

Аннотация

В выпускной квалификационной работе рассмотрен возможный вариант реконструкции электрической части открытого распределительного устройства ОРУ 110 кВ Самарского филиала ПАО «Т Плюс» ТЭЦ ВАЗа, в котором предусматривается замена электрооборудования, исчерпавшего свой ресурс, на более новое и соответствующее современным стандартам.

Выпускная квалификационная работа содержит в себе следующие пункты:

- Описание причины реконструкции открытого распределительного устройства 110 кВ ТЭЦ ВАЗа;
- Расчет токов короткого замыкания;
- Подбор высоковольтных электроагрегатов;
- Описание возможности внедрения синхронных измерений для актуализации параметров сети.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки на 59 листах формата А4, включающей в себя 15 таблиц и 12 рисунков. Графическая часть представлена на шести листах формата А1.

Abstract

In the final qualification work, a possible way of reconstruction of electrical part outdoor switchgear of the 110 kV of the Samara branch of PJSC “T Plus” of the VAZ CHPP, in which the replacement of electrical equipment, exhausted its resource, is envisaged for a more new and significant upgrade.

The final qualification work contains the following items:

- The description of the reason of outdoor switchgear of 110 kV of VAZ CHPP;
- Calculation of short circuit currents;
- Selection of high-voltage equipment;
- Description of the possible of introducing synchronous measurements for updating the network parameters.

The final qualification work consists of A4 59 sheets of A4 format, including 15 tables and 12 drawing. Graphical part is on six sheets of A1 format.

Содержание

Введение.....	5
1 Общая характеристика объекта.....	7
1.1 Основные сооружения электростанции.....	8
2 Описание технологического процесса ТЭЦ ВАЗа.....	10
3 Описание существующей схемы электроснабжения ТЭЦ ВАЗа.....	12
3.1 Характеристика открытого распределительного устройства 110 кВ ТЭЦ ВАЗа (ОРУ 110 кВ).....	13
3.2 Состояние электрооборудования открытого распределительного устройства 110 кВ ТЭЦ ВАЗа.....	14
4 Расчет токов короткого замыкания открытого распределительного устройства 110 кВ (1, 2 сш).....	21
5 Подбор и проверка электрооборудования для открытого распределительного устройства 110 кВ (1, 2 сш).....	33
6 Применение синхронных измерений для актуализации параметров сети..	49
6.1 Общие положения.....	49
6.2 Структура системы.....	50
6.3 Измерения в динамическом режиме.....	51
Заключение.....	54
Список использованных источников.....	55

Введение

Электроэнергетика, несомненно, является очень важным разделом в энергетике, которая занимается производством, передачей и сбытом электроэнергии.

В настоящее время ядром является энергетический комплекс Российской Федерации – Единая энергетическая система России – самая осязательная в СНГ, охватывающая обширные участки государства – шесть часовых поясов с востока на запад.

В составе ЕЭС России 2/3 генерирующих мощностей занимают тепловые электрические станции, из которых 55 % мощностей ТЭС составляют теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), остающаяся доля приходится на конденсационные электрические станции (КЭС). К тому, как мощность гидроэлектростанций (ГЭС), в том числе и ГАЭС занимает 21 % установленной мощности электростанций России. В то время как установленная мощность атомных электростанций составляет 17,2 %.

Электроэнергетика РФ в наше время переживает не очень простой период: инвестиционных капиталовложений для строительства новых электростанций практически нет, выходит из строя основное электрическое оборудование вследствие его морального и физического износа. Для обеспечения высокой надежности и бесперебойности в подачи электроэнергии электрическое хозяйство должно иметь оборудование, технические решения и экономические показатели которого соответствуют современным стандартам.

Наращение безопасности и осовременивание открытого распределительного устройства 110 кВ Самарского отделения ПАО «Т Плюс» ТЭЦ ВАЗа является основной целью выпускной квалификационной работы. Главной задачей является проведение исследования технического состояния оборудования, срок службы которого близок к критическому, и

предложением альтернативного варианта его замены без наращивания площади с дальнейшей перспективой реконструкции ОРУ.

Замена старого оборудования позволит снизить рабочие и финансовые затраты на эксплуатацию оборудования. За счет повышения надежности убытки, являющиеся вследствие внеплановых остановок и простоев оборудования, будут снижены. Непредусмотренные остановки приводят к нарушению технологического процесса предприятия, что может привести к неприятным последствиям. Для выполнения поставленной цели необходимо тщательное изучение объекта проектирования, а именно технологического процесса электростанции, установленного оборудования. Также не мало важно знать климатическую зону, где находится станция. Несомненно, выбор электрооборудования осуществляется на основе расчета токов короткого замыкания.

Задачами выпускной квалификационной работы являются предложение вариации замены оборудования для ОРУ 110 кВ ТЭЦ ВАЗа, а также описание возможности применение синхронных измерений для актуализации параметров сети.

1 Общая характеристика объекта

Главным отличием теплоэлектростанций (ТЭС) от конденсационных станций (КЭС) и тепловых электрических станций (ТЭС) является то, что помимо выработки и снабжения электроэнергией ТЭС также вырабатывает и тепловую энергию. Тем самым, позволяя использовать тепло для нужд производства, ГВС и отопления.

В 1966 году было запущено строительство, на данный момент, Самарского отделения ПАО «Т Плюс» ТЭС ВАЗа. Главной причиной постройки этой станции послужило параллельное строительство такого крупного предприятия, как Волжский автомобильный завод. В ноябре 1967 года потребителям начали отпускать тепловую энергию от водонагревательных котлов, а зимой 1969 года пущено первоначальное энергооборудование.

В 1987 году ввод финального одиннадцатого турбогенератора позволил достигнуть запланированной проектом мощности в 1172 МВт.

Проект ТЭС разработан Львовским отделением института «Теплоэлектропроект». Строительство ТЭС осуществлялось «Химэнергостроем» управления «Куйбышевгидрострой» с привлечением субподрядных специализированных организаций Министерства энергетики и электрификации СССР, монтаж оборудования вели тресты «Волгоэнергомонтаж» и «Гидроэлектромонтаж».

На данный момент ТЭС ВАЗа является источником электроснабжения, отопления и ГВС для ПАО «АВТОВАЗ», жителей Автозаводского района города Тольятти, а также территории коммунального района города. Для выработки такого большого объема энергии, с полной загрузкой функционируют 11 турбогенераторов, 14 паровых энергетических котлов, 14 пиковых водонагревательных установок. ТЭС ВАЗа также передает избыточную мощность в Единую Европейскую энергосистему России через ЛЭП напряжением 220 кВ.

Установленная мощность электрических ресурсов – 1172 МВт. Мощность тепловых ресурсов – 3903 Гкал/ч. Базовым топливом является газ, в качестве запасного топлива используется мазут. Для его хранения предусмотрены 6 баков из металла вместимостью по 10 000 м³ и четырех по 20 000 м³, также для нужд мазутного хозяйства имеются приемосливные устройства и мазутонасосные. Снабжение технической водой электростанции циркуляционное с семью градирнями башенной формы площадью ирригации по 26 000 м² с двумя центральными насосными станциями.

1.1 Основные сооружения электростанции

К основным сооружениям относятся: главный корпус, пиковые котельные №1, 2, 3, объединенный вспомогательный корпус с химводоочитской, топливное хозяйство, сооружения технического водоснабжения и электрической части.

- главный корпус. Выполнен в сборном железобетоне с применением строительных материалов и конструкций: утепленных панелей с применением профильного стального листа, стеклопакетов, акустических плиток «Акмигран», облицовочных керамических глазурованных плиток. Главный корпус имеет три пролета. Шаг колонн – 12 м. Котельное отделение имеет разрыв между осями 23 и 27, в который встроена двухэтажная вставка для объединенной насосной, буфета и бытовых помещений. Расположение турбоагрегатов в машинном зале – поперечное. Тепловая схема станции – с поперечными связями. На открытой площадке за рядом «Г» главного корпуса установлены тягодутьевые установки и регенеративные воздухоподогреватели. Отвод дымовых газов осуществляется через одну дымовую трубу высотой 180 метров и две трубы по 250 метров.

- пиковые котельные. Пиковые котлы полуоткрытой компоновки установлены в трех зданиях, выполненных в сборном железобетоне, стены

из керамзитовых панелей. Подземное хозяйство котельных – подвального типа. Дымососы располагаются на открытой площадке. В каждом здании имеются бытовые и вспомогательные помещения. Пролет котельных – 18,0 м, продольный шаг колонн – 6,9 м. В пиковой котельной №1 установлено 6 котлов ПТВМ – 100, в котельной №2 – 4 котла ПТВМ – 100, №3 – 2 котла ПТВМ – 180 и 3 КВГМ – 180.

- объединенный вспомогательный корпус. Соединен с главным корпусом переходными мостиками. В четырехэтажной части здания расположены лаборатории, административные, служебные помещения и душевые. В одноэтажной части здания находятся химводоочистка, электролитная, механические мастерские.

- сооружения электрической части. Отдача электромощности электрической станции предусмотрена с открытых распределительных устройств на напряжениях 110 и 220 кВ, которые выполнены с двумя рабочими и третьей обходной системами сборных шин. Сборные шины 110 кВ связаны между собой секционными выключателями.

2 Описание технологического процесса ТЭЦ ВАЗа

Технологический процесс – один из составляющих производственного процесса, заключающийся в выполнении упорядоченных взаимосвязанных действий для достижения конечного результата. Для выполнения технологического процесса необходим комплекс установок производства, называемый средствами технологического оснащения.

Технологический процесс ТЭЦ ВАЗа цикличен:

1) сырая вода поступает на производство установленного нормативами качества, что достигается путем прохождения ее через установки очистки от солей и минералов. Водная очистка включает в себя три устройства:

- установка, удаляющая соли с двумя ступенями обессоливания. Производительность составляет 770 тонн в час. Задачей установки является компенсация утраченного пара и конденсата в процессе работы станции и отпуска деминерализованной воды на ПАО «АВТОВАЗ» для технологических целей;

- установка для очистки собственного конденсата с мазутного хозяйства и из главного корпуса выработкой в 60 тонн в час и 100 тонн в час;

- установка по подготовке ХВО, включающая в себя 9 блоков выработкой в 4530 тонн в час, по схеме Н – катионирования воды для питья.

2) вода, прошедшая очистку отгоняется в котельный агрегат, который доводит ее до кипения, образуя смесь пара и воды. Далее проходя в турбину пар, заставляет лопасти турбины вращаться, в следствии чего происходит выработка электроэнергии;

3) пар расходуется на три основные задачи: на нагрев (для отопления и ГВС жителей города), на выполнения технологических задач ПАО «АВТОВАЗ» (для парообработки кузовов), на собственные нужды (для сохранения функционирования турбоагрегата);

4) выработав свои ресурсы пар вновь применяют с участием системы регенерации турбоагрегата:

- пар направляется на цилиндрическое тело высокого давления турбоагрегата;

- выходя из цилиндрического тела низкого давления, попадает в градирни, которые в свою очередь выполняют на станции роль конденсаторов;

- с участием насосов, циркулирующих жидкость, вода поступает на каждый турбоагрегат для охлаждения пара, который прошел отработку;

- конденсат качается через систему регенерации (4 цилиндрических тела низкого давления и 3 цилиндрических тела высокого давления);

- на каждый соответствующий цилиндрический объект с отличных друг от друга ступеней пар отбирается на подогрев воды;

- вода направляется в деаэратор, где она проходит очистку от газов;

- при участие насосов, с деаэратора вода поступает в котлоагрегат, откуда снова направляется на турбоагрегат.

3 Описание существующей схемы электроснабжения ТЭЦ ВАЗа

Учитывая многообразие и особенности внушительного количества присоединенных электрических приемников для ОРУ 110 кВ ТЭЦ ВАЗа спланирована схема с двумя рабочими и одной обходной системами шин.

Схемы РУ с двумя системами сборных шин и третьей обходной системой шин получили широкое распространение на напряжении 110 — 220 кВ, которые обладают всеми оперативными свойствами схем с двумя системами сборных шин и, кроме того, предоставляют возможность вывода в ремонт выключателя любой электрической цепи без перерыва в ее работе и отключения электрической цепи обходным выключателем при неполадках в работе выключателя цепи, когда отключение его невозможно (неисправен привод масляного выключателя, поврежден фарфор камер воздушного выключателя и т.д.) [3].

Отдача мощности электрической станции осуществляется с открытого РУ классов напряжений 110 кВ и 220 кВ. Соединение и поддержание связи открытых РУ производится с помощью двух автотрансформаторов марки ТДЦТГА-240000/120, которые в свою очередь регулируются вольтодобавочными трансформаторами.

Собственные нужды покрываются мощностью с трансформаторов собственных нужд напряжением 6 кВ и 0,4 кВ. РУ для расхода ресурсов на собственные нужды питается по схеме отпаяк от блоков «генератор – трансформатор» с базовыми трансформаторами с полной мощностью в 16 МВА и 25 МВА и запасным с полной мощностью на 32 МВА. Секции низшего напряжения обеспечиваются питанием через трансформаторы напряжение 6 кВ и 0,4 кВ, полная мощность которых составляет 1000 кВА, 750 кВА и 630 кВА.

Исходя из вышеописанного раздела главной схемы электрических соединений и схемы собственных нужд, а также представленных

параметров, можно предположить, что схема с двумя рабочими и одной обходной системами шин для ОРУ 110 кВ достаточно надежна.

3.1 Характеристика открытого распределительного устройства 110 кВ ТЭЦ ВАЗа

Распределительное устройство (РУ) - электроустановка, служащая для приема и распределения электроэнергии и содержащая коммутационные аппараты, сборные и соединительные шины, вспомогательные устройства (компрессорные, аккумуляторные и др.), а также устройства защиты, автоматики, телемеханики, связи и измерений [4].

На местности ОРУ 110 кВ расположено за главным корпусом. Электростанция, выдаваемая внушительную мощность с турбогенераторов (1172 МВт) имеет высокие значения тока КЗ. Это и поясняет выбор высокого класса напряжения для ОРУ. Открытое распределительное устройство, как уже говорилось выше, имеет схему с двумя рабочими, секционированными между собой, и одной обходной системами сборных шин (СШ). Секции сборных шин имеют связь между друг другом посредством подключения выключателя марки ВГТ – 110 П – 40/2500 У1. На открытом распределительном устройстве 110 кВ смонтированы трансформаторы напряжения марки НАМИ – 110. Данный вид трансформаторов подключен на рабочей СШ. На обходной СШ подключены трансформаторы напряжения марки НКФ-110-57, которые в свою очередь подсоединен через разъединитель и имеет защиту в виде ограничителя перенапряжений ОПН – 110. 44 ячейки – такое существенное количество имеет в себе ОРУ 110 кВ. От блоков 1, 7, 10, 12, 14, 16, 20, 27, 32, 36, 37, 39, 40 по кабельным выработкам отходят наполненные маслом кабели напряжением 110 кВ для питания одного из самых крупных потребителей, а именно ПАО «АВТОВАЗ». Питающая мощность на вводные ячейки 2, 4, 6, 15, 23, 24, 26, 29 приходит с соответствующих им трансформаторов 8 ГТ, 7 ГТ, АТ – 6 ГТ, 4 ГТ, АТ – 5 ГТ, 3 ГТ, 2 ГТ, 1 ГТ. На случаи возникновения

аварийных ситуаций имеются запасные трансформаторы, подключенные к ячейкам 18 и 31, которые с шин 110 кВ покрывают потребляемые ресурсы на собственные нужды электростанции. От ячеек 3, 5, 8, 13, 17, 19, 25, 28, 30, 33, 34, 41, 42, 43, 44 по ВЛ передается мощность к жителям города, крупным предприятиям и территории районных потребителей. Каждая ячейка имеет один выключатель, трансформатор тока, а также разъединителей, каждый из которых выполняет свою функцию. Посредством шиносоединительных выключателей осуществляется соединение двух рабочих шин в ячейках 9 и 35, связь с обходной системой шиной происходит при помощи обходных выключателей в ячейках под номерами 11 и 38

3.2 Состояние электрооборудования открытого распределительного устройства 110 кВ ТЭЦ ВАЗа

В ходе работы электрического оборудования имеет место его изнашивание со временем и потеря первоначальных качеств и параметров. Состояние технического объекта оценивается по моральному и физическому износу. Под физическим износом понимается изменение размеров, формы, массы технического объекта или состояния его поверхности вследствие остаточной деформации от постоянно действующих нагрузок либо из-за разрушения поверхностного слоя при трении [5].

Моральный износ – это устаревание исправного электрооборудования, дальнейшая эксплуатация которого нецелесообразна из-за создания нового, технически более совершенного или более экономичного электрооборудования аналогичного назначения [5].

3.2.1 Высоковольтные выключатели

Высоковольтный выключатель значителен одним из ключевых электроагрегов в электроустановках, он предназначен для коммутаций в электрической цепи в том или ином режиме, таком как длительная нагрузка, перегрузка, короткое замыкание, холостой ход, несинхронная работа. На

ОРУ 110 кВ воздушные выключатели марок ВВБМ – 110 Б, ВВН – 110 – 6, ВВУ – 110.

По способу гашения дуги воздушные выключатели относятся к дугогасящим устройствам газового дутья, в которых дуга гасится в струе сжатого воздуха, поступающего от компрессорных установок. Характеристики данного технического оборудования представлены в таблице под номером 1.

Таблица 1 – Общетехнические параметры воздушных выключателей

Наименование параметра	ВВН – 110 - 6	ВВБМ – 110 Б	ВВУ – 110
$U_{ном}, кВ$	110	110	110
$U_{наиб. раб}, кВ$	126	126	126
$I_{ном}, А$	2000	2000	2000
$I_{ном.откл}, кА$	31,5	35	40
$I_T, кА$	31,5	35	40
Предельный сквозной ток:			
Амплитудное значение, кА	80	90	102
Начальное эффективное значение, кА	31,5	35	40
$t_{вкл}, сек$	0,2	0,15	0,2
$t_{откл}, сек$	0,07	0,07	0,08
$P_{ном}, атм$	20	20	20

Также, помимо воздушных выключателей на открытом распределительном устройстве 110 кВ смонтированы элегазовые выключатели марки ВГТ-110 П*- 40/2500У1.

Принцип работы такого выключателя основан на гашении электрической дуги потоком газа (шестифтористой серы SF₆), который создается за счет перепада давления, обеспечиваемого автогенерацией, т.е. тепловой энергией дуги, а также поршневым устройством. Данный выключатель является достаточно надежным и имеет хороший эксплуатационный ресурс. Характеристики данного выключателя представлены в таблице под номером 2.

Таблица 2 – Общетехнические параметры элегазового выключателя

Наименование параметра	ВГТ-110
$U_{ном}, кВ$	110
$U_{наиб.раб}, кВ$	126
$I_{ном}, А$	2500
$I_{ном.откл}, кА$	40
Параметры сквозного тока КЗ:	
$i_{пр.с}, кА$	102
$I_T, кА$	40
$t_{терм}, сек$	3
$t_c, сек$	0,035
$t_{откл}, сек$	0,055 сек
$t_{вкл}, сек$	0,11 сек

3.2.2 Разъединители

Разъединитель – это коммутационный аппарат для напряжения выше 1000 В, изолирующий предварительно отключенную часть системы, электроустановки, отдельных аппаратов от смежных частей, находящихся под напряжением [7].

Разъединители с приводами предназначены для эксплуатации в электрических сетях переменного тока частоты 50Гц с номинальным напряжением 110 и 220 кВ для включения и отключения обесточенных участков электрической цепи, находящихся под напряжением, заземления отключенных участков электрической цепи при помощи заземлителей, а также отключения токов холостого хода трансформаторов, зарядных токов воздушных и кабельных линий [7].

Разъединителями нельзя отключать токи нагрузки, т.к. их контактная система не имеет дугогасительных устройств.

ОРУ - 110 кВ укомплектовано разъединителями четырех типов: РПД – 110-1600, РОНЗ - 110-2000, РЛНД - 110-1000, РЛНД - 110-600, подробные параметры которых приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Общетехнические параметры разъединителей

Марка разъединителя	$U_{ном}, кВ$	$I_{ном}, А$	Предельный сквозной ток		$I_{терм}, кА$	Параметры зазем. ножей	
			$i_0, кА$	$i_a, кА$		$i_a, кА$	$I_{терм}, кА$
РОНЗ- 110-2000	110	2000	46	80	25	50	7
РПД- 110-1600	110	1600	40	102	40	50	7
РЛНД- 110-1000	110	1000	31	80	15	50	7
РЛНД- 110-600	110	600	31	80	12	50	7

3.2.3 Трансформаторы тока

Трансформатор тока – устройство, позволяющее редуцировать значение первичного тока до такого, которое будет комфортно для работы средств измерения и устройств релейной защиты. Значение вторичного тока трансформатора тока является установленной величиной и составляет 1 или 5 А.

Открытое распределительное устройство 110 кВ (1, 2 сш) укомплектовано трансформаторами тока трех марок, презентрованными ниже:

- ТФЗМ – 110Б – трансформатор тока, наполненный маслом, с фарфоровой крышкой, вторичная обмотка которого имеет звеньевой тип;

- ТФНД – 110М – трансформатор тока наружной установки с фарфоровой изоляцией со вторичной обмоткой для питания дифференциальной защиты;

- ТРГ – 110-II-УХЛ1 – трансформатор тока с металлическим корпусом в верхней части, с изоляционной средой в виде шестифтористой серы (элегаза), или смеси SF₆ и CF₄ (тетрафторметан – 14).

Параметры трансформаторов тока, которыми укомплектовано открытое распределительное устройство приведены в таблице 4.

Таблица 4 Общетехнические параметры трансформаторов тока

Наименование параметра		ТФЗМ – 110Б	ТФНД – 110М	ТРГ – 110-П– УХЛ1
$I_{1ном}, A$		50-100; 75-150; 100-200; 150-300; 200-400; 300-600		800; 1000; 1200; 1500; 2000
$I_{2ном}, A$		5	5	5
$N_{обмоток}$	Защита	2	2	3
	Измерения	1	1	2
$I_T, кА$		28	28	63
$I_{эд}, кА$		126	126	120
Класс точности	Защита	5P	5P	5P
	Измерения	0,5	0,5	0,2

3.2.4 Трансформаторы напряжения

Трансформаторы напряжения выполняют функцию понижения напряжения до нормированного значения, что в свою очередь необходимо для удобства работы с измерительными приборами и аппаратами релейной защиты и автоматики. Стандартное принятое значение равно 100 и $100\sqrt{3}$ В.

ОРУ 110 кВ укомплектовано трансформаторами напряжения марки НАМИ – 110-УХЛ1 и НКФ-110-57. Параметры данного оборудования представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Общетехнические параметры трансформаторов напряжения

Наименование параметра	НКФ-110-57	НАМИ – 110-УХЛ1
$U_{1ном}, кВ$	$110\sqrt{3}$	$110\sqrt{3}$

Продолжение таблицы 5

$U_{2ном.осн}, кВ$	$0,1\sqrt{3}$	$0,1\sqrt{3}$
$U_{2ном.доп}, кВ$	0,1	0,1
$S_{2ном.осн}, В \cdot А,$ в классах точности: 0,2 0,5 1,0 3,0	200 400 600 1200	200 400 600 1200
$S_{2ном.доп}, В \cdot А,$ в классе точности: 3,0	600	1200
Допустимые величины, учитывая природные особенности - $h_{уст}, м$, над уровнем моря, не более - $T_{окр.ср}$	До 1000 от -45 до +45 °С	1000 от -60°С до +40°С
$V_{max.ветра}, м/с$ при отсутствии гололеда	40	40

Далее следует определить степень износа данных устройств и принять решение о возможности его ближайшей замены или модернизации. Оценка технической годности к эксплуатации базисного оборудования открытого распределительного устройства 110 кВ ТЭЦ ВАЗа презентованы в таблице 6.

Таблица 6 – Оценка технической годности к эксплуатации базисного оборудования

Наименование оборудования	Вид	Параметры ресурса эксплуатации		Дата установки оборудования	Текущее состояние
		Период между КР, г.	Срок службы, г.		
Высоковольтные выключатели (воздушные)	ВВН – 110 – 6; ВВБМ – 110М; ВВУ - 110	4-6	25	1968-1979	Нуждаются в замене
Высоковольтные выключатели (элегазовые)	ВГТ-110 П*-40/2500У1	17-21	40	2005-2013	Эксплуатационный ресурс не исчерпан
Разъединители	РОНЗ – 110-2000; РПД – 110-1600; РЛНД – 110-1000; РЛНД – 110-600	4-8	30	1968-1979	Нуждаются в замене
Трансформаторы тока	ТФЗМ – 110Б; ТФНД – 110М;	3-4	30	1968-1979	Нуждаются в замене
	ТРГ – 110-П-УХЛ1	13	40	2010	Эксплуатационный ресурс не исчерпан
Трансформаторы напряжения	НАМИ – 110-УХЛ1	3-5	30	2007-2008	Эксплуатационный ресурс не исчерпан
	НКФ-110-57	3-5	30	1969	Нуждаются в замене

На основе проведенного анализа принято решение о возможности замены в ближайшие сроки оборудования, которое исчерпало свой эксплуатационный ресурс. Это такие электрические аппараты, как высоковольтные выключатели марок ВВН-110-6, ВВБМ-110М, ВВУ-110; разъединители различных типов; трансформаторы тока марок ТФЗМ-110Б, ТФНД-110М; трансформаторов напряжения марки НКФ-110-57.

4 Расчет токов короткого замыкания открытого распределительного устройства 110 кВ (1, 2 сш)

4.1 Расчет начального значения периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в точке К1

Трехфазное КЗ подразумевает под собой вид аварийной ситуации, при которой происходит изменение параметров соответственно, неизменно (инвариантно) относительно друг друга. Схема замещения для расчета токов КЗ представлена в эквивалентной форме на рисунке 1.

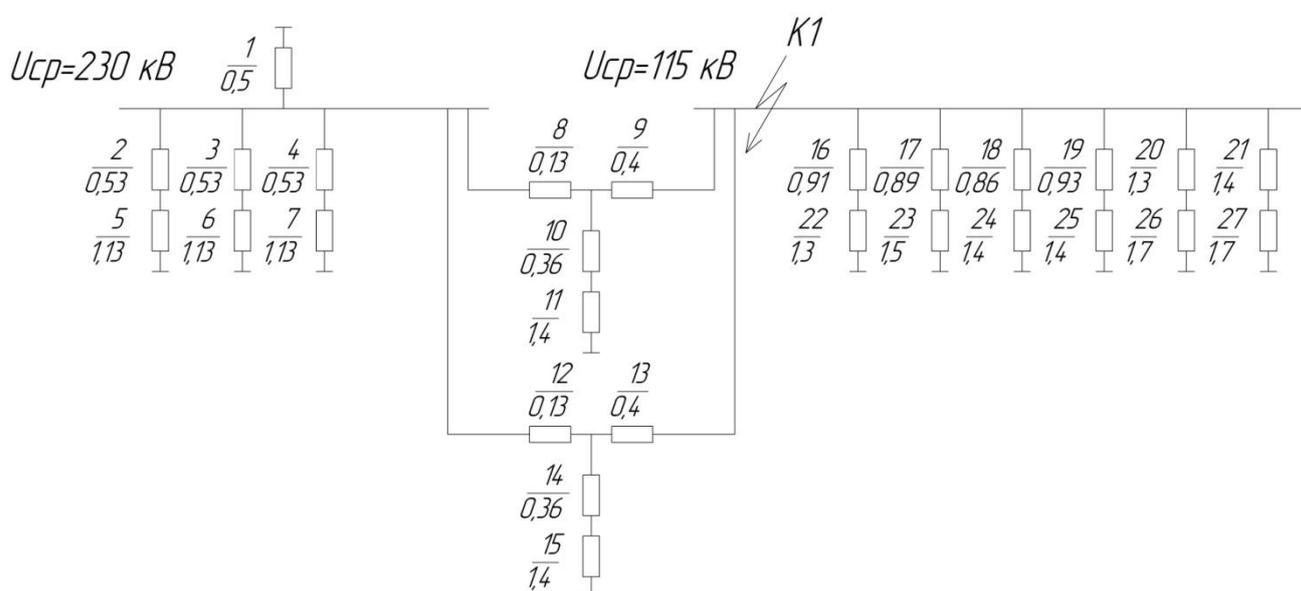
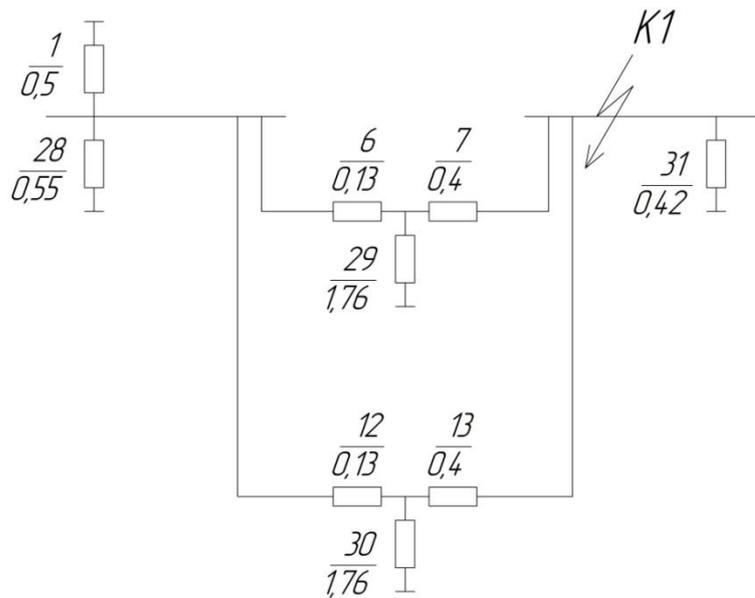
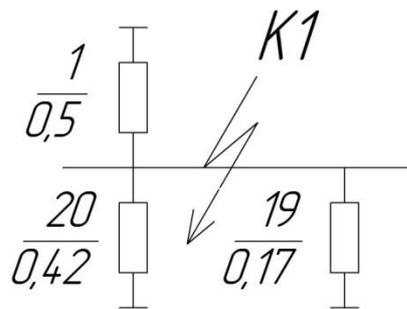


Рисунок 1 – Эквивалентная схема замещения прямой последовательности для расчета токов трехфазного и двухфазного короткого замыкания в точке К1

Для облегчения расчета эквивалентную схему необходимо преобразовать в упрощенную. После проведения данной операции имеем упрощенную схему замещения с путями ее преобразования на рисунке 2.



а



б

Рисунок 2 – Упрощенная эквивалентная схема замещения прямой последовательности (а, б)

Расчет производим в относительных единицах. Задаемся базисной мощностью $S_{\bar{o}} = 1000$ МВА. Мощность короткого замыкания $S_{кз} = 4640$ МВА

Расчет эквивалентных сопротивлений:

$$x_1 = x_{сис\tau} = x_{сис\tau} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{кз}} = 2,4 \cdot \frac{1000}{4640} = 0,5 ;$$

$$x_2 = x_3 = x_4 = \frac{U_{\kappa} \cdot S_{\bar{\sigma}}}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{10,7 \cdot 1000}{100 \cdot 200} = 0,53;$$

$$x_5 = x_6 = x_7 = x_{dНОМ}'' \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ}} = 0,213 \cdot \frac{1000}{200} = 1,13;$$

$$x_8 = x_{12} = \frac{0,5 \cdot (U_{BC} + U_{BH} - U_{CH})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ}} = \frac{0,5 \cdot (2,7 + 11,8 - 18,3)}{100} \cdot \frac{1000}{240} = 0,13;$$

$$x_9 = x_{13} = \frac{0,5 \cdot (U_{BC} + U_{CH} - U_{BH})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ}} = \frac{0,5 \cdot (2,7 + 18,3 - 11,8)}{100} \cdot \frac{1000}{240} = 0,4;$$

$$x_{10} = x_{14} = \frac{0,5 \cdot (U_{BH} + U_{CH} - U_{BC})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ}} = \frac{0,5 \cdot (1,8 + 18,3 - 12,7)}{100} \cdot \frac{1000}{240} = 0,36;$$

$$x_{11} = x_{15} = x_{24} = x_{25} = x_{dНОМ}'' \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ}} = 0,192 \cdot \frac{1000}{141,2} = 1,4;$$

$$x_{16} = \frac{U_{\kappa} \cdot S_{\bar{\sigma}}}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{11,37 \cdot 1000}{100 \cdot 125} = 0,91;$$

$$x_{17} = \frac{U_{\kappa} \cdot S_{\bar{\sigma}}}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{11,18 \cdot 1000}{100 \cdot 125} = 0,89;$$

$$x_{18} = \frac{U_{\kappa} \cdot S_{\bar{\sigma}}}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{10,75 \cdot 1000}{100 \cdot 125} = 0,86;$$

$$x_{19} = \frac{U_{\kappa} \cdot S_{\bar{\sigma}}}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{11,6 \cdot 1000}{100 \cdot 125} = 0,93;$$

$$x_{20} = \frac{U_{\kappa} \cdot S_{\bar{\sigma}}}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{10,23 \cdot 1000}{100 \cdot 80} = 1,3;$$

$$x_{21} = \frac{U_{\kappa} \cdot S_{\bar{\sigma}}}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{10,8 \cdot 1000}{100 \cdot 80} = 1,4;$$

$$x_{22} = x_{dНОМ}'' \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ}} = 0,189 \cdot \frac{1000}{142,35} = 1,3;$$

$$x_{23} = x_{dНОМ}'' \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ}} = 0,192 \cdot \frac{1000}{125} = 1,5;$$

$$x_{26} = x_{27} = x_{dНОМ}'' \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ}} = 0,14 \cdot \frac{1000}{82,4} = 1,7;$$

Итоговое сопротивление одинаковых модулей трансформатор – генератор:

$$x_{28} = \frac{x_1 + x_5}{3} = \frac{0,53 + 1,13}{3} = 0,55.$$

Итоговое сопротивление параллельно подключенных модулей трансформатор – генератор:

$$\begin{aligned} x_{31} &= \frac{1}{\frac{1}{x_{16} + x_{22}} + \frac{1}{x_{17} + x_{23}} + \frac{1}{x_{18} + x_{24}} + \frac{1}{x_{19} + x_{25}} + \frac{1}{x_{20} + x_{26}} + \frac{1}{x_{21} + x_{27}}} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{0,91 + 1,3} + \frac{1}{0,89 + 1,5} + \frac{1}{0,86 + 1,4} + \frac{1}{0,93 + 1,4} + \frac{1}{1,3 + 1,7} + \frac{1}{1,4 + 1,7}} = 0,42 \end{aligned}$$

Сопротивление двух параллельно подключенных автотрансформаторов (сопротивления НН автотрансформатора равноценны с сопротивлениями генераторов Г5, Г6 (x_{29})):

$$x_{32} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{x_8} + \frac{1}{x_9} + \frac{1}{x_{29}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{0,13} + \frac{1}{0,4} + \frac{1}{1,76}} = 0,046.$$

Итоговое сопротивление линии генераторов Г5, Г6, Г9, Г10, Г11 до точки К1:

$$x_{33} = x_{28} + x_{32} = 0,55 + 0,046 = 0,6.$$

Итоговая схема замещения для расчета токов симметричного короткого замыкания в точке К1 показана на рисунке 2. Операции по расчету токов короткого замыкания осуществлены в таблице 7.

Таблица 7 – Расчет токов короткого замыкания

Точка КЗ	К1		
Базисная мощность S_{σ} , МВА	1000		
Среднее напряжение U_{cp} , кВ	115		
1	2	3	4
Источники	система	Г5+Г6+Г9+Г10+Г11	Г1+Г2+Г3+Г4+Г7+Г8
Номинальная мощность источников $S_{ном}$, МВА	4640	$1412 \cdot 2 + 188,2 \cdot 3 = 847$	$82,4 \cdot 2 + 1412 \cdot 2 + 125 + 142,35 = 714,55$
Результирующее сопротивление $x_{рез}$, о.е.	0,5	0,6	0,42
Базисный ток $I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\sigma}}$, кА	$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\sigma}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5,02$		
Среднее значение E'' , о.е.	1,0	1,13	1,13
$I_{ПО}^{(3)} = \frac{E''}{x_{рез}} \cdot I_{\sigma}$, кА	$\frac{1,0}{0,5} \cdot 5,02 = 10,04$	$\frac{1,13}{0,6} \cdot 5,02 = 9,5$	$\frac{1,13}{0,42} \cdot 5,02 = 13,5$
$I_{ном.ист} = \frac{S_{ном.ист}}{\sqrt{3} \cdot U_{cp}}$, кА	$\frac{4640}{\sqrt{3} \cdot 115} = 23,3$	$\frac{847}{\sqrt{3} \cdot 115} = 4,3$	$\frac{714,55}{\sqrt{3} \cdot 115} = 3,6$
$\frac{I_{ПО}^{(3)}}{I_{ном.ист}}$	$\frac{10,04}{23,3} = 0,43$	$\frac{9,5}{4,3} = 2,2$	$\frac{13,5}{3,6} = 3,8$
$\tau = 0,01 + t_{с.в.откл.}$, с	0,01+0,08 = 0,09		
γ_{τ}	1	0,96	0,98
$I_{П\tau}^{(3)} = \gamma_{\tau} \cdot I_{ПО}^{(3)}$, кА	$1 \cdot 10,04 = 10,04$	$0,96 \cdot 9,5 = 9,12$	$0,98 \cdot 13,5 = 13,23$
$k_{y\delta}$	1,85	1,967	1,967

T_a	0,06	0,3	0,3
$i_{y0}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot k_{y0} \cdot I_{НО}^{(3)}$, кА	$\sqrt{2} \cdot 1,85 \cdot 10,04 = 25,3$	$\sqrt{2} \cdot 1,967 \cdot 9,5 = 26,4$	$\sqrt{2} \cdot 1,967 \cdot 13,5 = 37,6$
$e^{-\frac{\tau}{T_a}}$	$e^{-\frac{0,09}{0,06}} = 0,22$	$e^{-\frac{0,09}{0,3}} = 0,74$	$e^{-\frac{0,09}{0,3}} = 0,74$
$i_{a\tau}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot I_{НО}^{(3)} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_a}}$, кА	$\sqrt{2} \cdot 10,04 \cdot 0,22 = 3,1$	$\sqrt{2} \cdot 9,5 \cdot 0,74 = 9,9$	$\sqrt{2} \cdot 13,5 \cdot 0,74 = 14,1$

Конечные итоги расчетов токов симметричного (трехфазного) короткого замыкания представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты расчетов тока трехфазного КЗ

Точка КЗ	U_{cp} , кВ	Источник	Токи трехфазного КЗ, кА				
			$I_{НО}^{(3)}$	$I_{П\tau}^{(3)}$	$i_{a\tau}^{(3)}$	$i_{y0}^{(3)}$	$\sqrt{2} \cdot I_{П\tau}^{(3)} + i_{a\tau}^{(3)}$
К1	115	Система	10,04	10,04	3,1	25,3	38,9
		Г5+Г6+Г9+Г10+Г11	9,5	9,12	9,9	26,4	22,8
		Г1+Г2+Г3+Г4+Г7	13,5	13,23	14,1	37,6	32,8

4.2 Расчет начального значения периодической составляющей тока двухфазного короткого замыкания в точке К1

Двухфазное КЗ подразумевает под собой вид аварийной ситуации, при которой происходит изменение параметров относительно друг друга несимметрично. Для вычисления начальной существующей величины периодической составляющей тока при двухфазном коротком замыкании в точке К1 утверждаем, что $x_{1pez} = x_{2pez}$. Тем самым получаем отношение между токами двух- и трехфазного коротких замыканий:

$$I_{НО}^{(2)} = 0,87 \cdot I_{НО}^{(3)}, \text{ кА.}$$

Посему, в точке К1 получаем:

$$I_{\text{НО}}^{(2)} = 0,87 \cdot 33,04 = 28,7 \text{ кА.}$$

4.3 Расчет начального значения периодической составляющей однофазного короткого замыкания в точке К1

Короткое замыкание на одной фазе подразумевает под собой вид аварийной ситуации, при которой происходит изменение параметров относительно друг друга несимметрично. Перед тем как перейти к расчету, нужно отобразить необходимые схемы замещения. Схема прямой последовательности не имеет отличительных признаков со схемой замещения для трехфазного КЗ. Схема представлена на рисунке под номером 3.

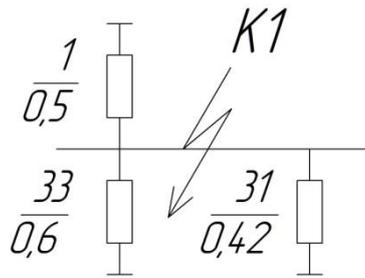


Рисунок 3 – Схема замещения прямой последовательности для расчета токов однофазного короткого замыкания

Среднее значение E'' , о.е.:

$$E_c'' = 1,0 \quad E_{A1}'' = 1,13 \quad E_{A2}'' = 1,13.$$

Произведем расчет итогового сопротивления схемы замещения прямой последовательности в точке К1:

$$x_{\Sigma 1} = \frac{1}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_{31}} + \frac{1}{x_{33}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,5} + \frac{1}{0,42} + \frac{1}{0,6}} = 0,17.$$

ЭДС для такой группы:

$$E_3 = x_{\Sigma 1} \cdot \left(\frac{E_c''}{x_1} + \frac{E_{Г1}''}{x_{33}} + \frac{E_{Г2}''}{x_{31}} \right) = 0,17 \cdot \left(\frac{1,0}{0,5} + \frac{1,13}{0,6} + \frac{1,13}{0,42} \right) = 1,1.$$

Схема обратной последовательности практически идентична со схемой прямой последовательности. Ключевым отличием является отсутствие всех источников электродвижущей силы. На рисунке под номером 4 презентована схема обратной последовательности.

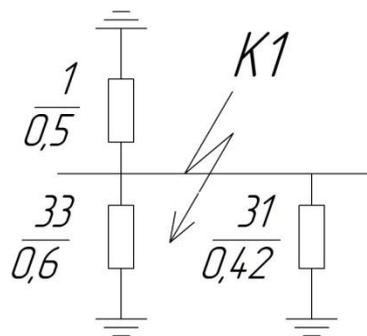


Рисунок 4 – Схема замещения обратной последовательности для расчета токов однофазного КЗ в точке К1

Итоговое сопротивление схемы замещения обратной последовательности утверждаем сходное итоговому сопротивлению схемы замещения прямой последовательности:

$$x_{\Sigma 1} = x_{\Sigma 2} = 0,17.$$

Схема замещения нулевой последовательности группируется с контролем метода соединения фаз образующих ее составляющих. Таким

образом, автотрансформатор и система замещается этими же критериями, что и в прочих моделях. Схема замещения нулевой последовательности показана на рисунке под номером 5.

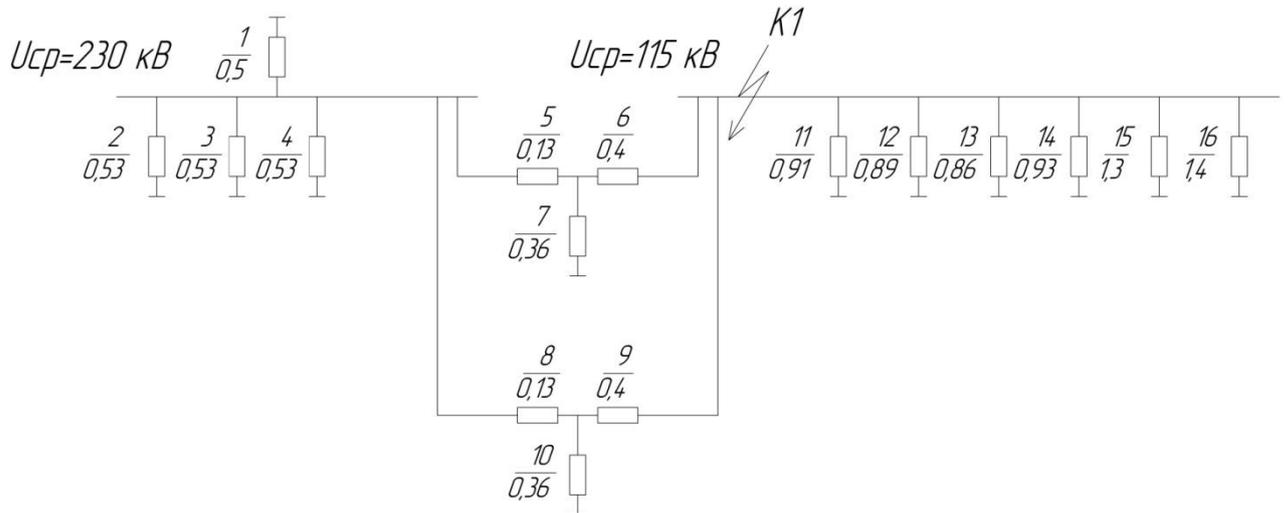
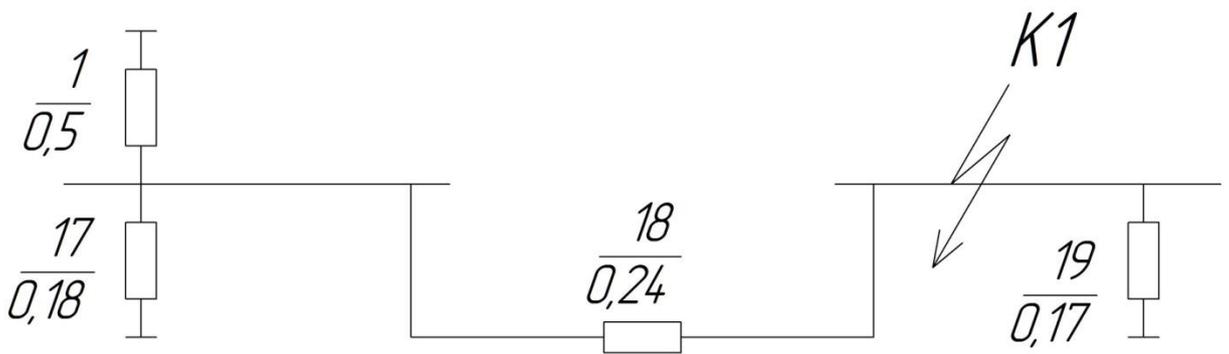
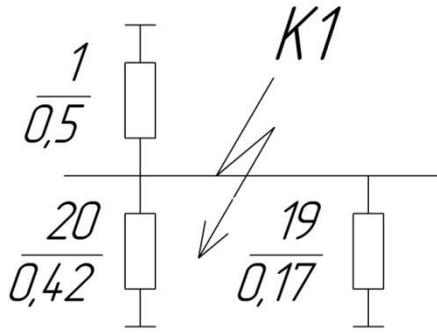


Рисунок 5 – Схема замещения нулевой последовательности для расчета токов однофазного короткого замыкания в точке К1

Для облегчения расчета схему необходимо преобразовать в упрощенную. После проведения данной операции имеем упрощенную схему замещения с путями ее преобразования на рисунке под номером 6.



а



б

Рисунок 6 – Упрощенная схема замещения нулевой последовательности (а, б)

Сопротивление нулевой последовательности линии генераторов Г1, Г2, Г3:

$$x_{17} = \frac{x_2}{3} = \frac{x_3}{3} = \frac{x_4}{3} = \frac{0,53}{3} = 0,18.$$

Сопротивление нулевой последовательности автотрансформаторов:

$$x_{18} = \frac{1}{2} \cdot \left(x_5 + \frac{x_6 \cdot x_7}{x_6 + x_7} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(0,3 + \frac{0,4 \cdot 0,36}{0,4 + 0,36} \right) = 0,24.$$

Итоговое сопротивление схемы замещения нулевой последовательности:

$$x_{0\Sigma} = x_1 + \frac{x_{20} \cdot x_{19}}{x_{20} + x_{19}} = 0,5 + \frac{0,42 \cdot 0,17}{0,42 + 0,17} = 0,1.$$

Ток прямой последовательности того или иного КЗ, при котором параметры изменяются несимметрично, возможно вычислить как ток при

трехфазном КЗ в точке, электрически удаленной от реальной точки КЗ на добавочное сопротивление $\Delta X^{(n)}$:

Для однофазного КЗ: $\Delta X^{(1)} = X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0} = 0,17 + 0,1 = 0,27$;

$$I_{K1}^{(1)} = \frac{E_{\mathcal{E}}}{X_{\Sigma 1} + \Delta X^{(1)}} = \frac{1,1}{0,17 + 0,27} = 2,5 \text{ кА.}$$

Фазный ток в точке КЗ аварийной фазы вычисляется посредством произведения тока особой фазы А и коэффициента $m^{(n)}$.

Для однофазного КЗ: $m^{(1)} = 3$.

$$I_K^{(1)} = I_{K1}^{(1)} \cdot m^{(1)} = 2,5 \cdot 3 = 7,5 \text{ кА.}$$

В именованных единицах:

$$I_{\kappa A}^{(1)} = I_K^{(1)} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{\sqrt{3} \cdot U_{cp}} = 7,5 \cdot \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 37,7 \text{ кА.}$$

Ударный ток в точке КЗ:

$$i_{y\partial}^{(1)} = \sqrt{2} \cdot k_{y\partial} \cdot I_{\Pi O}^{(1)} = \sqrt{2} \cdot 1,85 \cdot 37,7 = 98,6 \text{ кА.}$$

где $k_{y\partial}$ - ударный коэффициент.

Апериодическая составляющая тока КЗ в момент времени $t = \tau$:

$$i_{a\tau}^{(1)} = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi O}^{(1)} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 37,7 \cdot e^{-\frac{0,09}{0,06}} = 11,8 \text{ кА,}$$

где τ - момент с которого начинается расхождение дугогасительных контактов выключателя; T_a - постоянная времени затухания апериодической составляющей.

Тепловой импульс тока КЗ (интеграл Джоуля при КЗ):

$$B_k = I_{n0}^2 \cdot (\tau_{откл} + T_a) = 37,7^2 \cdot (0,08 + 0,06) = 198,98 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Полученные данные расчета токов однофазного короткого замыкания объединяем в таблицу 9.

Таблица 9 – Итоги расчета токов однофазного КЗ

Точка КЗ	U_{cp} , кВ	$X_{1\Sigma}$	$X_{2\Sigma}$	$X_{0\Sigma}$	$I_{K1}^{(1)}$	$I_K^{(1)}$	$I_{KA}^{(1)}$
К1	115	0,17	0,17	0,1	2,5	7,5	37,7

По полученным расчетам аварийных режимов, а именно КЗ следует, что на анализируемом сегменте ПАО «Т Плюс» ТЭЦ ВАЗа определен самый опасный режим однофазного КЗ. Для выбора электрооборудования необходимо задаваться наивысшими значениями расчетного тока короткого замыкания. Такой выбор обусловлен, тем что выбранное оборудование должно корректно работать и выдерживать такие тяжелые аварийные условия.

5 Выбор и проверка электрооборудования для открытого распределительного устройства 110 кВ (1, 2 ш)

5.1 Высоковольтный выключатель

Электрические агрегаты обязаны обеспечивать надежную работу тех или иных режимах работы, которая в свою очередь зависит от правильного его подбора по таким параметрам как номинальный ток, напряжение, коэффициент трансформации, класс точности и т.д. [8].

Воздушные выключатели марок ВВЕМ – 110 Б, ВВН – 110 – 6, ВВУ – 110, которыми укомплектовано ОРУ 110 кВ ТЭЦ ВАЗа подлежат замене на элегазовые выключатели, в следствии своего морального и физического износа.

Элегазовый выключатель – является актуальным высоковольтным аппаратом. В камере, где происходит гашение дуги, применяется шестифтористая сера (SF₆, элегаз), имеющая достаточную электрическую прочность и прекрасные характерные возможности для подавления электрической дуги. Аппараты такого рода укомплектованы механизмом с автопневматическим дутьем.

Элегазовые выключатели, благодаря своим подавляющим большинством достоинств по сравнению с масляными и воздушными выключателями, получили повсеместное распространение. На ОРУ 110 кВ некоторые из ячеек частично укомплектованы элегазовыми выключателями ВГТ-110 П*- 40/2500У1 производства Уралэлектротяжмаш [ОАО], г. Екатеринбург. В соответствии с принципом технической унификации принимаем данный тип элегазового выключателя на замену воздушных. Технические характеристики элегазового выключателя ВГТ-110 П*- 40/2500У1 представим в таблице 10. Общий вид для визуального понимания конструкции элегазового выключателя показан на рисунке 7.

Таблица 10 – Технические характеристики элегазового выключателя ВГТ-110 П*- 40/2500У1

Наименование параметра	ВГТ-110 П*- 40/2500У1
$U_{ном}, кВ$	110
$U_{наиб.раб}, кВ$	126
$I_{ном}, А$	2500
$I_{ном.откл}, кА$	40
$I_T, кА$	40
$t_c, сек$	0,035
$t_{откл}, сек$	0,055
$t_{вкл}, сек$	0,1
$m, кг$	1650
Эксплуатационный ресурс, лет	40
Срок службы до первого ремонта, лет	25

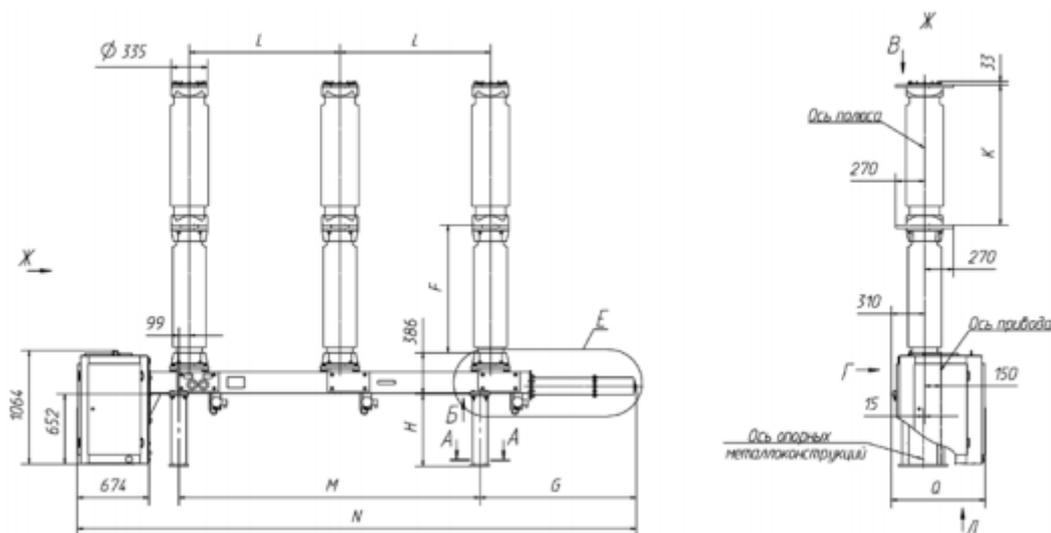


Рисунок 7 – Общий вид элегазового выключателя ВГТ-110 П*- 40/2500У1

Выбранное оборудование непосредственно необходимо проверять на допустимость его установки. Проверка выключателей для укомплектования ими открытого распределительного устройства 110 кВ ТЭЦ ВАЗа выполняем по первостепенным параметрам:

1. Напряжению:

$$U_{ном} \geq U_{сет.ном};$$

$$U_{ном} = 110 \text{ кВ};$$

$$U_{сет.ном} = 110 \text{ кВ};$$

$$110 \text{ кВ} = 110 \text{ кВ}.$$

2. Длительному току:

В выпускной квалификационной работе принято во внимание усовершенствование ОРУ 110 кВ генерирующего объекта и данный факт следует брать во внимание. В следствии того, что потребность к выработке большего количества электроэнергии в мире и России возрастает, возрастают и рабочие токи протекающие в линиях. Заменяемые воздушные выключатели рассчитаны на рабочие токи 2000А. Поэтому целесообразно подобран выключатель с рабочим током, значением в 2500А.

3. Симметричному току отключения:

$$I_{откл.ном} \geq I_{нт}$$

$$I_{откл.ном} = 40 \text{ кА}$$

$$I_{нт} = 37,7 \text{ кА}$$

$$40 \text{ кА} > 37,7 \text{ кА}.$$

4. Стойкость к электродинамическим напряжениям:

$$i_{пр.скв} \geq i_{уд};$$

$$102 \text{ кА} > 98,6 \text{ кА},$$

5. Стойкость к термическому воздействию:

$$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} \geq B_k;$$

$$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} = 40 \cdot 3 = 4800 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$$4800 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} > 198,98 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

На основании выше проведенной проверки выключателя марки ВГТ-110 П*- 40/2500У1 подведен итог о допустимости укомплектования им ячеек открытого распределительного устройства 110 кВ (1, 2 сш) ТЭЦ ВАЗа, исходя из того что все электротехнические характеристики соответствуют условиям контроля по выбору оборудования.

5.2 Разъединитель

Ячейки ОРУ 110 кВ укомплектованы несколькими видами разъединителей, таких марок как РПД – 110-1600, РОНЗ – 110-2000, РЛНД – 110-1000, РЛНД – 110-600. Разъединители сделаны с отдельными полюсами (некоторые из них установлены пополюсно, а некоторые связаны между собой тягами в виде труб в трехполюсную установку). В данные виды разъединителей не включены электроприводы, поэтому для выполнения коммутационных операций, человеку необходимо самому выполнять эти действия, прибегая к физической тяге. Такие методы представляют собой некую опасность для оперативного персонала, так как непосредственно приходится подходить к оборудованию, и не исключен разрыв фарфоровой изоляции полюсов при коммутации, что представляет угрозу здоровья для человека. Вследствие того, что данные разъединители исчерпали свой ресурс по эксплуатации, необходим их замена. К укомплектованию открытого распределительного устройства 110 кВ (1, 2 сш) предлагаются

нижеупомянутые трехполюсные разъединители с электроприводом и полимерной изоляцией:

- Разъединитель SGF 123n завода – изготовителя ЗАО «АББ – УЭТМ»
- Разъединитель РГП СЭЩ 110 кВ.

Имеет место их последующее сравнение для выбора наиболее экономически и технически подходящего вида. Сравнительные характеристики данных разъединителей показаны в таблице 11.

Таблица 11 – Анализ электротехнических параметров разъединителя SGF 123n и разъединителя РГП СЭЩ 110 кВ.

Характеристика	SGF 123n	РГП СЭЩ 110 кВ
$U_{ном}, кВ$	110	110
$U_{наиб.раб}, кВ$	126	126
$I_{ном}, А$	1600(2500)	1250(2000)
$I_T, кА$	40	40
$I_{эд}, кА$	100	100
Допустимый промежуток времени воздействия кратковременного тока короткого замыкания, сек		
- для главных ножей	3	3
- для заземляющих ножей	1	1
Стоимость, руб.	320 000	250 000

К установке принимаем разъединитель РГП СЭЩ 110 кВ, исходя из его выгоды с экономической точки зрения. Что же касается технических параметров, то их расхождение минимальны. Общий вид трехполюсного разъединителя РГП СЭЩ 110 кВ представлен на рисунке 8.

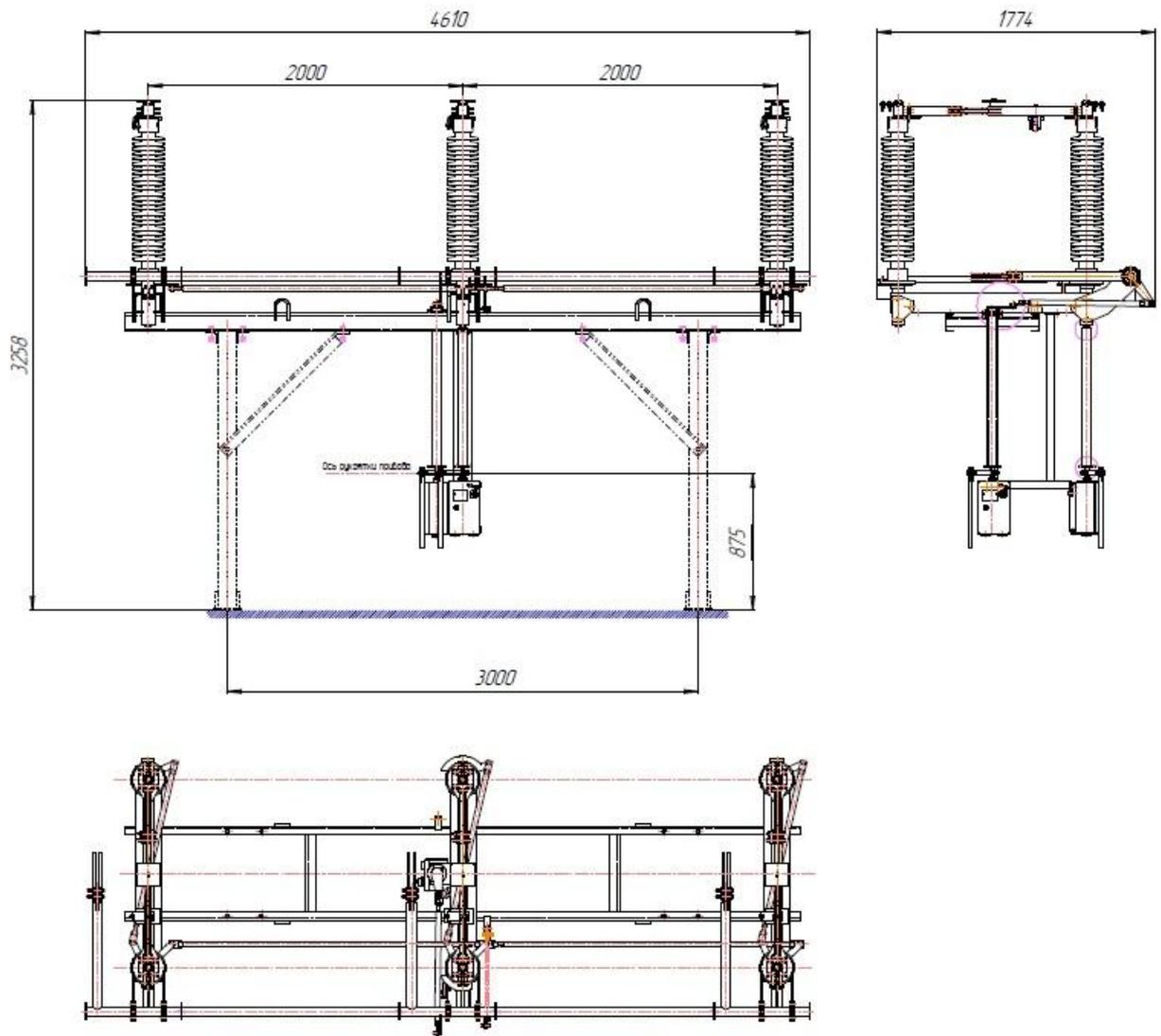


Рисунок 8 – Общий вид трехполюсного разъединителя РГП СЭЩ 110 кВ

Выбранное оборудование непосредственно необходимо проверить на допустимость его установки. Проверка разъединителей для укомплектования ими открытого распределительного устройства 110 кВ ТЭЦ ВАЗа выполняем по первостепенным параметрам:

1. Напряжению:

$$U_{ном} \geq U_{сет.ном};$$

$$110 \text{ кВ} = 110 \text{ кВ}.$$

2. Длительному току:

К монтаживанию принимаются разъединители с рабочим током 2000А.

3. Стойкость к электродинамическим напряжениям:

$$i_{дин} \geq i_{уд};$$

$$100 \text{ кА} > 98,6 \text{ кА},$$

где $i_{дин}$ - наибольший пик (ток электродинамической стойкости).

4. Стойкость к термическому воздействию:

$$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} \geq B_k;$$

$$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} = 40^2 \cdot 3 = 4800 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$$4800 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} > 198,98 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

На основании выше проведенной проверки разъединителя марки РГП СЭЩ 110 кВ подведен итог о допустимости укомплектования им ячеек открытого распределительного устройства 110 кВ (1, 2 сш) ТЭЦ ВАЗа, исходя из того что все электротехнические характеристики соответствуют техусловиям контроля по выбору оборудования.

5.3 Трансформатор тока

Ячейки открытого распределительного устройства 110 кВ укомплектованы несколькими видами масляных трансформаторов тока, необходимых к замене, таких марок как ТФЗМ – 110Б, ТФНД – 110М. Однако некоторые ячейки также укомплектованы пригодными к эксплуатации элегазовыми трансформаторами тока ТРГ – 110-II–УХЛ1. В соответствии с принципом технической унификации принимаем данный тип элегазового трансформатора тока на замену масляных. Технические характеристики

элегазового трансформатора тока ТРГ – 110-II–УХЛ1 представим в таблице 12. Общий вид для визуального понимания конструкции элегазового трансформатора тока показан на рисунке 9.

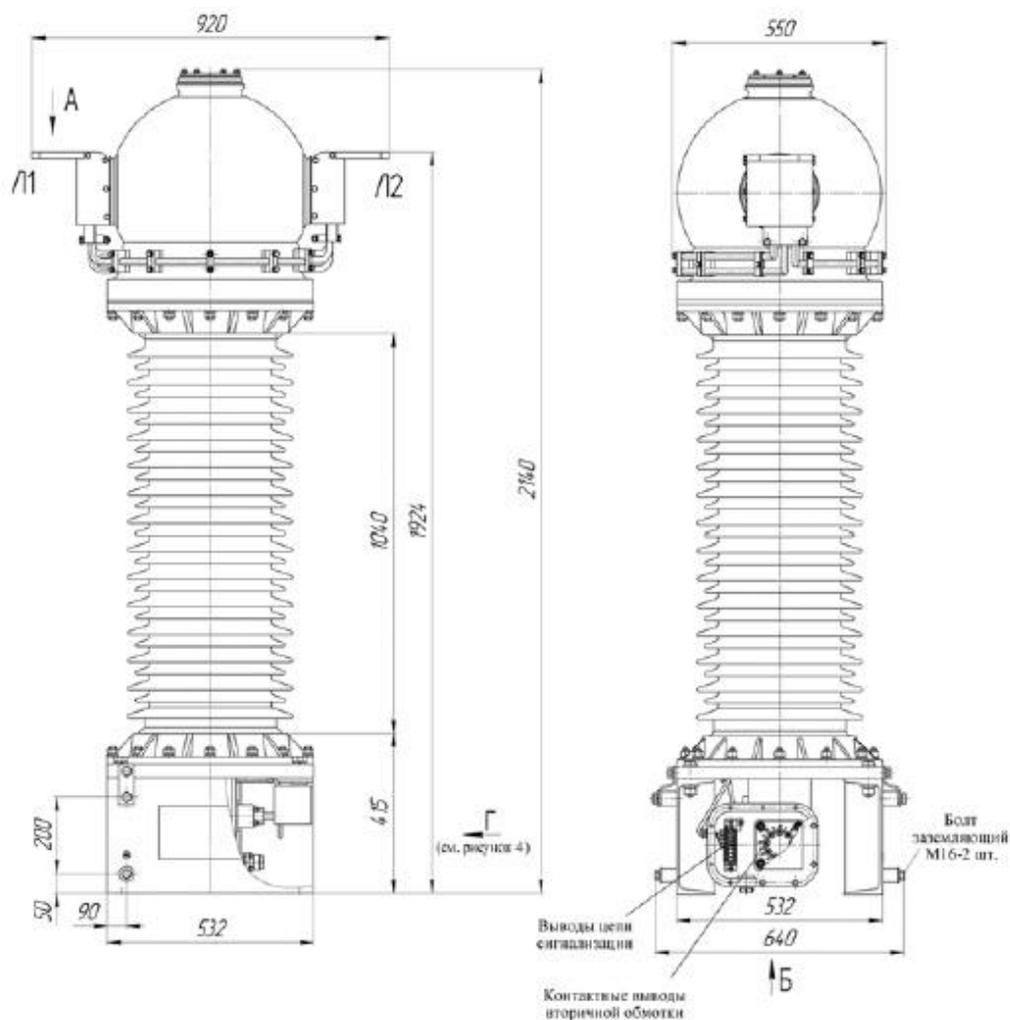


Рисунок 9 – Общий вид элегазового трансформатора тока ТРГ – 110-II–УХЛ1

Также, стоит отметить, что данный трансформатор тока возможно установить совместно с предложенным элегазовым выключателем ВГТ-110 II*- 40/2500У1 на заводской конструкции с покрытием горячим цинком. Несомненно, это упрощает установку оборудования, в связи с ненужностью сооружения дополнительных вспомогательных конструкций. Конструкция данного вида установки представлена на рисунке 10.

Таблица 12 – Электротехнические параметры элегазового трансформатора тока

Характеристика	ТРГ – 110-II-УХЛ1
$U_{ном}, кВ$	110
$U_{наиб. раб}, кВ$	126
$I_{1ном}, А$	750 – 1500
$f_{ном}, Гц$	50
$I_{2ном}, А$	1
$n_{2обм}$	5
$I_T, кА$	63
$I_{эд}, кА$	120
Класс точности	0,2S/0,2/5P/5P/5P

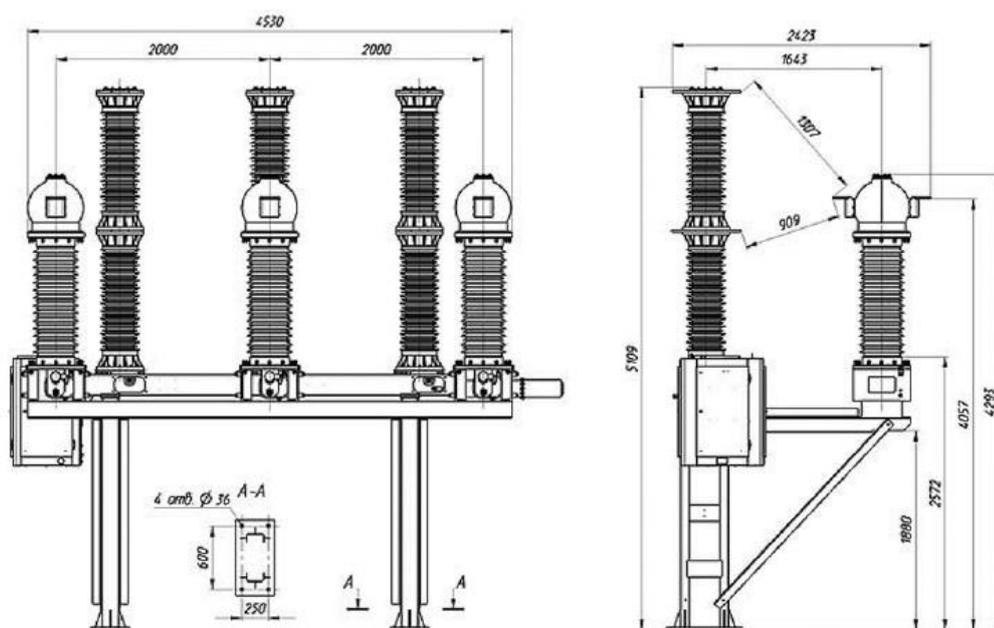


Рисунок 10 – Общий вид совместной установки элегазового трансформатора тока

Выбранное оборудование непосредственно необходимо проверять на допустимость его установки. Проверка трансформатора тока для укомплектования ими открытого распределительного устройства 110 кВ ТЭЦ ВАЗа выполняем по первостепенным параметрам:

1. Напряжению:

$$U_{ном} \geq U_{сет.ном}$$

$$110 \text{ кВ} = 110 \text{ кВ}$$

2. Длительному току:

Принимаем к укомплектованию элегазовые трансформаторы тока с током первичной обмотки 1500А.

3. Стойкость к электродинамическим напряжениям:

$$i_{дин} \geq i_{уд};$$

$$120 \text{ кА} > 98,6 \text{ кА}.$$

4. Стойкость к термическому воздействию:

$$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} \geq B_k;$$

$$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} = 63^2 \cdot 3 = 11907 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$$11907 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} > 198,98 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

5. Нагрузке на вторичную обмотку:

$$Z_2 \leq Z_{2ном},$$

где Z_2 - нагрузка вторичной обмотки элегазового трансформатора тока;
 $Z_{2ном}$ - номинальная возможная нагрузка вторичной обмотки элегазового трансформатора тока в намеченном классе точности ($Z_{2ном} = 30 \text{ Ом}$).

Для снятия основных электрических параметров электрооборудования на открытом распредустройстве 110 кВ используются нижеследующие контрольно – измерительные устройства: амперметр, ваттметр, варметр, частотомер, счетчики активной и реактивной энергии. Параметры фиксирующих устройств приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Параметры фиксирующих устройств

№ п/п	Устройство	Тип	$S_{приб}$, В·А
1	Амперметр	Э - 351	0,5
2	Счетчик активной энергии	СА4У – И672М	2,5
3	Счетчик реактивной энергии	СР4У – И673М	2,5
4	Ваттметр	Д - 335	2
5	Варметр	Н - 395	2
6	Частотомер	Э352	3
	Итого		12,5

$$Z_2 \approx r_2;$$

$$r_2 = r_{приб} + r_{пр} + r_k,$$

где $r_{приб}$ - сопротивление фиксирующих устройств;

$r_{пр}$ - сопротивление проводов;

r_k - сопротивление контактов.

$$r_{приб} + r_{пр} + r_k \leq Z_{2ном};$$

$$r_{np} \leq Z_{2ном} - r_{приб} - r_k;$$

$$r_{приб} = \frac{S_{приб}}{I_2^2} = \frac{12,5}{1^2} = 12,5 \text{ Ом.}$$

где $S_{приб}$ - мощность, используемая устройствами; I_2 - номинальный ток устройства.

Исходя из того, что к трансформатору напряжения подключено достаточно крупное количество фиксирующих устройств, утверждаем сопротивление контактов $r_k = 0,1 \text{ Ом}$.

$$r_{np} = Z_{2ном} - r_{приб} - r_k = 30 - 12,5 - 0,1 = 17,4 \text{ Ом.}$$

Протяженность контактных слаботочных кабелей утверждаем в значении 100 м с медными жилами. Произведем расчет сечения:

$$q = \frac{\rho \cdot l_{расч}}{r_{np}} = \frac{0,0175 \cdot 100}{17,4} = 0,1 \text{ мм}^2.$$

Утверждаем стандартизированное сечение 2,5 мм².

На основании выше проведенной проверки трансформатора тока марки ТРГ – 110-П–УХЛ1 подведен итог о допустимости укомплектования им ячеек открытого распределительного устройства 110 кВ (1, 2 сш) ТЭЦ ВАЗа, исходя из того что все электротехнические характеристики соответствуют техусловиям контроля по выбору оборудования.

5.4 Трансформатор напряжения

Ячейки открытого распределительного устройства 110 кВ укомплектованы трансформаторами напряжения, необходимые к замене, марки НКФ-110-57. Однако некоторые ячейки также укомплектованы пригодными к

эксплуатации антирезонансными масляными трансформаторами напряжения НАМИ – 110-УХЛ1. В соответствии с принципом технической унификации принимаем данный тип антирезонансного трансформатора напряжения на замену трансформаторов напряжения НКФ-110-57. Технические характеристики трансформатора напряжения НАМИ – 110-УХЛ1 представим в таблице 14. Габаритный чертеж для визуального понимания конструкции антирезонансного масляного трансформатора напряжения показан на рисунке 11.

Таблица 14 - Электротехнические параметры трансформатора напряжения

Наименование характеристики	НАМИ – 110-УХЛ1
$U_{1ном}, кВ$	$110\sqrt{3}$
$U_{2ном.осн}, кВ$	$0,1\sqrt{3}$
$U_{2ном.доп}, кВ$	0,1
$S_{2ном.осн}, В \cdot А,$ в классах точности: 0,2 0,5 1,0 3,0	200 400 600
$S_{2ном.доп}, В \cdot А,$ в классе точности: 3,0	1200
Допустимые величины, учитывая природные особенности - $h_{уст}, м$, над уровнем моря, не более - $T_{окр.ср}$	1000 от -60°C до +40°C

$V_{max.ветра}, м/с$ при отсутствии гололеда	40
--	----

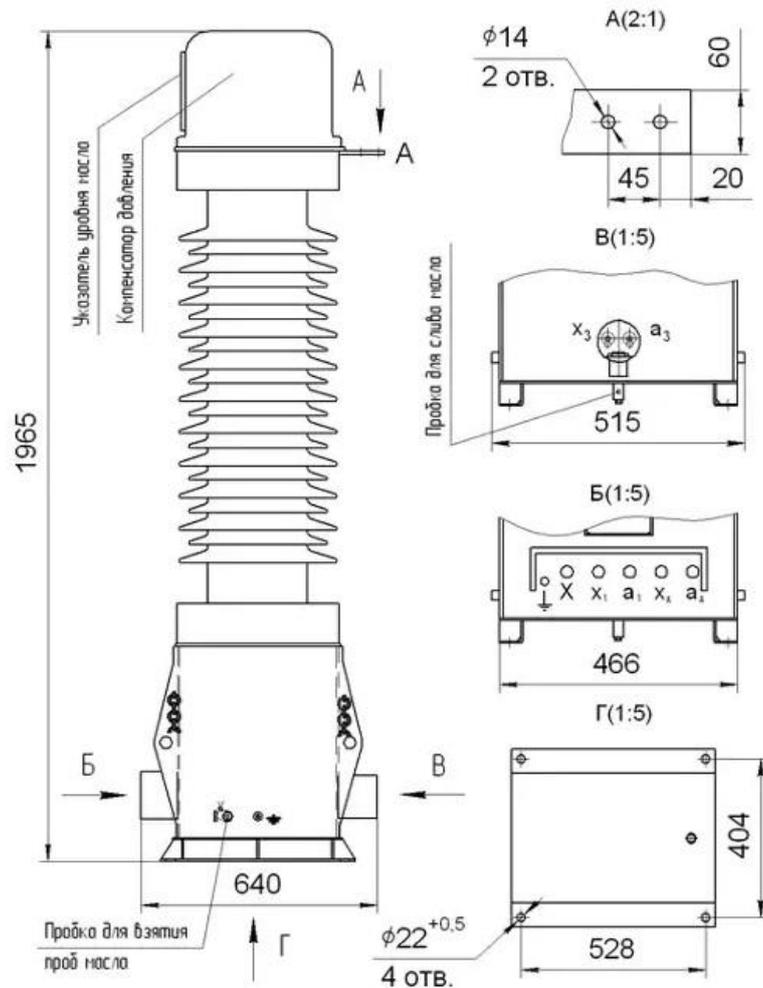


Рисунок 11 – Габаритный чертеж трансформатора напряжения НАМИ – 110-УХЛ1

Выбранное оборудование непосредственно необходимо проверять на допустимость его установки на открытое распределительное устройство 110 кВ. В противном случае, неправильный подбор оборудования может привести к аварийным ситуациям, которые повлекут за собой неприятные последствия. Проверка трансформатора напряжения для укомплектования ими открытого распределительного устройства 110 кВ ТЭЦ ВАЗа выполняем по первостепенным параметрам:

1. Напряжению:

$$U_{ном} \geq U_{сет.ном}$$
$$110 \text{ кВ} = 110 \text{ кВ}$$

2. Нагрузке на вторичную обмотку:

$$S_2 \leq S_{2ном},$$

где S_2 - нагрузка вторичной обмотки трансформатора напряжения;
 $S_{2ном}$ - номинальная возможная нагрузка вторичной обмотки антирезонансного трансформатора напряжения в намеченном классе точности ($S_{2ном} = 400 \text{ В} \cdot \text{А}$).

Для снятия основных электрических параметров электрооборудования на открытом распредустройстве 110 кВ используются нижеследующие контрольно – измерительные устройства, подключенные к трансформаторам напряжения: вольтметр, вольтметр фазный, фазометр, частотмер, счетчики энергии. Параметры фиксирующих устройств приведены в таблице 15.

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{\left(\sum S_{приб} \cdot \cos\varphi\right)^2 + \left(\sum S_{приб} \cdot \sin\varphi\right)^2} =$$
$$= \sqrt{P_{приб}^2 + Q_{приб}^2} = \sqrt{5,52^2 + 3,7^2} = 6,6 \text{ В} \cdot \text{А}$$

$$S_2 \leq S_{2ном};$$

$$6,6 \text{ В} \cdot \text{А} < 400 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Таким образом, принятый трансформатор напряжения, марки НАМИ – 110-УХЛ1 допускается к работе в выбранном классе точности.

Таблица 15 - Параметры фиксирующих устройств

Устройство	Типы устройств	Потребляемая мощность одной катушки, В·А	Число катушек	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	Число устройств	Общая потребляемая мощность	
							P , Вт	Q , вар
Вольтметр	Э - 351	2,0	1	1	0	1	2	-
Вольтметр фазный	3 - 377	2,0	1	1	0	1	2	-
Счетчик активной энергии	САЭ - 681	2,0	2	0,38	0,925	1	1,52	3,7
Итого							5,52	3,7

На основании выше проведенной проверки антирезонансного масляного трансформатора напряжения марки НАМИ – 110-УХЛ1 подведен итог о допустимости укомплектования им открытого распределительного устройства 110 кВ ТЭЦ ВАЗа, исходя из того что все электротехнические характеристики соответствуют техусловиям контроля по выбору оборудования.

6 Применение синхронных измерений для актуализации параметров сети

6.1 Общие положения

Усложняющиеся условия функционирования электроэнергетических систем (ЭЭС) определяют основные современные направления развития и совершенствования систем и средств мониторинга режимов работы ЭЭС. Одним из инструментов повышения эффективности управления режимами работы являются технологии WAMS (Wide Area Measurement System), в основу которых положен принцип синхронного измерения векторных параметров электрического режима.

Технология векторного измерения параметров режима электроэнергетической системы (ЭЭС) впервые начала внедряться как подсистема информационного обеспечения управления режимами ЭЭС в конце 80-х годов прошлого столетия, но наиболее значительный рост количества установленных PMU (Phasor Measurement Unit) и реализованных с их использованием систем прослеживается в последние 10 лет. Как отмечается в различных публикациях, современные тенденции в данной области заключаются в использовании векторных измерений для решения задач электроэнергетики в реальном времени.

Для технологии векторных измерений, как и для любой другой новой технологии, важным этапом развития является ее переход из стадии научной разработки, пилотного проекта, в состояние отработанного, стандартизованного решения, готового для широкого использования.

Представляется, что именно доступность и распространенность данной технологии будут определять наиболее интенсивный период ее развития. Немаловажную роль здесь может играть образовательная составляющая. Примечательно, что векторная форма представления электрических параметров является эффективным инструментом изучения наиболее сложных вопросов электроэнергетики. Поэтому наглядность и простота интерпретации результатов векторных измерений, позволяют

использовать их потенциал, как в инженерных целях, так и при подготовке специалистов в области электроэнергетики.

6.2 Структура системы

На сегодняшний день принципиальная структура системы WAMS уже устоялась. Векторные измерения параметров электрического режима выполняются согласно Стандарту С37.118. Они производятся устройствами синхронизированных векторных измерений – УСВИ (регистраторами СМПП, в английском варианте – PMU), на каждом периоде колебаний по первой гармонике. Измеренные параметры передаются в концентратор данных (Phasor Data Concentrator – PDC). Далее PDC предоставляют данные на уровень сервисов приложений (сервисов баз данных, сервисов управления, сервисов защиты и др.). Используемый транспортный протокол UDP обеспечивает негарантированную, но быструю и, при необходимости, широкополосную доставку сообщений, обеспечивая, таким образом, возможность передачи по вычислительным сетям общего назначения. Структура системы представлена на рисунке 12.

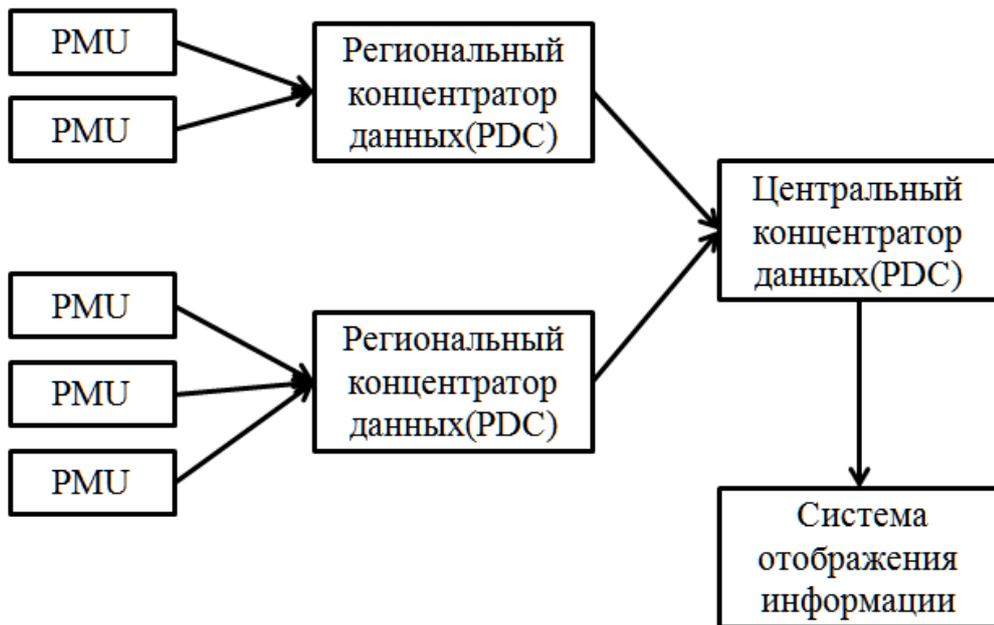


Рисунок 12 – Структура системы СМПП

6.3 Измерения в динамическом режиме

Применяемые в настоящее время устройства синхронизированных векторных измерений изначально создавались для систем мониторинга стационарных режимов энергосистем и соответствуют поставленным ранее задачам. Однако такие устройства не отвечают требованиям необходимой адекватности работы, соответствующим условиям их работы в системах управления и защиты (WASC и WAPS). Одним из способов решения задачи обеспечения качества измерений в динамическом режиме является повышение частоты вычисления параметров электрического режима (ПЭР). Существует возможность вычислять значения ПЭР каждую четверть периода основной частоты, что дает возможность более детально анализировать электромагнитные переходные процессы и производить мониторинг работы централизованной и локальной автоматик и систем регулирования. Для измерения и регистрации ПЭР с повышенной частотой в стационарных и переходных режимах на объектах энергосистемы разработаны и реализованы в опытных образцах регистратора нового поколения методы и алгоритмы определения следующих ПЭР на интервалах времени, равных $1/4$ периода:

- амплитуда и фаза напряжения и тока;
- средняя угловая скорость на $1/4$ периода;
- действующее значение напряжения и тока;
- модуль вектора напряжения и тока;
- фазовый угол вектора напряжения и тока;
- активная мощность и др.

Четверти периода определяются в потоке первичных данных последовательно, например: от 0 до максимального значения, от максимума до нуля, от нуля до минимума и от минимума до 0 и т.д. Каждый из этих промежутков соответствует повороту угла вектора напряжения на 90

градусов. Среднее значение угловой скорости на интервале $1/4$ периода определяется из:

$$\omega = \frac{\frac{\pi}{2}}{\Delta t_{1/4}},$$

где ω - угловая скорость, рад/с; $\Delta t_{1/4}$ - фактическая продолжительность четверти периода.

Остальные ПЭР определяются по известным выражениям с учетом синхронизирующего импульса.

В силу того, что измерения на присоединениях синхронизированы и выполняются с высокой точностью, появляется возможность рассчитывать параметры схем замещения основного оборудования электрической сети электроэнергетической системы (трансформаторов, ЛЭП, реакторов и др.).

В качестве платформы устройства, предназначенного для расчета ПЭР на интервале $1/4$ периода основной частоты, использован цифровой регистратор электрических сигналов, который позволяет выполнять измерения мгновенных значений сигнала с частотой не ниже 10 кГц, оборудованный устройством синхронизации (GPS). Предполагается обеспечить возможность передачи результатов измерений, полученных для четверти периода, в течение следующей четверти, то есть в течении 10 мс с момента начала измерений.

Для обеспечения корректной работы методов обработки данных применяется система диагностики первичных сигналов, которая определяет наличие возмущений, присущих электромагнитным и электромеханическим процессам.

В качестве основных используется ряд простых критериев, по которым можно разделить потоки данных для последующей обработки:

- превышение установленных пороговых значений первичных данных тока и напряжения;
- превышение допустимого отклонения мгновенных значений сигнала от прогнозных (сингулярность процесса), определенных по параметрам сигнала предыдущей четверти;
- превышение установленных пороговых значений и скоростей изменения контролируемых ПЭР.

Развитие методов диагностики первичных данных и ПЭР позволит рассматривать возможность применения регистраторов нового поколения в качестве пусковых органов противоаварийной автоматики.

Таким образом, для обнаружения, мониторинга и анализа переходных процессов на ОРУ 110 кВ ТЭЦ ВАЗа предлагается установка устройств синхронизированных векторных измерений. В системе автоматики необходима установка цифровых регистраторов электрических сигналов, работающих на повышенной частоте (порядка 10 кГц), также оборудованными устройствами синхронизации (GPS). Устройства GPS в данном случае позволят передавать и обмениваться информацией с региональным концентратором данных.

Заключение

Комплекс действий ориентирован на усовершенствование открытого распределительного устройства 110 кВ Самарского филиала ПАО «Т Плюс» ТЭЦ ВАЗа с вводом современного электрооборудования, дабы не допустить сбоя технологического процесса, недоотпуска электроэнергии, выработанной с электростанции, поломку оборудования. Несомненно, старое оборудования также, создает негативные условия для безопасности оперативного персонала. Убытки от таких инцидентов порой бывают очень значительными, нежели затраты на модернизацию.

В выпускной квалификационной работе проанализировано техническое состояние открытого распределительного устройства 110 кВ ТЭЦ ВАЗа, выполнен расчет токов короткого замыкания. На основании расчета, морально и физически исчерпавшие свой ресурс электроагрегаты, нуждаются в своей возможной замене, а именно: воздушные выключатели, разъединители, трансформаторы тока и трансформаторы напряжения. Таким образом, был предложен вариант со следующей компоновкой электроагрегатов, представленных ниже:

- элегазовые выключатели, марки ВГТ-110 П*- 40/2500У1;
- разъединители, марки РГП СЭЩ 110 кВ;
- трансформаторы тока ТРГ – 110-П–УХЛ1;
- трансформаторы напряжения НАМИ – 110-УХЛ1.

К установке предложены современные, удовлетворяющие техническим условиям, электроустановки.

Представлена общая характеристика системы мониторинга переходных процессов и предложена установка необходимых устройств, отслеживающих переходные процессы в основном электрооборудовании открытого распределительного устройства 110 кВ ТЭЦ ВАЗа.

Список использованных источников

1. Красник, В.В. Правила устройства электроустановок в вопросах и ответах для изучения и подготовки к проверке знаний (полные). [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : ЭНАС, 2012. — 512 с.
2. Жихар, Г.И. Котельные установки тепловых электростанций. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Минск : "Вышэйшая школа", 2015. — 523 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/75127> — Загл. с экрана.
3. Дайнеко, В.А. Эксплуатация электрооборудования и устройств автоматики. [Электронный ресурс] / В.А. Дайнеко, Е.П. Забелло, Е.М. Прищепова. — Электрон. дан. — Минск : Новое знание, 2014. — 333 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/49457> — Загл. с экрана.
4. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций [Текст]: учебник для студ. сред. проф. образования/Л.Д. Рожкова, Л.К. Корнеева, Т.В. Чиркова. – 11-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 448с.
5. Грунтович, Н.В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Минск : Новое знание, 2013. — 271 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/43873> — Загл. с экрана.
6. Шеховцов, В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению [Текст]/В.П. Шеховцев. – 2-е изд. - М. : ФОРУМ, 2017. – 136 с.
7. Костюк А.Г., Паровые и газовые турбины для электростанций. [Электронный ресурс] / Костюк А.Г., В.В. Фролов, Булкин А.Е., Трухний А.Д.. — Электрон. дан. — М. : Издательский дом МЭИ, 2016. — 557 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/72260> — Загл. с экрана.

8. Свирен, С.Я. Электрические станции, подстанции и сети: пособие по курсовому и дипломному проектированию [Текст]/С.Я. Свирен. – М.: Издательство «Книга по требованию», 2012. – 352с.

9. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст]: учебник для вузов/Б.И. Кудрин. – 2-е изд. - М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 352с.

10. Щербаков, Е. Ф. Электрические аппараты [Текст]: учебник/Щербаков Е. Ф., Александров Д. С. - М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 304 с.

11. Полуянович, Н.К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий . [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2017. — 396 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/91900> — Загл. с экрана.

12. Ополева, Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов [Текст]/ Г.Н. Ополева, - М.:ФОРУМ-ИНФРА-М, 2017. – 416 с.

13. Крючков И.П., Короткие замыкания и выбор электрооборудования. [Электронный ресурс] / Крючков И.П., Старшинов В.А., Гусев Ю.П.. — Электрон. дан. — М. : Издательский дом МЭИ, 2012. — 568 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/72231> — Загл. с экрана.

14. РД 34.03.201-97. Правила техники безопасности при эксплуатации тепломеханического оборудования электростанций и тепловых сетей (с доп. и изм. по состоянию на 03.04.2000 г.). [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : ЭНАС, 2012. — 224 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/38590> — Загл. с экрана.

15. РД 34.20.801–2000. Инструкция по расследованию и учету технологических нарушений в работе энергосистем, электростанций, котельных, электрических и тепловых сетей. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : ЭНАС, 2012. — 24 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/38604> — Загл. с экрана.

16. РД 153-34.0-20.527–98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : ЭНАС, 2013. — 144 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/38586> — Загл. с экрана.
17. РД 153-34.0-03.301-00. Правила пожарной безопасности для энергетических предприятий. [Текст] – М. : Альвис, 2014. – 152с.
18. Матияшук, С.В. Комментарий к Федеральному закону от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» (постатейный). [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : Юстицинформ, 2012. — 268 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/10616> — Загл. с экрана.
19. Ушаков, В.Я. Современные проблемы электроэнергетики: учебное пособие. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Томск : ТПУ, 2014. — 447 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/62918> — Загл. с экрана.
20. Быстрицкий, Г.Ф. Основы энергетики [Текст]: учебник / Г. Ф. Быстрицкий. – 4-е изд., стер. - М.: КНОРУС, 2013. - 352 с.
21. Копылов А.С., Водоподготовка в энергетике. [Электронный ресурс] / Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф.. — Электрон. дан. — М. : Издательский дом МЭИ, 2016. — 310 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/72208> — Загл. с экрана.
22. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – Введ. 01.07.2014 г. – М.: Стандартиформ, 2014. – 20 с.
23. Петренко, Ю.Н. Программное управление технологическими комплексами в энергетике. [Электронный ресурс] / Ю.Н. Петренко, С.О. Новиков, А.А. Гончаров. — Электрон. дан. — Минск : "Вышэйшая школа", 2013. — 407 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/65588> — Загл. с экрана.

24. ГОСТ 12.0.003-74. - Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. –Введ. 1976-01-01. - Госуд. комитет по стандартам; М.: Изд-во стандартов, 2004. – 4 с.

25. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : ЭНАС, 2012. — 48 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/38584> — Загл. с экрана.

26. Карапетян, И.Г. Справочник по проектированию электрических сетей. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : ЭНАС, 2012. — 392 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/38546> — Загл. с экрана.

27. Радкевич, В.Н. Электроснабжение промышленных предприятий / В.Н. Радкевич, В.Б. Козловская, И.В. Колосова [Текст]: учеб. пособие — Минск : ИВЦ Минфина, 2015.

28. Киреева Э.А. Электроснабжение и электрооборудование цехов промышленных предприятий / Э.А. Киреева [Текст]: учебное пособие - Кнорус: Бакалавр, 2013.

29. Титков, В.В. Перенапряжения и молниезащита. [Электронный ресурс] / В.В. Титков, Ф.Х. Халилов. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2016. — 224 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/75522> — Загл. с экрана.

30. Лыкин, А.В. Электроэнергетические системы и сети / А. В. Лыкин [Текст]: учеб. пособие. - М.: Юрлайт, 2017. - 360 с

31. McDonald, J. D. Electric Power Substations Engineering / J. D. McDonald [и др.]. – Майями: CRC Press Taylor & Francis Group, 2012. – 593с.

32. Bayliss, C. Transmission and Distribution Electrical Engineering / C. Bayliss, B. Hardly. – Newnes, 2012. – 1180 с.

33. PMU Optimal Allocation Using a Posteriori Bus-Observing Redundancy Removal Approach/ N. H. Abbasy, N.A. Ahmed// Selected Topics in Power Systems & Remote Sensing. 10th WSEAS/IASME International

Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines. Japan - 2013. - P. 35-40.

34. Shoulder Electronics Ltd. Manual for the design of substations edition 2 [Электронный_ресур].<http://www.shoulder.cn/en/home.aspx>.

35. Asea Brown Boveri Ltd. (ABB).product catalog 2015 [Электронный ресурс]. <http://www.abb.com/>