отдельных электроприемников, питаемых данными трансформаторами. Исключение составляют электроприемники, находящиеся в резерве, а также сварочные трансформаторы, электроприемники кратковременной нагрузки.

Мощность нагрузки $S_{расч}$ 66,4 кВА, мощность кратковременной нагрузки $S_{рем}$ 18,8 кВА. Исходя из значений мощностей нагрузки и кратковременной нагрузки выбираем мощность трансформатора 100 кВА [33].

Данные по мощностям нагрузки и кратковременной нагрузки предоставлены персоналом подстанции «УЭТМ».

Мощность трансформатора собственных нужд проверяется определяется далее:

$$S_T \geq \frac{S_{расч.} + S_{рем.}}{n \cdot k_{пер.}} = \frac{66{,}4 + 18{,}8}{2 \cdot 1{,}3} = 32{,}76 \text{ кВА}.$$

Мощность 100 кВА ≥ 32,76 кВА. В качестве трансформатора собственных нужд выбираем трансформатор ТМГэ-100/6 кВ, который по результатам проверки годен к эксплуатации. ТМГэ-100/6 обеспечит питание потребителей собственных нужд в нормальном и аварийном режиме.

9 Заземление подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

Заземление выполняется согласно ПУЭ [16]. Согласно п.п. 1.7.88-1.7.95 «для подстанции напряжением 110 кВ с эффективно заземленной нейтралью сопротивление заземляющего устройства в любое время года не должно превышать 0,5 Ом» [16]. Заземляющим устройством является совокупность заземлителя и заземляющих проводников.

На территории подстанции, занятой оборудование, заземляющий контур выполняется в соответствии с п.1.7.90 [16] – поперечные и продольные горизонтальные заземлители прокладываются и объединяются между собой в заземляющую сетку, причем продольные заземлители прокладываются вдоль осей электрооборудования и присоединяются к закладным деталям оборудования. Поперечные же заземлители прокладываются в местах между оборудованием, там где наиболее удобно. Максимальный размер ячейки заземляющей сетки 6х6 м (выполняется полосой сечением 40х5 мм).

Здание подстанции (ЗРУ 6 кВ) заземляется путем прокладки на расстояние от него в 1м и на глубине 0,7 м контура заземлителей.

К заземляющему контуру присоединяются все имеющиеся естественные заземлители, предусмотренные согласно [16], в т.ч. и фундаменты зданий.

В случае если величина сопротивления заземляющего контура не укладывается в допустимые значения, то оно уменьшается при помощи вертикальных электродов диаметром 18 мм, располагаемых вдоль заземляющего контура и заглубляемых на глубину 5 м (точка начала заглубления - 0,5-0,7 м от поверхности земли).

В здании ЗРУ 6 В по всему внутреннему периметру прокладывается магистраль заземления, выполненная медной полосой, к которой присоединяется все оборудование и металлоконструкции.

Все заземляющие проводники системы заземления соединяются между собой сваркой.

10 Молниезащита подстанции «УЭТМ» 110/6 кВ

Молниезащита подстанции выполняется согласно требований нормативных документов РД 153-34.3-35.125-99, СО 153-34.21.122-2003 и ПУЭ [16].

Молниезащиту зданий подстанции обеспечит молниеприемная сетка, токоотводы и заземляющее устройство. Данная сетка выполняется в соответствии с гл. 3.2 СО 153-34.21.122-2003, из прутка оцинкованной стали диаметров 8 мм и укладывается на кровлю здания. Размер ячейки не более 12х12 м. В узлах, сетка соединяется сваркой. В качестве токоотводов используется пруток из оцинкованной стали диаметром 8мм.

Защита основного оборудования подстанции от прямых ударов молнии осуществляет тремя молниеприемниками, установленными на прожекторной мачте, на приемном портале ВЛ 110 кВ и на отдельностоящем молниеотводе.

Высота верхней точки молниеприемников следующая: на прожекторной мачте – 27,04 м; на отдельностоящем молниеотводе – 21,04 м; на приемном портале ВЛ 110 кВ – 20,41 м.

Подстанция находится в районе со среднегодовой продолжительностью гроз от 40 до 60 часов в год, а также относится к объектам специального назначения с ограниченной опасностью. Исходя из района расположения и степени опасности объекта, принимаемый допустимый уровень надежности составляет 0,9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Непрерывное развитие такого предприятия как «Уралэлектротяжмаш», диктует с каждым годом все увеличивающиеся требования к надежности электроснабжения, т.к. надежное электроснабжение оказывает значительное влияние на стабильное производство промышленного предприятия.

В силу сильного износа понизительной подстанции «УЭТМ», питающей предприятие, потребовалось её полное перепроектирование. Электрическая часть данного перепроектирования была рассмотрена настоящей бакалаврской работой и основные принятые решения представлены далее.

К установке, в соответствии с запланированным ростом нагрузок, приняты силовые трансформаторы типа ТРДН-40000/110/6/6 кВ. Трансформаторы проверены по действующим методикам и в полном объеме обеспечат электропитание потребителей.

Электрическая схема ОРУ 110 кВ выполнена по схеме № 110-4Н, а ЗРУ 6 кВ по схеме № 6-2. Схемы отличаются надежностью и простотой.

Для проверки основного электрооборудование РУ 110 кВ и 6 кВ рассчитаны токи короткого замыкания. Оборудование проверено по всем необходимым параметрам. Все параметры находятся в диапазоне допустимых значений (с запасом).

Система оперативного тока выполнена на постоянном оперативном токе.

Трансформаторы собственных нужд в полном объеме обеспечат электропитание потребителей, подключенных к ним.

Система заземления подстанции обеспечит безопасную эксплуатацию оборудования как ОРУ 110 кВ, так и ЗРУ 6 кВ и не допустит появление опасных потенциалов на выводах чувствительного оборудования.

В дополнение к системе заземления, молниезащита подстанции также обеспечит защиту оборудования от прямых ударов молнии и обеспечит безопасность эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проект инвестиционной программы ПАО «ФСК ЕЭС» на период 2020-2024 гг. с корректировкой инвестиционной программы 2019 г. [Электронный ресурс] : офиц. сайт ПАО «ФСК ЕЭС». Москва, 2019. URL: http://www.fsk-ees.ru/investments/investment_program/2020_2024/ (дата обращения: 10.03.2019).

2. Стратегия социально-экономического развития Свердловской области на период до 2030 года [Электронный ресурс] : офиц. сайт Министерства экономики и территориального развития Свердловской области. Екатеринбург, 2014. URL: http://economy.midural.ru/sites/default/files/files/st2030.pdf (дата обращения: 01.03.2019).

3. Схема и программа развития электроэнергетики Свердловской области на период 2019-2023 годов [Электронный ресурс] : офиц. интернет-портал правовой информации Свердловской области. Екатеринбург, 2018. URL: http://www.pravo.gov66.ru/17174/ (дата обращения: 1.03.2019).

4. ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ [Электронный ресурс]. Утв. и введ. приказом № 173-ст от 12.07.2007. М. : Стандартинформ, 2007. 40 с. URL: http://www.complexdoc.ru/pdf/ГОСТ%20Р%2052735-2007/gost_r_52735-2007 (дата обращения: 17.03.2019).

5. ГОСТ 839-80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи [Электронный ресурс]. Утв. и введ. 01.01.1981. М. Стандартинформ, 2001. 23 с. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200008421 (дата обращения: 25.04.2019).

6. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки [Электронный ресурс]. Взамен ГОСТ 14209-69 ; утв. и введ. приказом № 236 от 31.01.85. М. : Стандартинформ, 2009. 36 с. URL: http://www.internet-law.ru/gosts/gost/44357/ (дата обращения: 12.03.2019).

7. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование систем электроснабжения : [электронное учеб.-метод. пособие]. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. 1 оптический диск.

8. Земцов А. И., Вокин И. А. Проектирование главной понизительной подстанции предприятия : [учебное пособие]. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2015. 101 с. : ил. ISBN 978-5-7964-1853-6.

9. Степкина Ю. В. Проектирование электрической части понизительной подстанции : учеб.-метод. пособие по выполнению курсового проектирования и дипломного проектирования. Тольятти : Изд-во Тольяттинского государственного университета, 2007. 124 с.

10. Grbić M., Pavlović A., Hrvić D. Electric and magnetic field testing in vicinity of 110/x kV substations // Nikola Tesla. 2016. № 26. P. 151-163.

11. Song X., Xiaoxing Z., Ju T. A review on SF6 substitute gases and research status of CF3 I gases // Energy Reports. 2018. № 4. P. 486-496.

12. Методические указания по выбору оборудования СОПТ [Электронный ресурс] : СТО 56947007-29.120.40.216-2016 : введ. 2016-03-18. М. : [б.и.], 2016. 70 с. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.40.216-2016.pdf (дата обращения: 26.04.2019).

13. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110-750 кВ [Электронный ресурс] : утв. департаментом стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России» 30.09.99. М. : [б.и.], 2000. 36 с. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200080313 (дата обращения: 25.04.2019).

14. Методические указания по применению ограничителей перенапряжений нелинейных в электрических сетях 6-35 кВ [Электронный ресурс] : утв. департаментов научно-техн. политики и развития РАО «ЕЭС России» 27.04.01. М. : [б.и.], 2001. 75 с. URL: http://files.stroyinf.ru/data2/1/429

3850/4293850515.htm (дата обращения: 25.04.2019).

15. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НПТ ПС) [Электронный ресурс] : СТО

56947007-29.240.10.028-2009 : утв. ОАО «ФСК ЕЭС» 13.04.09. М. : [б.и.], 2009. 96 с. URL: http://www.fsk-ees.ru/media/File/customers_tech/NTP_PS.pdf (дата обращения: 1.04.2019).

16. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) [Электронный ресурс] : 7-ое издание. 178 с. URL: https://bolid.ru/files/554/732/h_4b5caa66bb3e627f4d5a006ac89af7d4.pdf (дата обращения: 01.03.2019).

17. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий. Нормы технологического проектирования [Электронный ресурс] : утв. департаментом стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России» 1994. М. : [б.и.], 1994. 69 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data1/9/9633/ (дата обращения: 25.03.2019).

18. Рекомендации. Автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии и мощности. Типовая методика выполнения измерений электроэнергии и мощности [Электронный ресурс] : РД 153-34.0-11.209-99 : утв. РАО «ЕЭС России» 21.07.1999. М. : НЦ ЭНАС, 2002. 79 с. URL: http://gostrf.com/normadata/1/4294817/4294817370.pdf (дата обращения: 5.04.2019).

19. Рекомендации по применению типовых принципиальных электрических схем распределительных устройств подстанций 35 – 750 кВ [Электронный ресурс] : СТО 56947007-29.240.30.047-2010. введ. 2010.06.16. М. : [б.и.], 2010. 128 с. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.240.30.047-2010.pdf (дата обращения: 1.04.2019).

20. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения [Электронный ресурс] : СТО 56947007-29.240.30.010-2008 : введ. 2007-12-20. М. : [б.и.], 2007. 132 с. URL: http://www.fsk-ees.ru/media/File/customers_tech/Schems.pdf (дата обращения: 1.03.2019).

21. Выключатель элегазовый баковый типа ВЭБ-УЭТМ-110 на напряжение 110 кВ [Электронный ресурс] : каталог ; разработчик и

изготовитель «УЭТМ». Екатеринбург, 2019. 20 л. URL: http://www.uetm.ru/ru/katalog-produktsii/item/veb-uetm-110/ (дата обращения: 27.03.2019).

22. КРУ СЭЩ-59. Комплектное распределительное устройство наружной установки на напряжение 6(10) кВ [Электронный ресурс] : каталог ; разработчик и изготовитель «ГК «Электрощит» ТМ Самара». Самара, 2019. 90 л. URL: https://electroshield.ru/catalog/komplektnye-raspredelitelnye-ustroystva/kru-seshch-59-6-10-kv/ (дата обращения: 02.04.2019).

23. Номенклатурный каталог Тольяттинский Трансформатор [Электронный ресурс] : каталог ООО «Тольяттинский Трансформатор. Тольятти, 2019. 115 с. URL: http://www.transformator.com.ru/docs/НК_ТТ,ООО_2019%20г.pdf(2151561%20v1).pdf (дата обращения: 12.03.2019).

24. ОПН-110 кВ [Электронный ресурс] : офиц. сайт компании «ФЕНИКС-88» ; каталог продукции. URL: http://fenix88.com/products/productsall/opn110/ (дата обращения: 25.04.2019).

25. Разъединители наружной установки серии РПД-УЭТМ и РПДО-УЭТМ на 110 и 220 кВ [Электронный ресурс] : каталог ; разработчик и изготовитель «УЭТМ». Екатеринбург, 2019. 32 л. URL: http://www.uetm.ru/ru/katalog-produktsii/item/rpduetm110rpdouetm110/ (дата обращения: 02.04.2019).

26. Технический каталог. Жесткая ошиновка ОРУ 110-750 кВ [Электронный ресурс] : каталог ; разработчик и изготовитель «Завод электротехнического оборудования». Великие Луки, 2019. 34 л. URL: http://www.zeto.ru/products_and_services/high_voltage_equipment/jestkaya-oshinovka-dlya-oru-110-220-330-500-750-kv_1 (дата обращения: 27.03.2019).

27. Трансформаторы напряжения ЗНГ-УЭТМ-110 [Электронный ресурс] : каталог ; разработчик и изготовитель «Уралэлектротяжмаш». Екатеринбург, 2019. 35 л. URL: http://www.uetm.ru/katalog-produktsii/item/znguetm110/ (дата обращения: 27.03.2019).

28. Реестр инновационных решений ПАО «Россети» [Электронный ресурс] : сайт компании ПАО «Россети». URL: http://www.rosseti.ru/investment/introdution_solutions/reestr_innovation/ (дата обращения: 10.03.2019).

29. Тарифы на электроэнергию в Свердловской области н 2019 год [Электронный ресурс] : сайт Energybase.ru. URL: https://energybase.ru/tariff/sverdlovskaya-oblast/2019?TariffSearch%5btype_id%5d=1 (дата обращения: 10.03.2019).

30. Уралэлектротяжмаш. О предприятии [Электронный ресурс] : сайт АО «Уралэлектротяжмаш». URL: http://www.uetm.ru/ru/o-kompanii/ (дата обращения: 12.03.2019).

31. Электрическая подстанция [Электронный ресурс] : сайт свободной энциклопедии Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB (дата обращения: 02.03.2019).

32. Csanyi E. Learn HV substation elements (graphic symbols, basics & connection schemes) [Электронный ресурс] : Electrical Engineering Portal. 2019. URL: https://electrical-engineering-portal.com/hv-substation-elements (дата обращения: 15.04.2019).

33. Miodrag K. How to make calculation for a distribution substation 10/0.4 kV, 2×1600 kVA [Электронный ресурс] : Electrical Engineering Portal. 2019. URL: https://electrical-engineering-portal.com/calculation-distribution-substation-2x1600-kva (дата обращения: 2.05.2019).

34. Miodrag K. Learn to read and understand single line diagrams and wiring diagrams [Электронный ресурс] : Electrical Engineering Portal. 2019. URL: https://electrical-engineering-portal.com/read-understand-single-line-wiring-diagrams (дата обращения: 12.04.2019).