

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Реконструкция электрической части подстанции 110/35/10 кВ «Шацкая»

Студент

А.Г. Алексеев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, Ю.В. Черненко

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Аннотация

В представленной выпускной квалификационной работе рассмотрена возможность реконструкции электрической части подстанции 110/35/10 «Шацкая».

Дана характеристика объекта и проведен расчет электрических нагрузок, на основании которого выбраны силовые трансформаторы.

Произведен расчет токов короткого замыкания, на основании которого выбрано основное оборудование подстанции, отвечающее техническим требованиям и нормам, а также нормам безопасности: выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы тока и напряжения и др.

Определена величина мощности, необходимая для удовлетворительного функционирования подстанции, а потом на её основании произведен выбор трансформаторов собственных нужд.

Произведена замена элементов системы релейной защиты и автоматики, с помощью расчетов спроектировано устройство молниезащиты и заземления подстанции.

Текстуальная часть пояснительной записки, в которую входит 6 рисунков и 14 таблиц, состоит из 65 листов, а графическая часть – из 6 чертежей формата А1.

Содержание

Введение.....	4
1 Характеристика объекта.....	6
2 Расчет ожидаемых электрических нагрузок и выбор типа, числа и мощности трансформаторов.....	8
3 Выбор электрической схемы подстанции и основных конструктивных решений.....	10
3.1 Выбор электрической схемы подстанции.....	10
3.2 Выбор основных конструктивных решений подстанции.....	12
4 Расчет токов короткого замыкания.....	13
5 Выбор электрических аппаратов подстанции.....	19
5.1 Выбор высоковольтных выключателей.....	19
5.2 Выбор разъединителей.....	29
5.3 Выбор трансформаторов тока.....	35
5.4 Выбор трансформаторов напряжения.....	44
5.5 Выбор комплектного распределительного устройства.....	48
6 Релейная защита подстанции.....	49
7 Выбор трансформаторов собственных нужд и оперативного тока.....	52
8 Молниезащита подстанции.....	54
9 Заземление подстанции.....	56
Заключение.....	60
Список используемых источников.....	61

Введение

Электроэнергетика является неотъемлемой частью научно-технического прогресса. Поэтому ее развитие должно идти в ногу со временем или опережать его. В наше время качественное и бесперебойное обеспечение электроэнергией потребителей способствует объединению электрических сетей в очень сложную систему, включающую в себя множество разнообразного и разнотипного электрооборудования сгруппированного в оптимальные схемы электрических соединений, в которых трансформаторные подстанции считаются одними из основных устройств по передаче и распределению электроэнергии. Поэтому, современное проектирование электрической части подстанции и выбор электрооборудования для её эффективной эксплуатации, представляет важную задачу, направленную на экономию ресурсов и надежное обеспечение электроэнергией потребителей.

«Главная схема электрических соединений подстанции включает в себя основное электрооборудование, сборные шины, коммутационную и другую первичную аппаратуру со всеми необходимыми между ними соединениями» [26].

«Выбор главной схемы является определяющим при проектировании электрической части электростанции (подстанции), так как он определяет полный состав элементов и связей между ними» [26].

«Проектирование электрической части главной понизительной подстанции является одним из наиболее ответственных этапов при разработке проекта электроснабжения потребителей и представляет собой сложный процесс выработки и принятия решений по схеме электрических соединений, составу электрооборудования и его размещению. Главная схема электрических соединений подстанции должна удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Надежность электроснабжения потребителей.

2. Приспособленность к проведению ремонтных работ.
3. Оперативная гибкость электрической схемы.
4. Соблюдение требований экологической безопасности и охраны окружающей среды.
5. Экономическая целесообразность» [8].

Выполнение данной ВКР должно формировать у студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», необходимые знания для решения профессиональных задач по проектированию понизительных трансформаторных подстанций, а также: умение и навыки самостоятельной организации учебно-исследовательской работы; умение работать с нормативными документами, учебной и научной литературой; умение пользоваться современными методами поиска, обработки и использования информации; умения применять теоретические знания при решении практических задач; культуру написания выпускной квалификационной работы.

Основной целью выполнения выпускной квалификационной работы является приобретение опыта в проектировании электрической части подстанции и выборе электрооборудования для её эффективной эксплуатации, необходимого для надежного электроснабжения потребителей подстанции 110/35/10 «Шацкая».

Выпускная квалификационная работа представляет собой решение комплексной задачи по реконструкции подстанции «Шацкая», включающей вычисление электрических параметров нагрузки и токов к.з., а также подбор электрооборудования, необходимого для эксплуатации трансформаторной подстанции, а также устройств молниезащиты и заземления.

1 Характеристика объекта

Подстанция 110/35/10 «Шацкая» расположена в городе Шацк Рязанской области. Введена в эксплуатацию в 1965 году и находится на балансе производственного объединения «Сасовские электрические сети» филиала «Рязаньэнерго».

Схема питающих и отходящих линий приведена на рисунке 1.

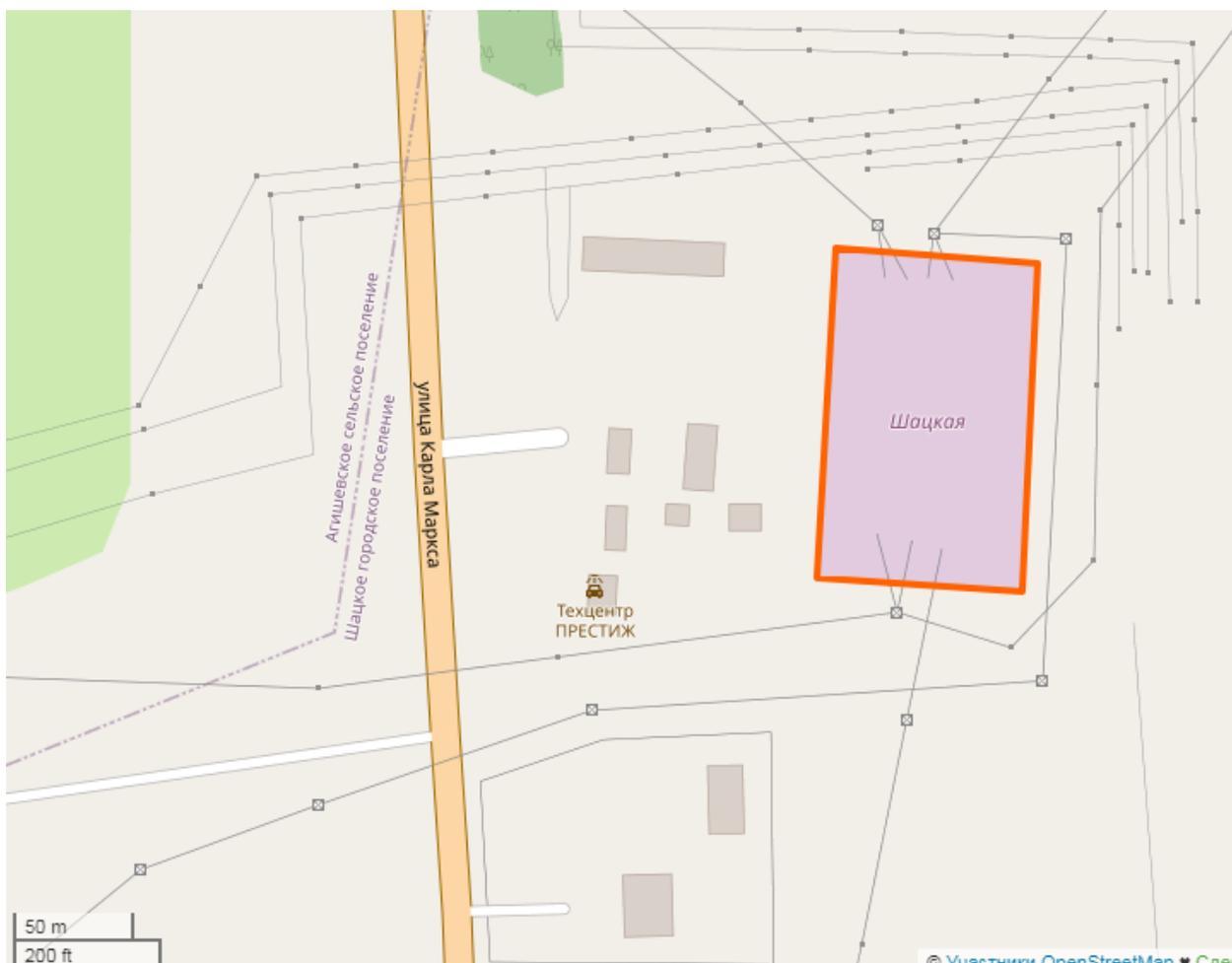


Рисунок 1 – Схема питающих и отходящих линий

ПС «Шацкая» является тупиковой. Год ввода в эксплуатацию Т1 – 1976 год, Т2 – 1994 год. Количество трансформаторов и установленная мощность 1х10+1х25 МВА.

Основными потребителями подстанции в городе Шацк являются:

газораспределительная станция, швейная фабрика, асфальтобетонный завод, хлебный завод, ликеро-водочный завод, лесопилка, водонапорные башни, столовые, кафе, рестораны, жилой сектор, включающий 20 многоквартирных домов, 3 учебных заведения среднего профессионального образования, 2 школы, детский сад, 3 поликлиники, родильный дом, центральная районная больница. Численность населения составляет около 6 тысяч человек.

В соответствии со стратегией социально-экономического развития муниципального образования - Шацкий муниципальный район до 2030 года планируется провести основные мероприятия по развитию туризма, реконструкции имеющихся и строительству новых промышленных предприятий, а также строительства жилых домов с необходимой инфраструктурой. Также в соответствии со стратегией развития в электроснабжении основными задачами и направлениями являются:

- организация качественной и безопасной эксплуатации электрических сетей;

- модернизация системы уличного освещения;

- реконструкция и модернизация существующих систем электроснабжения, строительство новых сетей, в том числе для вновь строящегося жилья;

- оптимизация работы основного силового оборудования, распределительной электрической сети;

- внедрение средств и систем энергетики.

Вывод: В связи с дальнейшим развитием экономической и социальной составляющей города Шацк потребуется строительство новых электрических сетей, что скажется на увеличении потребности в электрической мощности. А также, учитывая срок ввода в эксплуатацию подстанции и нормативный срок службы трансформаторов, составляющий 25-30 лет, ПС «Шацкая» нуждается в реконструкции и модернизации.

2 Расчет ожидаемых электрических нагрузок и выбор типа, числа и мощности трансформаторов

Существующая нагрузка ПС «Шацкая» по замерам составляет 7,21 МВА. Резерв мощности на основании замеров режимного дня составляет 5,03 МВА. Мощность по договорам на ТП, находящимся на исполнении 0,38 МВт. Резерв мощности для технологического присоединения 4,55 МВА. Загрузка подстанции менее 75%. Принимаем суммарную потребляемую мощность $P_{max} = 7,6$ МВА. Значение коэффициента мощности потребителей принимаем $\cos\varphi = 0,83$.

Чтобы найти значение полной мощности воспользуемся формулой (1):

$$S_{max.пс} = \frac{P_{max}}{\cos\varphi} = \frac{7,6}{0,83} = 9,16 \text{ МВА} \quad (1)$$

«Выбор количества трансформаторов произведем исходя из категорий надежности электроснабжения потребителей. Потребители ПС «Шацкая» относятся к I (важные объекты здравоохранения, котельные, насосные станции первой категории, лифты, устройства пожарной сигнализации, противопожарные устройства, охранная сигнализация), II (детские заведения, медицинские учреждения, городские учреждения, учебные заведения, крупные торговые центры, спортивные сооружения, все остальные котельные и насосные станции, не относящиеся к первой категории) и III (все оставшиеся потребители) категориям, поэтому в соответствии с Правилами устройства электроустановок для обеспечения надежности электроснабжения потребителей на подстанции необходима установка 2-х трансформаторов» [26].

Чтобы найти значение допустимой номинальной мощности каждого трансформатора $S_{ном.Т}$ подстанции воспользуемся выражением (2):

$$S_{ном.Т} \geq 0,7 \cdot S_{max.пс} = 0,7 \cdot 9,16 = 6,412 \text{ МВА} \quad (2)$$

Свой выбор останавливаем на трансформаторе ТДТН-10000/110-У1, УХЛ-1 производства ООО «Тольяттинский трансформатор», с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН) на нейтрали ВН в диапазоне $\pm 16 \% \pm 9$ ступеней ($\pm 14,24 \% \pm 8$ ступеней), без регулирования напряжения на стороне СН с системой охлаждения вида «Д», предназначены для работы на электрических сетях с глухозаземленной нейтралью [1, 12]. Технические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики трансформаторов

Трансформатор ТДТН-10000/110/35/10		
$S_{\text{НОМ.Т}}$, МВА	10	
$U_{\text{НОМ}}$, кВ	ВН	115
	СН	38,5
	НН	6,6; 11,0
$u_{\text{кз}}$, %	ВН-СН	10,5
	ВН-НН	17,5
	СН-НН	6,5
$I_{\text{ХХ}}$, %	0,38	
$\Delta P_{\text{кз}}$, кВт	70	
$\Delta P_{\text{ХХ}}$, кВт	12	
Схема соединения обмоток	Y/Y/Δ	
Полная масса, кг	45200	

Проверим силовой трансформатор по значению допустимой аварийной перегрузки равной 40 %, при условии, что один из трансформаторов был отключен из-за аварии в соответствии с выражением (3):

$$S_{\text{max}} = 9,16 \text{ МВА} \leq S_{\text{НОМ.Т}} \cdot 1,4 = 10 \cdot 1,4 = 14 \text{ МВА} \quad (3)$$

Вывод: Условие по допустимой аварийной перегрузке выполняется, поэтому для проведения реконструкции подстанции «Шацкая» назначаем к установке два трансформатора ТДТН-10000/110/35/10.

3 Выбор электрической схемы подстанции и основных конструктивных решений

3.1 Выбор схемы электрических соединений

«Выбор схемы подстанции осуществляется в соответствии с установленными требованиями по обеспечению надежности и безопасности эксплуатации, по проведению ремонтных работ, а также с учетом перспектив развития.

Подстанция «Шацкая» в системе и по схеме питания на стороне высокого напряжения (ВН) является концевой (тупиковой), то есть, принимающей электроэнергию от одной электроустановки по одной или нескольким параллельным линиям [18, 21- 27].

«Для повышения надежности систем электроснабжения рекомендуются к применению схемы с выключателями, так как в работе отделителей и короткозамкателей открытого исполнения при эксплуатации возникают существенные недостатки» [22-25].

«В соответствии с рекомендациями по применению принципиальных электрических схем распределительных устройств и нормами технологического проектирования подстанций производим выбор главной схемы подстанции с учетом следующих особенностей:

- 1) категории потребителей, а также количества устанавливаемых на подстанции трансформаторов;
- 2) типа подстанции (тупиковой, ответвительной, проходной, узловой)» [22-25].

Для подстанции «Шацкая» и её потребителей целесообразно использовать «типовую схему распределительных устройств с напряжением 110 кВ, а для распределительных устройств с напряжением 6–10 кВ – схему с одной секционированной системой сборных шин, секционный выключатель разомкнут» [22-25].

Типовая схема распределительных устройств с напряжением 110 кВ показана на рисунке 2.

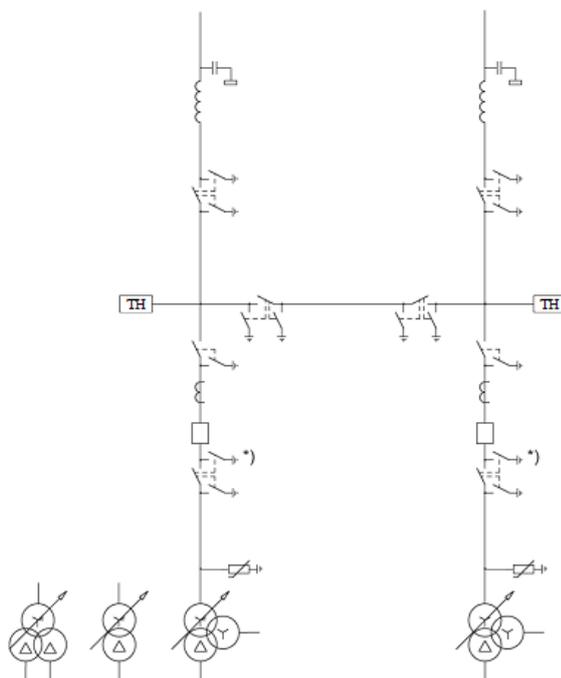


Рисунок 2 – Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий

Типовая схема распределительных устройств с напряжением 10 (6) кВ показана на рисунке 3.

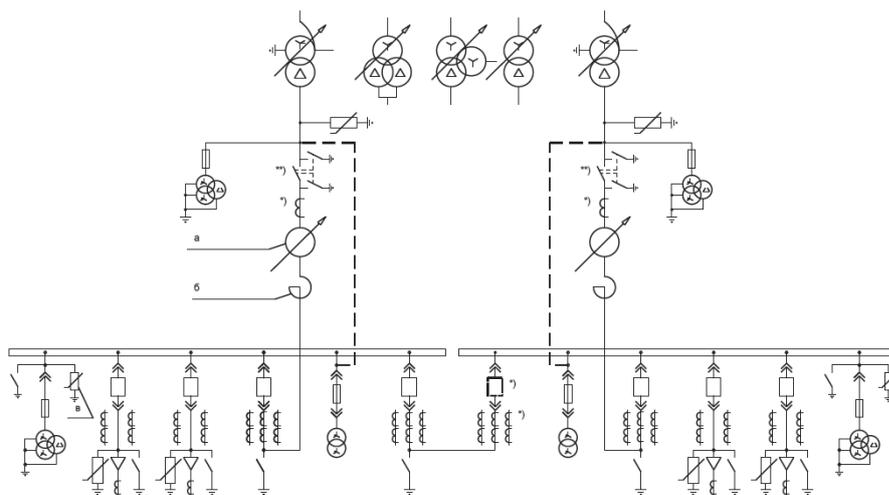


Рисунок 3 – Одиночная система шин, секционированная выключателями

Далее, составляем электрическую схему ПС и производим выбор типов применяемых аппаратов.

3.2 Выбор основных конструктивных решений подстанции

В связи с тем, что вблизи подстанции «Шацкая» отсутствуют предприятия и объекты, способствующие загрязнению атмосферы до состояния, при котором необходимо использование закрытого распределительного устройства, а также с учетом расположения основного оборудования распределительного устройства на открытом воздухе, на ПС целесообразно использовать открытое распределительное устройство [8].

В качестве токоведущих частей используется комбинированная ошиновка: жесткая и гибкая на разных участках ОРУ.

Для предотвращения растекания масла и распространения пожара при повреждениях маслонаполненных силовых трансформаторов должны быть выполнены маслоприемники, в которых укладывается слой гравия толщиной не менее 25 см, маслоотводы и маслосборники, куда масло стекает в аварийных случаях, в соответствии с требованиями ПУЭ [17].

Сооружение подстанций должно защищаться молниеотводами [17].

Для распределения напряжения 6–10 кВ целесообразно использовать комплектные распределительные устройства (КРУ) наружной установки, в которых предусматриваются шкафы с вакуумными и элегазовыми выключателями [8].

Вывод: Для реконструкции подстанции «Шацкая» выбираем к применению типовую схему распределительных устройств с напряжением 110 кВ, а для распределительных устройств с напряжением 35 кВ и 10(6) кВ – схему с одной секционированной системой сборных шин, секционный выключатель разомкнут, с размещением основного оборудования РУ на открытом воздухе.

4 Расчет токов короткого замыкания

«Определение значения токов короткого замыкания (к. з.) необходимо для проектирования заземляющих устройств, устройств релейной защиты и автоматики и их настройки, а также для выбора и проверки электрических аппаратов и проводников» [19].

«Коротким замыканием (КЗ) называется не предусмотренное нормальной эксплуатацией соединение разноименных фаз между собой или соединение фаз с землей» [3].

«Следует отметить, что расчетным видом тока к. з. при выборе и проверке аппаратов и проводников обычно является трехфазный ток к. з., реже (в сетях 110 кВ и выше) – однофазный ток к. з.» [19, 21].

«Трехфазным коротким замыканием называют короткое замыкание между тремя фазами в трехфазной электроэнергетической системе – $K^{(3)}$.

Трехфазным коротким замыканием на землю называют короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе (ЭЭС) с глухо- или эффективно заземленными нейтральными силовых элементов, при котором с землей соединяются три фазы – $K^{(1,1,1)}$ » [3].

Вычислим параметры токов трехфазного к. з. в электрических сетях с напряжением выше 1 кВ.

«При расчетах токов к. з. допускается не учитывать:

сдвиг по фазе ЭДС различных синхронных машин и изменение их частоты вращения, если продолжительность к. з. не превышает 0,5 с;

ток намагничивания силовых трансформаторов и автотрансформаторов;

насыщение магнитных систем электрических машин;

поперечную емкость воздушных линий электропередачи напряжением 110–220 кВ, с длиной не более 200 км, и напряжением 330–500 кВ, с длиной не более 150 км;

воздействие активных сопротивлений элементов расчетной схемы на

амплитуду периодической составляющей тока к. з., при условии, что значение результирующего эквивалентного сопротивления относительно точки к. з. не превысит 30 % значения индуктивного результирующего эквивалентного сопротивления» [19, 21].

Нарисуем расчетную схему электроустановки, необходимую для построения эквивалентной схемы замещения, и расчетные точки к. з. Указанные схемы наблюдаем на рисунке 4 (а и б – соответственно).

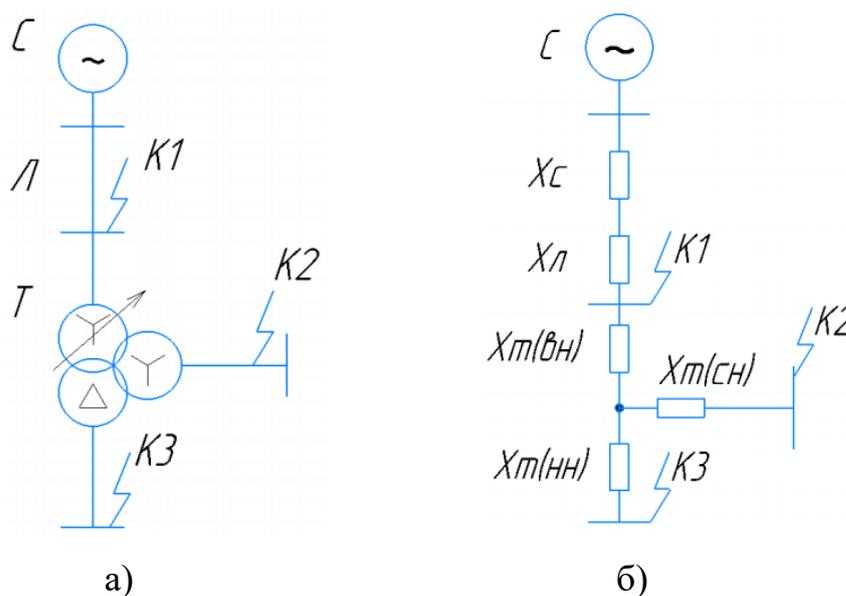


Рисунок 4 – Схема для определения параметров токов к. з.
а – расчетная; б – замещения

«Для удобства вычислений расчет токов короткого замыкания выполняем в относительных единицах. Для перехода от реальных физических величин к относительным значениям предварительно выбираем базисные величины. За базисное значение мощности S_6 принимаем число, равное $S_6 = 1000$ МВА. В соответствии со шкалой средних номинальных напряжений, в точке K_1 на стороне ВН базисное напряжение равно $U_{cp} = U_6 = 115$ кВ, а на стороне НН, в точках K_2 и K_3 , $U_6 = 10,5$ кВ» [19].

Произведем расчет значений сопротивлений схемы замещения в относительных единицах в соответствии с указанными формулами (4-8).

Вычислим сопротивление системы:

$$x_{*б,с} = S_б/S_к = 1000/4000 = 0,25, \quad (4)$$

где $S_б$ – базисная мощность, МВА;

$S_к$ – мощность короткого замыкания, МВА.

Вычислим сопротивление 2-х цепной воздушной линии:

$$x_{*б,л} = x_{уд}l(S_б/U_{ср}^2) = 0,4 \cdot 15 \cdot (1000/1152) = 0,454, \quad (5)$$

где $x_{уд}$ – среднее значение погонного (удельного) индуктивного сопротивления линий электропередачи, Ом/км;

l – длина линии электропередачи, км;

$U_{ср}$ – среднее номинальное напряжение на стороне ВН, кВ [19].

Вычислим сопротивления трансформатора:

$$x_{*б,ТВН} = (U_{к.в},\%/100)(S_б/S_{НОМТ}) = (10,75/100) \cdot (1000/10) = 10,75, \quad (6)$$

где $U_{к.в} = 0,5(u_{к.ВН-НН} + u_{к.ВН-СН} - u_{к.СН-НН}) = 0,5(17,5+10,5-6,5) = 10,75\%$.

$$x_{*б,ТСН} = (U_{к.с},\%/100)(S_б/S_{НОМТ}) = (0/100) \cdot (1000/10) = 0, \quad (7)$$

где $U_{к.с} = 0,5(u_{к.ВН-СН} + u_{к.СН-НН} - u_{к.ВН-НН}) = 0,5(10,5+6,5-17,5) = 0\%$.

$$x_{*б,ТНН} = (U_{к.н},\%/100)(S_б/S_{НОМТ}) = (6,75/100) \cdot (1000/10) = 6,75, \quad (8)$$

где $U_{к.н} = 0,5(u_{к.ВН-НН} + u_{к.СН-НН} - u_{к.ВН-СН}) = 0,5(17,5+6,5-10,5) = 6,75\%$.

При коротком замыкании в точке K_1 , расчеты производим в следующем порядке:

Чтобы найти значение результирующего сопротивления до точки K_1 воспользуемся формулой (9):

$$x_{*резK1} = x_{*б,с} + x_{*б,л} = 0,25 + 0,454 = 0,704. \quad (9)$$

Чтобы найти значение базисного тока для точки K_1 используем формулу (10):

$$I_6 = S_6/\sqrt{3} \cdot U_6 = 1000/\sqrt{3} \cdot 115 = 5,02 \text{ кА.} \quad (10)$$

Чтобы найти периодическую составляющую трехфазного тока к.з. для точки K_1 действующую на начальном этапе воспользуемся формулой (11):

$$I_{п,0} = (E''_{*6}/x_{*резK1}) \cdot I_6 = (1/0,704) \cdot 5,02 = 7,13 \text{ кА,} \quad (11)$$

где $E''_{*6} = 1$ – среднее значение сверхпереходной ЭДС для энергетической системы, в относительных единицах [19].

Чтобы найти величину ударного тока к. з. для точки K_1 используем формулу (12):

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{п,0} \cdot k_{уд} = \sqrt{2} \cdot 7,13 \cdot 1,8 = 18,15 \text{ кА,} \quad (12)$$

где $k_{уд} = 1,8$ – среднее значение ударного коэффициента [19].

При к. з. в точках K_2 и K_3 расчеты производим в том же порядке.

Чтобы найти значение результирующего сопротивления до точки K_2 на стороне СН, где $U_n = 35$ кВ, воспользуемся формулой (13):

$$x_{*резK2} = x_{*6,с} + x_{*6,л} + x_{*6,Твн} + x_{*6,Тсн} = 0,25+0,454+10,75+0 = 11,454. \quad (13)$$

Чтобы найти значение базисного тока в точке K_2 где U_6 будет иметь значение 37,5 кВ, воспользуемся формулой (10):

$$I_6 = S_6/\sqrt{3} \cdot U_6 = 1000/\sqrt{3} \cdot 37,5 = 15,4 \text{ кА.}$$

Чтобы найти периодическую составляющую трехфазного тока к.з. для точки K_2 действующую на начальном этапе воспользуемся формулой (11):

$$I_{п,0} = (E''_{*6}/x_{*резK2}) \cdot I_6 = (1/11,454) \cdot 15,4 = 1,35 \text{ кА.}$$

Чтобы найти величину ударного тока к. з. для точки K_2 используем формулу (12):

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{п,0} \cdot k_{уд} = \sqrt{2} \cdot 1,35 \cdot 1,64 = 3,13 \text{ кА,}$$

где $k_{уд} = 1,64$ – величина ударного коэффициента в системе, связанной со сборными шинами 6–10 кВ [8, 18].

Чтобы найти значение результирующего сопротивления до точки K_3 на стороне НН, где $U_H = 10$ кВ, воспользуемся формулой (14):

$$x_{*резK3} = x_{*6,с} + x_{*6,л} + x_{*6,Твн} + x_{*6,Тсн} + x_{*6,Тнн} = 0,25 + 0,454 + 10,75 + 0 + 6,75 = 18,2. \quad (14)$$

Чтобы найти значение базисного тока в точке K_3 , где U_6 будет иметь значение 10,5 кВ, воспользуемся формулой (10):

$$I_6 = S_6/\sqrt{3} \cdot U_6 = 1000/\sqrt{3} \cdot 10,5 = 55 \text{ кА.}$$

Чтобы найти периодическую составляющую трехфазного тока к.з. для точки K_3 действующую на начальном этапе воспользуемся формулой (11):

$$I_{п,0} = (E''_{*6}/x_{*резK3}) \cdot I_6 = (1/18,2) \cdot 55 = 3,022 \text{ кА.}$$

Чтобы найти величину ударного тока к. з. для точки K_3 используем формулу (12):

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{п,0} \cdot k_{уд} = \sqrt{2} \cdot 3,022 \cdot 1,64 = 7,01 \text{ кА.}$$

Полученные результаты заносим в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчетные значения токов к.з.

Значение	Результат, кА
периодической составляющей трехфазного тока к.з. $I_{п,0}$ в точке K_1	7,13
периодической составляющей трехфазного тока к.з. $I_{п,0}$ в точке K_2	1,35
периодической составляющей трехфазного тока к.з. $I_{п,0}$ в точке K_3	3,022
ударного тока к.з. $i_{уд}$ в точке K_1	18,15
ударного тока к.з. $i_{уд}$ в точке K_2	3,13
ударного тока к.з. $i_{уд}$ в точке K_3	7,01

Вывод: Полученные расчетные значения токов к.з. на сторонах напряжений (ВН, СН, НН) понадобятся для выбора и проверки электрооборудования подстанции (выключатели, разъединители, трансформаторы тока и напряжения, проводников и т.д.), а также для проектирования устройств защитного заземления, релейной защиты и автоматики.

5 Выбор электрических аппаратов подстанции

«Чтобы произвести выбор электрических аппаратов в соответствии с установленной электрической схемой подстанции, необходимо найти значения токов к.з и рабочих токов присоединений, и сопоставить их с соответствующими номинальными параметрами аппаратов» [17].

5.1 Выбор высоковольтных выключателей

В соответствии с полученными значениями расчета трехфазного короткого замыкания для точки K_1 $I_{п,0} = 7,13$ кА, $i_{уд} = 18,15$ кА (таблица 2) произведем выбор и проверку выключателя, устанавливаемого на стороне высшего напряжения 110 кВ силового трансформатора мощностью 10 МВА.

«На стороне 110 кВ и выше целесообразно использовать элегазовые выключатели, так как их достоинствами являются:

применение в электроустановках закрытого и открытого исполнения с любым классом напряжения;

практичные размеры и масса конструкции;

отсутствие шумов в работе привода;

дуга гасится в герметичном корпусе, заполненном элегазом, без контакта с атмосферой;

повышена коммутационная способность и пожаробезопасность;

нет необходимости в установке устройств ОПН, так как при переключении больших и малых токов перенапряжение не возникает;

межремонтный период может составлять до 15 лет. [18, 27]

Намечаем к установке элегазовый выключатель типа ВГТ-110П-40/2500У1 производства завода «Энергон» г. Воронеж, с заданными параметрами: «напряжение $U_{ном} = 110$ кВ; ток $I_{ном} = 2500$ А; периодическая составляющая предельного сквозного тока к. з. с начальным значением $I_{прс} = 40$ кА; ток электродинамической стойкости $i_{прс} = 102$ кА; ток включения

$i_{\text{вкл.норм}} = 102$ кА; периодическая составляющая с током включения $I_{\text{вкл.норм}} = 40$ кА; ток отключения $I_{\text{откл.норм}} = 40$ кА; апериодическая составляющая $\beta_{\text{нор}} = 40$ %; ток термической стойкости $I_T = 40$ кА; ток термической стойкости с длительностью протекания $t_T = 3$ с; собственное время отключения выключателя $t_{\text{св}} = 0,035$ с; полное время отключения выключателя $t_{\text{пв.откл}} = 0,055$ с» [9].

Произведем проверку выбранного выключателя в соответствии с установленными требованиями:

1) условие на соответствие номинальному напряжению по выражению $U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$ (15):

$$U_{\text{ном}} = U_{\text{сет.ном}} = 110 \text{ кВ}; \quad (15)$$

2) условие на соответствие номинальному длительному (рабочему) току $I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}, I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}$, в соответствии с формулами (16, 17):

$$I_{\text{раб}} = S_{\text{T.ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}) = 10000 / (\sqrt{3} \cdot 110) = 52,5 \text{ А}, \quad (16)$$

$$I_{\text{max}} = 1,4 \cdot (S_{\text{T.ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}})) = 1,4 \cdot 10000 / (\sqrt{3} \cdot 110) = 73,5 \text{ А}, \quad (17)$$

получим следующие выражения:

$$I_{\text{раб}} = 52,5 \text{ А} \leq I_{\text{ном}} = 2500 \text{ А},$$

$$I_{\text{max}} = 73,5 \text{ А} \leq I_{\text{ном}} = 2500 \text{ А},$$

3) условие на соответствие отключающей способности:

а) по симметричному току отключения, где $I_{n,\tau} \leq I_{\text{откл.ном}}, I_{n,\tau} = I_{\text{п,0}} = 7,13$ кА, тогда:

$$I_{n,\tau} = 7,13 \text{ кА} \leq I_{\text{откл.ном}} = 40 \text{ кА},$$

б) по отключению апериодической составляющей тока к. з., в

соответствии с формулой (18):

$$i_{a,\tau} \leq i_{a.\text{НОМ}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{НОР}}/100) \cdot I_{\text{ОТКЛ.НОМ}} \quad (18)$$

где $i_{a,\tau}$ – номинальное допустимое значение апериодической составляющей в отключаемом токе для времени [19], величину которого найдем с помощью формул (19, 20):

$$\tau = t_{\text{РЗ}} + t_{\text{С.В}} = 0,01 + 0,035 = 0,045 \text{ с}, \quad (19)$$

где $t_{\text{РЗ}} = 0,01$ с – время срабатывания релейной защиты;

$t_{\text{С.В}}$ – отключение выключателя по собственному времени;

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{П,О}} e^{-\tau/T_a} = \sqrt{2} \cdot 7,13 \cdot e^{-0,045/0,03} = 2,25 \text{ кА}, \quad (20)$$

где $T_a = 0,03$ – «постоянная времени затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания, в системе, связанной со сборными шинами 6–10 кВ» [8, 18];

для расчета величины апериодической составляющей в отключаемом токе воспользуемся формулой (21):

$$i_{a.\text{НОМ}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{НОР}}/100) \cdot I_{\text{ОТКЛ.НОМ}} = (\sqrt{2} \cdot 40/100) \cdot 40 = 22,63 \text{ кА}, \quad (21)$$

где $\beta_{\text{НОР}}$ – нормированная величина, содержащая апериодическую составляющую в токе отключения, %;

на основании произведенных расчетов имеем:

$$i_{a,\tau} = 2,25 \text{ кА} \leq i_{a.\text{НОМ}} = 22,63 \text{ кА};$$

4) условие на соответствие включающей способности по формулам (22, 23):

$$I_{\text{П,О}} = 7,13 \text{ кА} \leq I_{\text{ВКЛ.НОРМ}} = 40 \text{ кА}, \quad (22)$$

где $I_{п,о}$ – начальная величина периодической составляющей тока к.з., кА [8, 18];

величина периодической составляющей тока включения выключателя, кА [8, 18];

$$i_{уд} = 18,15 \text{ кА} \leq i_{вкл.норм} = 102 \text{ кА}, \quad (23)$$

где $i_{уд}$ – величина ударного тока к. з. [9];

$i_{вкл.норм}$ – нормированная величина тока включения выключателя [9];

5) условие на соответствие электродинамической стойкости по формулам (24, 25):

$$I_{н,о} = 7,13 \text{ кА} \leq I_{пр.с} = 40 \text{ кА}, \quad (24)$$

где $I_{пр.с}$ – величина предельного сквозного тока к. з. [9];

$$i_{уд} = 18,15 \text{ кА} \leq i_{пр.с} = 102 \text{ кА}, \quad (25)$$

где $i_{пр.с}$ – амплитудная величина предельного сквозного тока к. з.;

б) условие на соответствие термической стойкости (по тепловому импульсу) $B_k \leq I_T^2 \cdot t_T$ по формулам (26, 27):

$$B_{к.расч} = I_{п,о}^2 (t_{откл} + T_a) = (7,13 \cdot 10^3)^2 \cdot (0,065 + 0,03) = 4,83 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}, \quad (26)$$

где $t_{откл}$ – время отключения короткого замыкания, которое

определяется суммой $t_{откл} = t_{рз} + t_{пв.откл} = 0,01 + 0,055 = 0,065 \text{ с}$;

так как $t_{откл} = 0,065 \text{ с} < t_T = 3 \text{ с}$, отсюда:

$$B_{к.выкл} = 4,83 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с} \leq I_T^2 \cdot t_{откл} = (40 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,065 = 104 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}, \quad (27)$$

Запишем результаты, найденные на основании расчетов, в таблицу 3.

Таблица 3 – Данные выключателя ВГТ-110П-40/2500У1

Значения расчетов	Заводские параметры	Установленные требования
$U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{сет.ном}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$
$I_{\text{раб}} = 52,5 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 2500 \text{ А}$	$I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$
$I_{\text{max}} = 73,5 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 2500 \text{ А}$	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}$
$I_{n,\tau} = 7,13 \text{ кА}$	$I_{\text{откл.ном}} = 40 \text{ кА}$	$I_{n,\tau} \leq I_{\text{откл.ном}}$
$I_{\text{п,о}} = 7,13 \text{ кА}$	$I_{\text{вкл.норм}} = 40 \text{ кА}$	$I_{\text{п,о}} \leq I_{\text{вкл.норм}}$
$i_{a,\tau} = 2,25 \text{ кА}$	$i_{a,\text{ном}} = 22,63 \text{ кА}$	$i_{a,\tau} \leq i_{a,\text{ном}}$
$I_{n,o} = 7,13 \text{ кА}$	$I_{\text{пр.с}} = 40 \text{ кА}$	$I_{n,o} \leq I_{\text{пр.с}}$
$i_{\text{уд}} = 18,15 \text{ кА}$	$i_{\text{пр.с}} = 102 \text{ кА}$	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{пр.с}}$
$i_{\text{уд}} = 18,15 \text{ кА}$	$i_{\text{вкл.норм}} = 102 \text{ кА}$	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{вкл.норм}}$
$B_{\text{к.расч}} = 4,83 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.выкл}} = 104 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.расч}} \leq B_{\text{к.выкл}}$

Таким образом, выбранный выключатель ВГТ-110П-40/2500У1 удовлетворяет всем установленным требованиям выбора и проверки, поэтому подходит для эксплуатации на подстанции «Шацкая».

Выбор выключателей на сторонах СН – 35 кВ и НН – 10 кВ произведем в том же порядке, который был использован на стороне 110 кВ.

К установке на стороне СН – 35 кВ намечаем элегазовый выключатель типа ВГТ-УТМ-35 производства АО «Уралэлектротяжмаш» г. Екатеринбург, с заданными параметрами: «напряжение $U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}$; ток $I_{\text{ном}} = 3150 \text{ А}$; периодическая составляющая предельного сквозного тока к. з. с начальным значением $I_{\text{пр.с}} = 50 \text{ кА}$; ток электродинамической стойкости $i_{\text{пр.с}} = 125 \text{ кА}$; ток включения $i_{\text{вкл.норм}} = 125 \text{ кА}$; периодическая составляющая с током включения $I_{\text{вкл.ном}} = 50 \text{ кА}$; ток отключения $I_{\text{откл.ном}} = 50 \text{ кА}$; аperiodическая составляющая $\beta_{\text{нор}} = 40 \%$; ток термической стойкости $I_{\text{T}} = 50 \text{ кА}$ с длительностью протекания $t_{\text{T}} = 3 \text{ с}$; собственное время отключения выключателя $t_{\text{св}} = 0,035 \text{ с}$; полное время отключения выключателя $t_{\text{пв.откл}} = 0,055 \text{ с}$ » [13].

Произведем проверку выбранного выключателя в соответствии с установленными требованиями:

1) условие на соответствие номинальному напряжению по выражению

$$U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}} \quad (15):$$

$$U_{\text{НОМ}} = U_{\text{сет.НОМ}} = 35 \text{ кВ};$$

2) условие на соответствие номинальному длительному (рабочему) току $I_{\text{раб}} \leq I_{\text{НОМ}}, I_{\text{max}} \leq I_{\text{НОМ}}$, в соответствии с формулами (16, 17):

$$I_{\text{раб}} = S_{\text{T.НОМ}}/(\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}) = 10000/(\sqrt{3} \cdot 35) = 165 \text{ А},$$

$$I_{\text{max}} = 1,4 \cdot (S_{\text{T.НОМ}}/(\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}})) = 1,4 \cdot 10000/(\sqrt{3} \cdot 35) = 231 \text{ А},$$

получим следующие выражения:

$$I_{\text{раб}} = 165 \text{ А} \leq I_{\text{НОМ}} = 3150 \text{ А},$$

$$I_{\text{max}} = 231 \text{ А} \leq I_{\text{НОМ}} = 3150 \text{ А};$$

3) условие на соответствие отключающей способности:

а) по симметричному току отключения, где $I_{n,\tau} \leq I_{\text{откл.НОМ}}$, тогда:

$$I_{n,\tau} = 1,35 \text{ кА} \leq I_{\text{откл.НОМ}} = 50 \text{ кА},$$

где $I_{n,\tau} = I_{\text{п,о}} = 1,35 \text{ кА};$

б) по отключению апериодической составляющей тока к. з., в соответствии с формулами (18, 19):

$$i_{a,\tau} \leq i_{a.\text{НОМ}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{НОР}}/100) \cdot I_{\text{откл.НОМ}}$$

$$\tau = t_{\text{рз}} + t_{\text{с.в}} = 0,01 + 0,035 = 0,045 \text{ с};$$

апериодическую составляющую в отключаемом токе, являющейся величиной допустимой, найдем с помощью формулы (20):

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п,о}} e^{-\tau/T_a} = \sqrt{2} \cdot 1,35 \cdot e^{-0,045/0,03} = 0,426 \text{ кА}.$$

Апериодическую составляющую в отключаемом токе, являющуюся величиной номинальной допустимой, найдем с помощью формулы (21):

$$i_{a.ном} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{нор}/100) \cdot I_{откл.ном} = (\sqrt{2} \cdot 40/100) \cdot 50 = 28,284 \text{ кА},$$

на основании произведенных расчетов имеем:

$$i_{a,\tau} = 0,426 \text{ кА} \leq i_{a.ном} = 28,284 \text{ кА};$$

4) условие на соответствие включающей способности по формулам (22, 23):

$$\begin{aligned} I_{п,о} &= 1,35 \text{ кА} \leq I_{вкл.норм} = 50 \text{ кА}, \\ i_{уд} &= 3,13 \text{ кА} \leq i_{вкл.норм} = 102 \text{ кА}; \end{aligned}$$

5) условие на соответствие электродинамической стойкости по формулам (24, 25):

$$\begin{aligned} I_{n,о} &= 1,35 \text{ кА} \leq I_{пр.с} = 50 \text{ кА}, \\ i_{уд} &= 3,13 \text{ кА} \leq i_{пр.с} = 125 \text{ кА}; \end{aligned}$$

б) условие на соответствие термической стойкости (по тепловому импульсу) $B_k \leq I_T^2 \cdot t_T$ по формулам (26, 27):

$$\begin{aligned} B_{к.расч} &= I_{п,о}^2 (t_{откл} + T_a) = (1,35 \cdot 10^3)^2 \cdot (0,065 + 0,03) = 0,173 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}, \\ \text{ГДЕ } t_{откл} &= t_{рз} + t_{пв.откл} = 0,01 + 0,055 = 0,065 \text{ с}; \end{aligned}$$

так как $t_{откл} = 0,065 \text{ с} < t_T = 3 \text{ с}$, тогда:

$$B_{к.выкл} = 0,173 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с} \leq I_T^2 \cdot t_{откл} = (50 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,065 = 162,5 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}.$$

Запишем результаты, найденные на основании расчетов, в таблицу 4.

Таблица 4 – Данные выключателя ВГТ-УТМ-35

Значения расчетов	Заводские параметры	Установленные требования
$U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}$	$U_{\text{сет.ном}} = 35 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$
$I_{\text{раб}} = 165 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 3150 \text{ А}$	$I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$
$I_{\text{max}} = 231 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 3150 \text{ А}$	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}$
$I_{\text{n,т}} = 1,35 \text{ кА}$	$I_{\text{откл.ном}} = 50 \text{ кА}$	$I_{\text{n,т}} \leq I_{\text{откл.ном}}$
$I_{\text{п,о}} = 1,35 \text{ кА}$	$I_{\text{вкл.ном}} = 50 \text{ кА}$	$I_{\text{п,о}} \leq I_{\text{вкл.ном}}$
$i_{\text{а,т}} = 0,426 \text{ кА}$	$i_{\text{а.ном}} = 28,284 \text{ кА}$	$i_{\text{а,т}} \leq i_{\text{а.ном}}$
$I_{\text{n,о}} = 1,35 \text{ кА}$	$I_{\text{пр.с}} = 50 \text{ кА}$	$I_{\text{n,о}} \leq I_{\text{пр.с}}$
$i_{\text{уд}} = 3,13 \text{ кА}$	$i_{\text{пр.с}} = 125 \text{ кА}$	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{пр.с}}$
$i_{\text{уд}} = 3,13 \text{ кА}$	$i_{\text{вкл.ном}} = 125 \text{ кА}$	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{вкл.ном}}$
$B_{\text{к.расч}} = 0,173 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.выкл}} = 162,5 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.расч}} \leq B_{\text{к.выкл}}$

Таким образом, выбранный выключатель ВГТ-УТМ-35 удовлетворяет всем установленным требованиям выбора и проверки, поэтому подходит для эксплуатации на подстанции «Шацкая».

К установке на стороне НН – 10 кВ намечаем элегазовый выключатель типа ВВУ-СЭЩ-Э-10-31,5/1600 производства ОАО «Электроштит» г. Самара, с заданными параметрами: «напряжение $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$; ток $I_{\text{ном}} = 1600 \text{ А}$; периодическая составляющая предельного сквозного тока к. з. с начальным значением $I_{\text{пр.с}} = 31,5 \text{ кА}$; ток электродинамической стойкости $i_{\text{пр.с}} = 81 \text{ кА}$; ток включения $i_{\text{вкл.ном}} = 81 \text{ кА}$; периодическая составляющая с током включения $I_{\text{вкл.ном}} = 31,5 \text{ кА}$; ток отключения $I_{\text{откл.ном}} = 31,5 \text{ кА}$; апериодическая составляющая $\beta_{\text{ном}} = 40 \%$; ток термической стойкости $I_{\text{т}} = 31,5 \text{ кА}$ с длительностью протекания $t_{\text{т}} = 3 \text{ с}$; собственное время отключения выключателя $t_{\text{св}} = 0,03 \text{ с}$; полное время отключения выключателя $t_{\text{пв.откл}} = 0,05 \text{ с}$ » [14].

Произведем проверку выбранного выключателя в соответствии с установленными требованиями:

1) условие на соответствие номинальному напряжению по выражению $U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$ (15):

$$U_{\text{ном}} = U_{\text{сет.ном}} = 10 \text{ кВ};$$

2) условие на соответствие номинальному длительному (рабочему) току $I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}, I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}$, в соответствии с формулами (16, 17):

$$I_{\text{раб}} = S_{\text{T.ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}) = 10000 / (\sqrt{3} \cdot 10) = 577,35 \text{ А},$$

$$I_{\text{max}} = 1,4 \cdot (S_{\text{T.ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}})) = 1,4 \cdot 10000 / (\sqrt{3} \cdot 10) = 808,3 \text{ А},$$

получим следующие выражения:

$$I_{\text{раб}} = 577,35 \text{ А} \leq I_{\text{ном}} = 1600 \text{ А};$$

$$I_{\text{max}} = 808,3 \text{ А} \leq I_{\text{ном}} = 1600 \text{ А};$$

3) условие на соответствие отключающей способности:

а) по симметричному току отключения, где $I_{n,\tau} \leq I_{\text{откл.ном}}$, тогда:

$$I_{n,\tau} = 3,022 \text{ кА} \leq I_{\text{откл.ном}} = 31,5 \text{ кА},$$

где $I_{n,\tau} = I_{\text{п,о}} = 3,022 \text{ кА};$

б) по отключению апериодической составляющей тока к. з., в соответствии с формулами (18, 19):

$$i_{a,\tau} \leq i_{a.\text{ном}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{нор}} / 100) \cdot I_{\text{откл.ном}},$$

$$\tau = t_{\text{рз}} + t_{\text{с.в}} = 0,01 + 0,03 = 0,04 \text{ с};$$

апериодическую составляющую в отключаемом токе, являющейся величиной допустимой, найдем с помощью формулы (20):

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п,о}} e^{-\tau/T_a} = \sqrt{2} \cdot 3,022 \cdot e^{-0,04/0,03} = 16,21 \text{ кА},$$

апериодическую составляющую в отключаемом токе, являющуюся величиной номинальной допустимой, найдем с помощью формулы (21):

$$i_{a.\text{ном}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{нор}} / 100) \cdot I_{\text{откл.ном}} = (\sqrt{2} \cdot 40 / 100) \cdot 31,5 = 17,82 \text{ кА},$$

на основании произведенных расчетов имеем:

$$i_{a,\tau} = 16,21 \text{ кА} \leq i_{a,\text{ном}} = 17,82 \text{ кА};$$

4) условие на соответствие включающей способности по формулам (22, 23):

$$\begin{aligned} I_{п,о} &= 3,022 \text{ кА} \leq I_{\text{вкл.норм}} = 31,5 \text{ кА}, \\ i_{уд} &= 7,01 \text{ кА} \leq i_{\text{вкл.норм}} = 81 \text{ кА}; \end{aligned}$$

5) условие на соответствие электродинамической стойкости по формулам (24, 25):

$$\begin{aligned} I_{n,о} &= 3,022 \text{ кА} \leq I_{\text{пр.с}} = 31,5 \text{ кА}, \\ i_{уд} &= 7,01 \text{ кА} \leq i_{\text{пр.с}} = 81 \text{ кА}; \end{aligned}$$

б) условие на соответствие термической стойкости (по тепловому импульсу) $B_k \leq I_T^2 \cdot t_T$ вычислим в соответствии с указанными формулам (26, 27):

$$\begin{aligned} B_{\text{к.расч}} &= I_{п,о}^2 (t_{\text{откл}} + T_a) = (3,022 \cdot 10^3)^2 \cdot (0,06 + 0,03) = 0,822 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}, \\ \text{Где } t_{\text{откл}} &= t_{\text{рз}} + t_{\text{п.в.откл}} = 0,01 + 0,05 = 0,06 \text{ с}; \end{aligned}$$

так как $t_{\text{откл}} = 0,06 \text{ с} < t_T = 3 \text{ с}$, тогда:

$$B_{\text{к.выкл}} = 0,822 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с} \leq I_T^2 \cdot t_{\text{откл}} = (31,5 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,06 = 59,54 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}.$$

Запишем результаты, найденные на основании расчетов, в таблицу 5.

Таблица 5 – Данные выключателя ВВУ-СЭЩ-Э-10-31,5/1600

Значения расчетов	Заводские параметры	Установленные требования
$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{сет.ном}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$
$I_{\text{раб}} = 577,35 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1600 \text{ А}$	$I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$
$I_{\text{max}} = 808,3 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1600 \text{ А}$	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}$
$I_{\text{н,т}} = 3,022 \text{ кА}$	$I_{\text{откл.ном}} = 31,5 \text{ кА}$	$I_{\text{н,т}} \leq I_{\text{откл.ном}}$
$I_{\text{п,о}} = 3,022 \text{ кА}$	$I_{\text{вкл.норм}} = 31,5 \text{ кА}$	$I_{\text{п,о}} \leq I_{\text{вкл.норм}}$
$i_{\text{а,т}} = 16,21 \text{ кА}$	$i_{\text{а.ном}} = 17,82 \text{ кА}$	$i_{\text{а,т}} \leq i_{\text{а.ном}}$
$I_{\text{н,о}} = 3,022 \text{ кА}$	$I_{\text{пр.с}} = 31,5 \text{ кА}$	$I_{\text{н,о}} \leq I_{\text{пр.с}}$
$i_{\text{уд}} = 7,01 \text{ кА}$	$i_{\text{пр.с}} = 81 \text{ кА}$	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{пр.с}}$
$i_{\text{уд}} = 7,01 \text{ кА}$	$i_{\text{вкл.норм}} = 81 \text{ кА}$	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{вкл.норм}}$
$B_{\text{к.расч}} = 0,822 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.выкл}} = 59,54 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.расч}} \leq B_{\text{к.выкл}}$

Таким образом, выбранный выключатель ВВУ-СЭЩ-Э-10-31,5/1600 удовлетворяет всем установленным требованиям выбора и проверки, поэтому подходит для эксплуатации на подстанции «Шацкая».

Вывод: Назначаем к установке на подстанции удовлетворяющие условиям проверки высоковольтные выключатели на сторонах ВН, СН, НН, соответственно: ВГТ-110П-40/2500У1; ВГТ-УТМ-35; ВВУ-СЭЩ-Э-10-31,5/1600.

5.2 Выбор разъединителей

Используя полученные значения расчета трехфазного короткого замыкания для точки K_1 $I_{\text{п,о}} = 7,13 \text{ кА}$, $i_{\text{уд}} = 18,15 \text{ кА}$ (таблица 2), произведем выбор и проверку разъединителя, устанавливаемого на стороне ВН – 110 кВ.

«На стороне ВН от 110 кВ и выше рекомендуется к использованию разъединители горизонтально-поворотного типа, не нуждающиеся в обслуживании в течение всего срока службы, показавшие в процессе эксплуатации высокие эксплуатационные качества. а также присущие им основные достоинства, которыми являются:

- применение высокопрочных фарфоровых и полимерных изоляторов;
- изоляция разъединителей РГ по сравнению с разъединителями РГН и

РДЗ выдерживает более высокие испытательные напряжения грозового импульса относительно земли и между полюсами, поэтому они могут эксплуатироваться в высокогорных районах;

надежные контактные системы и соединения обеспечивают работоспособность под действием эксплуатационных нагрузок и высокую стойкость к токам;

все контактные соединения токоведущего контура имеют покрытие гальваническим оловом или серебром, в разъемных контактах применено пластинчатое серебро с механическим ресурсом 10000 циклов;

имеются необходимые средства защиты контактных частей для обеспечения надежной работы в условиях сильного обледенения (30 мм);

заземлители с надежной фиксацией во включенном положении от сил отброса при токах к. з.;

имеется механическая блокировка;

минимальные усилия при оперировании за счет использования во всех узлах трения необслуживаемых подшипниковых узлов с закрытыми шарикоподшипниками и шарнирных соединений, не требующих смазки;

надежная противокоррозионная защита черных металлов – горячим или термодиффузионным цинком, а цветных металлов – гальваническим оловом;

экранный арматура, противогололедные кожуха – из алюминиевых сплавов;

разъединители оснащены электродвигательными приводами ПД –14 или ручными приводами ПРГ – 6;

ручные привода ПРГ – 6 имеют несъемные складывающиеся рукоятки;

приводы укомплектованы коммутирующими устройствами типа КСАМ 12 и электромагнитной блокировкой, располагаются в удобной для оперирования и обслуживания зоне на кронштейне, входящем в комплект поставки» [10].

Свой выбор останавливаем на разъединителе типа РГ–110.П/1000УХЛ1, производства ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, используемый

для наружной установки, тип – горизонтально-поворотный, имеющий два заземляющих ножа на полюс, с заданными параметрами: «напряжение $U_{\text{ном}} = 110$ кВ; ток $I_{\text{ном}} = 1000$ А; ток электродинамической стойкости $i_{\text{пр.с}} = 80$ кА; ток термической стойкости $I_{\text{T}} = 31,5$ кА с длительностью протекания $t_{\text{T}} = 3$ с» [10].

Произведем проверку выбранного разъединителя в соответствии с установленными требованиями:

1) условие на соответствие номинальному напряжению по выражению $U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$ (15):

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

2) условие на соответствие номинальному длительному (рабочему) току $I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$, в соответствии с формулой (28):

$$I_{\text{раб}} = S_{\text{T.ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}) = 10000 / (\sqrt{3} \cdot 110) = 52,5 \text{ А}, \quad (28)$$

получим выражение:

$$I_{\text{раб}} = 52,5 \text{ А} \leq I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А};$$

3) условие на соответствие электродинамической стойкости по выражению $i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}} = i_{\text{пр.с}}$:

$$i_{\text{уд}} = 18,15 \text{ кА} \leq i_{\text{пр.с}} = 80 \text{ кА};$$

4) условие на соответствие термической стойкости $B_{\text{к}} \leq I_{\text{T}}^2 \cdot t_{\text{T}}$ по формуле (27) так как $t_{\text{откл}} = 0,065 \text{ с} < t_{\text{T}} = 3 \text{ с}$:

$$B_{\text{к.раз}} = 4,83 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с} \leq I_{\text{T}}^2 \cdot t_{\text{откл}} = (31,5 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,065 = 64,5 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с},$$

где $B_{\text{к.расч}} = 4,83 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$ (таблица 3).

Запишем результаты, найденные на основании расчетов, в таблицу 6.

Таблица 6 – Данные разъединителя РГ–110.П/1000УХЛ1

Значения расчетов	Заводские параметры	Установленные требования
$U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{сет.ном}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$
$I_{\text{раб}} = 52,5 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$	$I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$
$i_{\text{уд}} = 18,15 \text{ кА}$	$i_{\text{пр.с}} = 80 \text{ кА}$	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{пр.с}}$
$B_{\text{к.расч}} = 4,83 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.раз}} = 64,5 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.расч}} \leq B_{\text{к.раз}}$

Таким образом, выбранный разъединитель РГ–110.П/1000УХЛ1 удовлетворяет всем установленным требованиям выбора и проверки, поэтому подходит для эксплуатации на подстанции «Шацкая».

Используя полученные значения расчета трехфазного короткого замыкания для точки K_2 $I_{\text{п,0}} = 1,35 \text{ кА}$, $i_{\text{уд}} = 3,13 \text{ кА}$ (таблица 2), произведем выбор и проверку разъединителя, устанавливаемого на стороне СН – 35 кВ.

Свой выбор останавливаем на «разъединителе типа РГ–35.П/1000УХЛ1, производства ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, используемый для наружной установки, тип – горизонтально-поворотный, имеющий два заземляющих ножа на полюс, с заданными параметрами: «напряжение $U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}$; ток $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$; ток электродинамической стойкости $i_{\text{пр.с}} = 50 \text{ кА}$; ток термической стойкости $I_{\text{T}} = 20 \text{ кА}$ с длительностью протекания $t_{\text{T}} = 3 \text{ с}$ » [10].

Произведем проверку выбранного разъединителя в соответствии с установленными требованиями:

1) условие на соответствие номинальному напряжению по выражению $U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$ (15):

$$U_{\text{ном}} = U_{\text{сет.ном}} = 35 \text{ кВ};$$

2) условие на соответствие номинальному длительному (рабочему) току $I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$, в соответствии с формулой (28):

$$I_{\text{раб}} = S_{\text{T.ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}) = 10000 / (\sqrt{3} \cdot 35) = 165 \text{ А},$$

получим выражение:

$$I_{\text{раб}} = 165 \text{ А} \leq I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А};$$

3) условие на соответствие электродинамической стойкости по выражению $i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}} = i_{\text{пр.с}}$:

$$i_{\text{уд}} = 3,13 \text{ кА} \leq i_{\text{пр.с}} = 50 \text{ кА};$$

4) условие на соответствие термической стойкости $B_{\text{к}} \leq I_{\text{T}}^2 \cdot t_{\text{T}}$ по формуле (27) так как $t_{\text{откл}} = 0,065 \text{ с} < t_{\text{T}} = 3 \text{ с}$:

$$B_{\text{к.раз}} = 0,173 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с} \leq I_{\text{T}}^2 \cdot t_{\text{откл}} = (20 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,065 = 26 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с},$$

где $B_{\text{к.расч}} = 0,173 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$ (таблица 4)

Запишем результаты, найденные на основании расчетов, в таблицу 7.

Таблица 7 – Данные разъединителя РГ–35.П/1000УХЛ1

Значения расчетов	Заводские параметры	Установленные требования
$U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}$	$U_{\text{сет.ном}} = 35 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$
$I_{\text{раб}} = 165 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$	$I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$
$i_{\text{уд}} = 3,13 \text{ кА}$	$i_{\text{пр.с}} = 50 \text{ кА}$	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{пр.с}}$
$B_{\text{к.расч}} = 0,173 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.раз}} = 26 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.расч}} \leq B_{\text{к.раз}}$

Таким образом, выбранный разъединитель РГ–35.П/1000УХЛ1 удовлетворяет всем установленным требованиям выбора и проверки, поэтому подходит для эксплуатации на подстанции «Шацкая».

Используя полученные значения расчета трехфазного короткого замыкания для точки K_3 $I_{\text{п,0}} = 3,022 \text{ кА}$, $i_{\text{уд}} = 7,01 \text{ кА}$ (таблица 2), произведем

выбор и проверку разъединителя, устанавливаемого на стороне НН – 10 кВ, необходимого только для присоединений, включающих трансформаторы напряжения и трансформаторы собственных нужд.

Свой выбор останавливаем на разъединителе типа РВЗ–10/630 МУХЛ2, производства ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки, используемый для внутренней установки, тип – вертикально-рубящий, с заданными параметрами: «напряжение $U_{\text{ном}} = 10$ кВ; ток $I_{\text{ном}} = 630$ А; ток электродинамической стойкости $i_{\text{пр.с}} = 50$ кА; ток термической стойкости $I_{\text{T}} = 20$ кА с длительностью протекания $t_{\text{T}} = 3$ с» [10].

Произведем проверку выбранного разъединителя в соответствии с установленными требованиями:

1) условие на соответствие номинальному напряжению по выражению $U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$ (15):

$$U_{\text{ном}} = U_{\text{сет.ном}} = 10 \text{ кВ};$$

2) условие на соответствие номинальному длительному (рабочему) току $I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$, в соответствии с формулой (28):

$$I_{\text{раб}} = S_{\text{T.ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}) = 10000 / (\sqrt{3} \cdot 10) = 577,35 \text{ А},$$

получим выражение:

$$I_{\text{раб}} = 577,35 \text{ А} \leq I_{\text{ном}} = 630 \text{ А};$$

3) условие на соответствие электродинамической стойкости по выражению $i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}} = i_{\text{пр.с}}$:

$$i_{\text{уд}} = 7,01 \text{ кА} \leq i_{\text{пр.с}} = 50 \text{ кА};$$

4) условие на соответствие термической стойкости $B_{\text{к}} \leq I_{\text{T}}^2 \cdot t_{\text{T}}$ по

формуле (27) так как $t_{откл} = 0,06с < t_T = 3с$:

$$B_{к.раз} = 0,822 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{c} \leq I_T^2 \cdot t_{откл} = (20 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,06 = 24 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{c}.$$

где $B_{к.расч} = 0,822 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{c}$ (таблица 5).

Запишем результаты, найденные на основании расчетов, в таблицу 8.

Таблица 8 – Данные разъединителя РВЗ–10/630 МУХЛ2

Значения расчетов	Заводские параметры	Установленные требования
$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{сет.ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} \leq U_{сет.ном}$
$I_{раб} = 577,35 \text{ А}$	$I_{ном} = 630 \text{ А}$	$I_{раб} \leq I_{ном}$
$i_{уд} = 7,01 \text{ кА}$	$i_{пр.с} = 50 \text{ кА}$	$i_{уд} \leq i_{пр.с}$
$B_{к.расч} = 0,822 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{c}$	$B_{к.раз} = 24 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{c}$	$B_{к.расч} \leq B_{к.раз}$

Таким образом, выбранный разъединитель РВЗ–10/630 МУХЛ2 удовлетворяет всем установленным требованиям выбора и проверки, поэтому подходит для эксплуатации на подстанции «Шацкая».

Вывод: Назначаем к установке на подстанции удовлетворяющие условиям проверки разъединители на сторонах ВН, СН, НН, соответственно: РГ–110.ІІ/1000УХЛ1; РГ–35.ІІ/1000УХЛ1; РВЗ–10/630 МУХЛ2.

5.3 Выбор трансформаторов тока

Используя полученные значения расчета токов трехфазного короткого замыкания для точки K_1 $I_{п,0} = 7,13 \text{ кА}$, $i_{уд} = 18,15 \text{ кА}$ (таблица 2) произведем выбор трансформатора тока для цепи силового трансформатора с известной номинальной мощностью $S_{ном} = 10 \text{ МВА}$ на стороне ВН.

Свой выбор останавливаем на «трансформаторе тока ТОГФ-110 (УХЛ1) элегазовый с фарфоровой изоляцией, предназначенный для передачи сигнала измерительной информации измерительным приборам и устройствам защиты и управления в открытых и закрытых

распределительных устройствах переменного тока частоты 50 Гц на номинальное напряжение 110 кВ, основными достоинствами которого являются:

- повышенный коэффициент пожаробезопасности;
- возможность использования аппарата при низких температурах;
- исключается появление опасных ядовитых газов при чрезвычайных обстоятельствах;
- не требуются специальные процедуры при утилизации» [10].

Заводские параметры трансформатора тока ТОГФ-110 (УХЛ1): «номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 110$ кВ; номинальный первичный ток $I_{1\text{ном}} = 150-300-600$ А, номинальный вторичный ток $I_{2\text{ном}} = 5$ А, ток термической стойкости $I_T = 40$ кА с длительностью протекания $t_T = 3$ с; вторичная нагрузка $S_2 = 100$ ВА при $\cos \varphi_2 = 0,8$; ток электродинамической стойкости $i_{\text{дин}} = 102$ кА» [10].

Чтобы при эксплуатации трансформатора тока не произошел рост погрешности измерений из-за недогрузки его первичной обмотки, номинальный ток подбираем оптимально близко к рабочему току, учитывая имеющиеся данные $I_{1\text{ном}} = 150-300-600$ А.

Произведем проверку выбранного трансформатора тока в соответствии с установленными требованиями:

1) условие на соответствие номинальному напряжению по выражению $U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$ (15):

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

2) условие на соответствие номинальному длительному (рабочему) току $I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$, в соответствии с формулой (28):

$$I_{\text{раб}} = S_{\text{T.ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}) = 10000 / (\sqrt{3} \cdot 110) = 52,5 \text{ А},$$

получим выражение:

$$I_{\text{раб}} = 52,5 \text{ А} \leq I_{1\text{ном}} = 150 \text{ А},$$

где $I_{1\text{ном}}$ – номинальный первичный ток выбираем как можно ближе к рабочему току установки;

3) условие на соответствие электродинамической стойкости по выражению:

$$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}} = K_{\text{эд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\text{ном}},$$

где $K_{\text{эд}}$ – кратность электродинамической стойкости трансформатора тока [1]:

$$i_{\text{уд}} = 18,15 \text{ кА} \leq i_{\text{дин}} = 102 \text{ кА};$$

4) условие на соответствие термической стойкости

$$B_{\text{к}} \leq K_{\text{т}}^2 \cdot I_{1\text{ном}}^2 \cdot t_{\text{т}} = I_{\text{т}}^2 \cdot t_{\text{т}},$$

где $K_{\text{т}}$ – кратность термической стойкости трансформатора тока [1],

$B_{\text{к.расч}} = 4,83 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$ (таблица 3), по формуле (27):

$$B_{\text{к тт}} = 4,83 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с} \leq I_{\text{т}}^2 \cdot t_{\text{т}} = (40 \cdot 10^3)^2 \cdot 3 = 4800 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}.$$

5) условие на соответствие конструкции и классу точности:

трансформатор тока элегазовый с фарфоровой изоляцией имеет класс точности 0,2 [10];

б) условие на соответствие вторичной нагрузке по выражению $Z_2 < Z_{2\text{ном}}$.

Величину сопротивления допустимой нагрузки, подключаемой ко вторичной обмотке вычислим, используя формулу (29):

$$Z_{2\text{ном}} = S_2 / I_2^2 = 100 / 5^2 = 4 \text{ Ом}; \quad (29)$$

величину сопротивления измерительных приборов, подключаемых к трансформатору тока (амперметр Э42700, имеющий мощность $S_{\text{приб}} = 0,5 \text{ ВА}$, и счетчик активной и реактивной энергии Меркурий 230 ART с потребляемой мощностью $S_{\text{приб}} = 0,1 \text{ ВА}$), вычислим используя формулу (30):

$$R_{\text{приб}} = S_{\text{приб}}/I_2^2 = 0,6/5^2 = 0,024 \text{ Ом}; \quad (30)$$

значение сопротивления проводов найдем используя формулу:

$$R_{\text{пр}} = \rho \cdot l_p/s = 0,0175 \cdot 75/2,5 = 0,525 \text{ Ом}; \quad (31)$$

где ρ – удельное сопротивление проводов с медными жилами $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ [8, 18];

l_p – расчетная длина провода, м, зависящая от схемы присоединения приборов к обмоткам трансформатора (в нашем случае используется присоединение в полную звезду, где $l_p = l$) [8, 18];

s – сечение проводов (в нашем случае для медных жил), мм^2) [8].

Переходное сопротивление контактов $R_k = 0,05 \text{ Ом}$;

вторичную нагрузку трансформатора тока вычислим используя формулу (32):

$$Z_2 = R_{\text{приб}} + R_{\text{пр}} + R_k = 0,024 + 0,525 + 0,05 = 0,6 \text{ Ом}; \quad (32)$$

Условие $Z_2 = 0,6 \text{ Ом} < Z_{2\text{ном}} = 4 \text{ Ом}$ соблюдается.

Запишем результаты, найденные на основании расчетов, в таблицу 9.

Таблица 9 – Данные трансформатора тока ТОГФ-110 (УХЛ1)

Значения расчетов	Заводские параметры	Установленные требования
$U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{сет.ном}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$
$I_{\text{раб}} = 52,5 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 150 \text{ А}$	$I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$
$i_{\text{уд}} = 18,15 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 102 \text{ кА}$	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}$
$B_{\text{к.расч}} = 4,83 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.ТТ}} = 4800 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.расч}} \leq B_{\text{к.ТТ}}$
$Z_2 = 0,6 \text{ Ом}$	$Z_{2\text{ном}} = 4 \text{ Ом}$	$Z_2 < Z_{2\text{ном}}$

Таким образом, выбранный трансформатора тока ТОГФ-110 (УХЛ1) удовлетворяет всем установленным требованиям выбора и проверки, поэтому подходит для эксплуатации на подстанции «Шацкая».

Используя полученные значения расчета трехфазного короткого замыкания для точки K_2 $I_{\text{п,0}} = 1,35 \text{ кА}$, $i_{\text{уд}} = 3,13 \text{ кА}$ (таблица 2), произведем выбор и проверку трансформатора тока, устанавливаемого на стороне СН – 35 кВ.

Свой выбор останавливаем на трансформаторе тока ТРГ-УЭТМ-35 производства АО «Уралэлектротяжмаш» г. Екатеринбург с заданными параметрами: «напряжение $U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}$; первичный ток $I_{1\text{ном}} = 5-2000 \text{ А}$ с шагом 5 А, вторичный ток $I_{2\text{ном}} = 1-5 \text{ А}$, ток термической стойкости $I_{\text{T}} = 40 \text{ кА}$ с длительностью протекания $t_{\text{T}} = 1 \text{ с}$; вторичная нагрузка $S_2 = 100 \text{ ВА}$ при $\cos \varphi_2 = 0,8$; ток электродинамической стойкости $i_{\text{дин}} = 102 \text{ кА}$ » [13].

Произведем проверку выбранного трансформатора тока в соответствии с установленными требованиями:

1) условие на соответствие номинальному напряжению по выражению $U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$ (15):

$$U_{\text{ном}} = U_{\text{сет.ном}} = 35 \text{ кВ};$$

2) условие на соответствие номинальному длительному (рабочему) току $I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$, в соответствии с формулой (28):

$$I_{\text{раб}} = S_{\text{T.ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}) = 10000 / (\sqrt{3} \cdot 35) = 165 \text{ А},$$

получим выражение:

$$I_{\text{раб}} = 165 \text{ А} \leq I_{1\text{ном}} = 170 \text{ А},$$

где $I_{1\text{ном}}$ – номинальный первичный ток выбираем как можно ближе к рабочему току установки;

3) условие на соответствие электродинамической стойкости по выражению:

$$\begin{aligned} i_{\text{уд}} &\leq i_{\text{дин}} = K_{\text{эд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\text{ном}}, \\ i_{\text{уд}} &= 3,13 \text{ кА} \leq i_{\text{дин}} = 102 \text{ кА}; \end{aligned}$$

4) условие на соответствие термической стойкости

$$B_{\text{к}} \leq K_{\text{T}}^2 \cdot I_{1\text{ном}}^2 \cdot t_{\text{T}} = I_{\text{T}}^2 \cdot t_{\text{T}},$$

где $B_{\text{к.расч}} = 0,173 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$ (таблица 4), по формуле (27):

$$B_{\text{кТТ}} = 0,173 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с} \leq I_{\text{T}}^2 \cdot t_{\text{T}} = (40 \cdot 10^3)^2 \cdot 1 = 1600 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}.$$

5) условие на соответствие конструкции и классу точности:

трансформатор тока элегазовый с фарфоровой изоляцией имеет класс точности 0,2 [13];

б) условие на соответствие вторичной нагрузке по условию $Z_2 < Z_{2\text{ном}}$:

имеем величину сопротивления допустимой нагрузки, подключаемой ко вторичной обмотке, $Z_{2\text{ном}} = 4 \text{ Ом}$ (таблица 9);

величину сопротивления измерительных приборов, подключаемых к трансформатору тока (амперметр Э42700, имеющий мощность $S_{\text{приб}} = 0,5 \text{ ВА}$, ваттварметр СК3021-5, имеющий мощность $S_{\text{приб}} = 0,7 \text{ ВА}$, и счетчик активной и реактивной энергии Меркурий 230 ART с потребляемой мощностью $S_{\text{приб}} =$

0,1 ВА), вычислим используя формулу (30):

$$R_{\text{приб}} = S_{\text{приб}}/I_2^2 = 1,3/5^2 = 0,052 \text{ Ом};$$

значение сопротивления проводов найдем используя формулу (31):

$$R_{\text{пр}} = \rho \cdot l_p/s = 0,0175 \cdot 60/2,5 = 0,42 \text{ Ом};$$

переходное сопротивление контактов $R_{\text{к}} = 0,05 \text{ Ом};$

вторичную нагрузку трансформатора тока найдем используя формулу (32):

$$Z_2 = R_{\text{приб}} + R_{\text{пр}} + R_{\text{к}} = 0,052 + 0,42 + 0,05 = 0,522 \text{ Ом};$$

Условие $Z_2 = 0,522 \text{ Ом} < Z_{2\text{ном}} = 4 \text{ Ом}$ соблюдается.

Запишем результаты, найденные на основании расчетов, в таблицу 10.

Таблица 10 – Данные трансформатора тока ТРГ-УЭТМ-35

Значения расчетов	Заводские параметры	Установленные требования
$U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}$	$U_{\text{сет.ном}} = 35 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$
$I_{\text{раб}} = 165 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 170 \text{ А}$	$I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$
$i_{\text{уд}} = 3,13 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 102 \text{ кА}$	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}$
$B_{\text{к.расч}} = 0,173 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.ТТ}} = 1600 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.расч}} \leq B_{\text{к.ТТ}}$
$Z_2 = 0,522 \text{ Ом}$	$Z_{2\text{ном}} = 4 \text{ Ом}$	$Z_2 < Z_{2\text{ном}}$

Таким образом, выбранный трансформатор тока ТРГ-УЭТМ-35 удовлетворяет всем установленным требованиям выбора и проверки, поэтому подходит для эксплуатации на подстанции «Шацкая».

Используя полученные значения расчета трехфазного короткого замыкания для точки K_3 $I_{\text{п,0}} = 3,022 \text{ кА}$, $i_{\text{уд}} = 7,01 \text{ кА}$ (таблица 2) произведем выбор и проверку трансформатора тока, устанавливаемого на стороне НН – 10 кВ.

Свой выбор останавливаем на трансформаторе тока ТОЛ-СЭЩ-10 производства ОАО «Электроцит» г. Самара с заданными параметрами «номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 10$ кВ; номинальный первичный ток $I_{1\text{ном}} = 5-3000$ А, номинальный вторичный ток $I_{2\text{ном}} = 1-5$ А, ток термической стойкости $I_T = 40$ кА с длительностью протекания $t_T = 1$ с; вторичная нагрузка $S_2 = 60$ ВА при $\cos \varphi_2 = 0,8$; ток электродинамической стойкости $i_{\text{дин}} = 100$ кА» [14].

Произведем проверку выбранного трансформатора тока в соответствии с установленными требованиями:

1) условие на соответствие номинальному напряжению по выражению $U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$ (15):

$$U_{\text{ном}} = U_{\text{сет.ном}} = 10 \text{ кВ};$$

2) условие на соответствие номинальному длительному (рабочему) току $I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$, в соответствии с формулой (28):

$$I_{\text{раб}} = S_{\text{T.ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}) = 10000 / (\sqrt{3} \cdot 10) = 577,35 \text{ А},$$

получим выражение:

$$I_{\text{раб}} = 577,35 \text{ А} \leq I_{1\text{ном}} = 600 \text{ А},$$

где $I_{1\text{ном}}$ – номинальный первичный ток выбираем как можно ближе к рабочему току установки;

3) условие на соответствие электродинамической стойкости по выражению:

$$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}} = K_{\text{эд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\text{ном}},$$

$$i_{\text{уд}} = 7,01 \text{ кА} \leq i_{\text{дин}} = 100 \text{ кА};$$

4) условие на соответствие термической стойкости

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1\text{ном}}^2 \cdot t_T = I_T^2 \cdot t_T,$$
 где $B_{k,\text{расч}} = 0,822 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{c}$ (таблица 5), по формуле (27):

$$B_{k\text{ТТ}} = 0,822 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{c} \leq I_T^2 \cdot t_T = (40 \cdot 10^3)^2 \cdot 1 = 1600 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{c}.$$

5) условие на соответствие конструкции и классу точности:

опорный трансформатор тока с литой изоляцией имеет класс точности 0,2 [14];

б) условие на соответствие вторичной нагрузке по условию $Z_2 < Z_{2\text{ном}}$:

имеем величину сопротивления допустимой нагрузки, подключаемой ко вторичной обмотке, $Z_{2\text{ном}} = 4 \text{ Ом}$ (таблица 9);

величину сопротивления измерительных приборов, подключаемых к трансформатору тока (амперметр Э42700, имеющий мощность $S_{\text{приб}} = 0,5 \text{ ВА}$, ваттметр СК3021-5, имеющий мощность $S_{\text{приб}} = 0,7 \text{ ВА}$, и счетчик активной и реактивной энергии Меркурий 230 ART с потребляемой мощностью $S_{\text{приб}} = 0,1 \text{ ВА}$), вычислим используя формулу (30):

$$R_{\text{приб}} = S_{\text{приб}}/I_2^2 = 1,3/5^2 = 0,052 \text{ Ом};$$

значение сопротивления проводов найдем, используя формулу (31):

$$R_{\text{пр}} = \rho \cdot l_p/s = 0,0175 \cdot 40/2,5 = 0,28 \text{ Ом};$$

переходное сопротивление контактов $R_k = 0,05 \text{ Ом}$;

вторичную нагрузку трансформатора тока найдем, используя формулу (32):

$$Z_2 = R_{\text{приб}} + R_{\text{пр}} + R_k = 0,052 + 0,28 + 0,05 = 0,382 \text{ Ом};$$

Условие $Z_2 = 0,382 \text{ Ом} < Z_{2\text{ном}} = 4 \text{ Ом}$ соблюдается.

Таким образом, выбранный трансформатора тока ТОЛ-СЭЦ-10 удовлетворяет всем установленным требованиям выбора и проверки, поэтому подходит для эксплуатации на подстанции «Шацкая».

Запишем результаты, найденные на основании расчетов, в таблицу 11.

Таблица 11 – Данные трансформатора тока ТОЛ-СЭЦ-10

Значения расчетов	Заводские параметры	Установленные требования
$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{сет.ном}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$
$I_{\text{раб}} = 577,35 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 600 \text{ А}$	$I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$
$i_{\text{уд}} = 7,01 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 100 \text{ кА}$	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}$
$B_{\text{к.расч}} = 0,822 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.ТТ}} = 1600 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$	$B_{\text{к.расч}} \leq B_{\text{к.ТТ}}$
$Z_2 = 0,382 \text{ Ом}$	$Z_{2\text{ном}} = 4 \text{ Ом}$	$Z_2 < Z_{2\text{ном}}$

Вывод: Назначаем к установке на подстанции, удовлетворяющие условиям проверки, измерительные трансформаторы тока на сторонах ВН, СН, НН, соответственно: ТОГФ-110 (УХЛ1); ТРГ-УЭТМ-35; ТОЛ-СЭЦ-10.

5.4 Выбор трансформаторов напряжения

Для эксплуатации на стороне ВН – 110 кВ подстанции «Шацкая» свой выбор останавливаем на «измерительном трансформаторе напряжения ЗНОГ-110 У1 производства ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки с элегазовой изоляцией, предназначенный для передачи сигнала измерительной информации измерительным приборам и устройствам защиты, сигнализации и управления в открытых и закрытых распределительных устройствах переменного тока частоты 50 Гц с глухозаземленной и эффективно-заземленной нейтралью на номинальное напряжение 110 кВ. и Трансформаторы ЗНОГ-110 У1 взрывопожаробезопасны, что обеспечивается наличием защитного устройства и применяемыми в конструкции негорючими материалами и инертным газом» [10].

Заводские параметры трансформатора напряжения ЗНОГ-110 У1:

«первичная обмотка с номинальным напряжением $U_{\text{ном1}} = 110/\sqrt{3}$ кВ; вторичная обмотка с номинальным напряжением $U_{\text{ном2}} = 100/\sqrt{3}$ В; дополнительная вторичная обмотка с номинальным напряжением $U_{\text{ном2доп}} = 100$ В; дополнительная вторичная обмотка с классом точности 3Р с номинальной мощностью $S_{\text{ном2доп}} = 1000$ ВА; предельная мощность $S_{\text{пред}} = 1600$ ВА; средний срок службы составляет не менее 30 лет» [10].

Выбранный трансформатор напряжения должен соответствовать условию по напряжению установки $U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$:

$$U_{\text{ном1}} = 110/\sqrt{3} \text{ кВ} \leq U_{\text{сет.ном}} = 110 \text{ кВ.}$$

«Номинальную мощность основной вторичной обмотки выбираем с учетом нагрузки, потребляемой измерительными приборами, и необходимым классом точности» [8].

Условие выполняется, значит трансформатор напряжения ЗНОГ-110 У1 подходит для эксплуатации на стороне ВН – 110 кВ.

Для эксплуатации на стороне СН – 35 кВ подстанции «Шацкая» свой выбор останавливаем на «измерительном трансформаторе напряжения ЗНОЛ-СЭЦ-35-IV производства ОАО «Электроцит» г. Самара, предназначенным для обеспечения питания приборов учета электроэнергии, контрольно-измерительной аппаратуры, релейных (микропроцессорных) защит, автоматики и используются, когда требуется измерение фазных напряжений и контроль изоляции в сетях 35 кВ. Корпус трансформаторов изготавливается из эпоксидного компаунда на основе циклоалифатической смолы, который одновременно является главной изоляцией и обеспечивает защиту обмоток от механических и климатических воздействий» [14].

Заводские параметры трансформатора напряжения ЗНОЛ-СЭЦ-35-IV: «первичная обмотка с номинальным напряжением $U_{\text{ном1}} = 35/\sqrt{3}$ кВ; вторичная обмотка с номинальным напряжением $U_{\text{ном2}} = 100/\sqrt{3}$ В; дополнительная вторичная обмотка с номинальным напряжением $U_{\text{ном2доп}} =$

100/3 В; дополнительная вторичная обмотка с классом точности 3Р с номинальной мощностью $S_{\text{ном2доп}} = 100 \text{ ВА}$; предельная мощность $S_{\text{пред}} = 1000 \text{ ВА}$ » [14].

Выбранный трансформатор напряжения должен соответствовать условию по напряжению установки $U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$:

$$U_{\text{ном1}} = 35/\sqrt{3} \text{ кВ} \leq U_{\text{сет.ном}} = 35 \text{ кВ}.$$

«Номинальную мощность основной вторичной обмотки выбираем с учетом нагрузки, потребляемой измерительными приборами, и необходимым классом точности» [8].

Условие выполняется, значит, трансформатор напряжения ЗНОЛ-СЭЩ-35-IV подходит для эксплуатации на стороне СН 35 кВ.

Для эксплуатации на стороне НН – 10 кВ подстанции «Шацкая» свой выбор останавливаем на «измерительном трансформаторе напряжения ЗНОЛ-СЭЩ-10 производства ОАО «Электрощит» г. Самара, предназначенным для обеспечения питания приборов учета электроэнергии, аппаратуры, релейных защит и автоматики. Трансформаторы комплектуются съемными предохранительными устройствами (ПУ), предназначенными для защиты электрооборудования. Корпус трансформаторов изготавливается из эпоксидного компаунда, который одновременно является главной изоляцией и обеспечивает защиту обмоток от механических и климатических воздействий» [14].

Заводские параметры трансформатора напряжения ЗНОЛ-СЭЩ-10: «первичная обмотка с номинальным напряжением $U_{\text{ном1}} = 10/\sqrt{3} \text{ кВ}$; вторичная обмотка с номинальным напряжением $U_{\text{ном2}} = 100/\sqrt{3} \text{ В}$; дополнительная вторичная обмотка с номинальным напряжением $U_{\text{ном2доп}} = 100/3 \text{ В}$; дополнительная вторичная обмотка с классом точности 0,5 с номинальной мощностью $S_{\text{ном2доп}} = 75 \text{ ВА}$; предельная мощность: с двумя вторичными обмотками $S_{\text{пред}} = 630 \text{ ВА}$, с тремя вторичными обмотками $S_{\text{пред}}$

= 400 ВА» [14].

Так как трансформатор напряжения ЗНОЛ однофазный, соединенный в звезду, то его номинальная мощность для трех фаз будет иметь значение (33):

$$S_{\text{НОМ}} = 3 \cdot S_{\text{НОМ2ДОП}} = 3 \cdot 75 = 225 \text{ ВА}; \quad (33)$$

К трансформатору напряжения ЗНОЛ-СЭЦ-10 будут подключаться вольтметр, ваттметр, счетчики активной и реактивной энергии, параметры которых указаны в таблице 12.

Для удобства проведения вычислений нагрузку приборов по фазам можно не разделять, поэтому вторичную нагрузку трансформатора напряжения вычислим используя формулу (34):

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{(\sum S_{\text{приб}} \cos \varphi)^2 + (\sum S_{\text{приб}} \sin \varphi)^2} = \sqrt{P_{\text{приб}}^2 + Q_{\text{приб}}^2}, \quad (34)$$

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{P_{\text{приб}}^2 + Q_{\text{приб}}^2} = \sqrt{16,12^2 + 22,2^2} = 27,43 \text{ ВА}.$$

Запишем результаты, найденные на основании расчетов, в таблицу 12.

Таблица 12 – Значения вторичной нагрузки трансформатора напряжения

Измерительные приборы	Тип прибора	Потребляемая мощность одной катушки, ВА	Число катушек	cos φ	sin φ	Число приборов	Общая потребляемая мощность	
							P, Вт	Q, вар
Вольтметр	Ц42702	2	1	1	0	2	4	–
Ваттметр	ЩВ02.1	1,5	2	1	0	1	3	–
Счетчик активной и реактивной энергии многофункциональный	Альфа А1700	4	2	0,38	0,925	3	9,12	22,2
Итого:							16,12	22,2

«Классы точности счетчиков учета активной электроэнергии: для линий электропередач и трансформаторов (автотрансформаторов)

напряжением 110 кВ и выше – не ниже 0,2 S;

для остальных присоединений – не ниже 0,5 S.

Требования к классам точности обмоток трансформаторов тока (ТТ) и трансформаторов напряжения (ТН) для целей учета электроэнергии:

ТТ 110 кВ и выше – не хуже 0,2 S; – остальные ТТ – не хуже 0,5 S;

ТН 110 кВ и выше – не хуже 0,2; – остальные ТН – не хуже 0,5» [7].

Условие $S_{2\Sigma} = 27,43 \text{ ВА} \leq S_{\text{ном}} = 225 \text{ ВА}$ соблюдается.

Вывод: Назначаем к установке на подстанции, удовлетворяющие условиям проверки, трансформаторы напряжения на сторонах ВН, СН, НН, соответственно: ЗНОГ-110 У1; ЗНОЛ-СЭЩ-35-IV; ЗНОЛ-СЭЩ-10.

5.5 Выбор комплектного распределительного устройства

«Количество ячеек КРУ зависит от принятой схемы электрических соединений подстанции, а именно от количества ячеек: отходящих линий; ввода; секционирования; трансформаторов напряжения» [14].

Для стороны НН – 10 кВ свой выбор останавливаем на ячейке КРУ серии КРУ-СЭЩ-61М [14] со встроенным оборудованием, выбор которого был произведен ранее. Параметры оборудования заносим в таблицу 13.

Таблица 13 – Оборудование КРУ

Наименование устройства	Тип устройства
Трансформатор тока	ТОЛ-СЭЩ-10
Трансформатор напряжения	ЗНОЛ-СЭЩ-10
Высоковольтный выключатель	ВВУ-СЭЩ-Э-10
Ограничитель перенапряжения	ОПН-П-10
Трансформатор собственных нужд	ТЛС-СЭЩ

Вывод: Выбор и проверка электрооборудования на всех сторонах напряжений, назначенного к установке на подстанции, завершена. Выбранное оборудование соответствует установленным условиям проверки.

6 Релейная защита подстанции

«Короткие замыкания в электрооборудовании, к которому присоединяется трансформатор, приводят к увеличению тока сверх номинального значения. При отказе защит или выключателей смежных элементов протекание токов КЗ может оказаться значительным. Нагрев обмоток сверх допустимой температуры в этом режиме может привести к пробое изоляции и выходу из строя трансформатора на длительное время» [17].

«Поэтому в защитах трансформаторов предусматриваются устройства, действующие при внешних КЗ, с параметрами, согласованными с выдержками времени и уставками защит смежных участков. Как упоминалось выше, в качестве таких устройств используют максимальные токовые защиты, токовые защиты нулевой и обратной последовательностей, защиты с блокировкой по напряжению, дистанционные защиты. В их зону действия обычно входят шины подстанции, к которым подсоединяются выводы трансформатора, и присоединения, отходящие от этих шин. Одновременно указанные устройства резервируют основные защиты трансформатора» [17].

Релейная защита подстанции будет иметь следующий порядок:

1. На сторонах ВН и СН будут установлены блоки БМРЗ-ЛТ производства НТЦ «Механотроника», г. Санкт-Петербург. «Устройство БМРЗ-ЛТ включает в себя функции релейной защиты, автоматики, сигнализации и управления трехфазными выключателями. Для различных режимов сети предусмотрено 8 групп уставок» [11].

На стороне НН будут установлены блоки БМРЗ-100. «БМРЗ-100 обеспечивает необходимый состав функций защит и автоматики для сетей 6(10) – 35 кВ в соответствии с требованиями действующей редакции Правил устройства электроустановок (ПУЭ)» [11, 17]

2. Для защиты силовых трансформаторов подстанции, которые будут

установлены после реконструкции будет установлен современный терминал микропроцессорной релейной защиты, так как данные терминалы обязательны к установке на вновь строящихся и реконструируемых объектах согласно нормам организации ПАО «Россети».

Дифференциальная защита трансформаторов будет обеспечена устройствами БМРЗ-ТД. «Устройство БМРЗ-ТД включает в себя функции основных быстродействующих защит, измерения и сигнализации. БМРЗ-ТД обеспечивает формирование трех зон дифференциальной токовой защиты с суммарным числом трехфазных токовых плеч не более пяти: зоны дифференциальной защиты трансформатора (автотрансформатора) и две зоны защиты ошиновки, в том числе дугогасящего реактора или вольтодобавочного трансформатора» [11].

В качестве устройства, определяющего недопустимое снижение уровня масла (при утечке), устанавливается сигнальное реле уровня масла, а также газовое реле KSG, которое действует на отключение трансформатора. Оно устанавливается в маслопроводе между баком и расширителем. Выбираем более совершенное реле РГЧЗ-6 с чашеобразными элементами. «Предусмотрено три уставки срабатывания отключающего элемента по скорости потока масла: 0,6; 0,9; 1,2 м/с. При этом время срабатывания реле составляет $t_{с.р.}^3$ 0,05... 0,5 с» [19].

«Комплекты токовых защит устанавливаются со стороны питания линии для отключения выключателей. При повреждении на одном из участков сети ток повреждения проходит через все реле. Если ток короткого замыкания больше тока срабатывания защит, эти защиты придут в действие. Однако по условию селективности сработать и отключить выключатель должна только одна максимальная токовая защита – ближайшая к месту повреждения» [17].

Определим значения уставок дифференциальной защиты устанавливаемого силового трансформатора с учетом следующих данных: $S_{НОМ} = 10\ 000$ кВА, $U_{ВН} = 110$ кВ, $U_{НН} = 10$ кВ, $I_{кз} = 7,13$ кА, $k_{отс} = 1,2$ –

коэффициент отстройки, $k_{сзп} = 2,5$ – коэффициент самозапуска, $k_B = 0,8$ – коэффициент возврата.

Для расчета значения тока срабатывания защиты используем формулы (35, 36, 37):

$$I_{НОМ} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = \frac{10\,000}{\sqrt{3} \cdot 10} \approx 577,35 \text{ А}, \quad (35)$$

$$I_{сз} \geq \frac{k_{отс} \cdot k_{сзп}}{k_B} \cdot I_{НОМ} = \frac{1,2 \cdot 2,5}{0,8} \cdot 577,35 = 2165,1 \text{ А}, \quad (36)$$

$$I_{ср} = \frac{I_{сз} \cdot k_{сх}}{n_{ТА}} = \frac{2165,1 \cdot 1}{20} = 108,3 \text{ А}, \quad (37)$$

где $n_{ТА}$ – коэффициент трансформации трансформатора тока.

Ток срабатывания отсечки определяем по формулам (38, 39, 40):

$$I_{max}^{(3)'} = \frac{I_{max}^{(2)}}{n_{Т1}} = \frac{6175,4}{11} = 561,4 \text{ А}, \quad (38)$$

где $I_{max}^{(3)'}$ – максимальный ток трёхфазного КЗ на стороне НН – 10 кВ, приведенный к стороне ВН – 110 кВ

$n_{Т1}$ – коэффициент трансформации;

$$I_{со} \geq k_{отс} \cdot I_{max}^{(3)'} = 1,2 \cdot 561,4 \approx 673,7 \text{ А}, \quad (39)$$

$$I_{ср} = \frac{I_{со} \cdot k_{сх}}{n_{ТА}} = \frac{673,7 \cdot 1}{20} = 33,7 \text{ А}. \quad (40)$$

Вывод: Назначаем к установке на подстанции устройства:

релейной защиты, автоматики и сигнализации на сторонах ВН и СН – БМРЗ-ЛТ., на стороне НН - БМРЗ-100;

дифференциальной защиты трансформаторов – БМРЗ-ТД;

определяющие недопустимое снижение уровня масла – реле РГЧЗ-6.

7 Выбор трансформаторов собственных нужд и оперативного тока

Для создания нормальной работы приборов и аппаратов управления и сигнализации, а также для питания оперативных цепей релейной защиты и автоматики необходим источник оперативного тока. Для этих целей используют постоянный, выпрямленный и переменный оперативный ток [8].

В соответствии с установленными требованиями, «на всех ПС 35–750 кВ, применяется постоянный оперативный ток, источником которого служит аккумуляторная батарея (АБ), работающая с зарядно-подзарядным агрегатом в режиме постоянного подзаряда» [25].

«Для питания потребителей собственных нужд подстанции используются не менее двух трансформаторов собственных нужд (ТСН), которые обеспечивают электроэнергией электродвигатели системы охлаждения трансформаторов и синхронных компенсаторов, устройства обогрева выключателей и шкафов КРУ и КРУН, электродвигатели компрессоров и вентиляции, электрическое отопление и освещение, систему пожаротушения, оперативные цепи, системы связи и телемеханики» [25].

Для выбора ТСН определим значение мощности, расходуемой на собственные нужды подстанции, учитывая данные потребителей, представленные в таблице 14.

Таблица 14 – Значения мощности потребителей собственных нужд

Наименование	Мощность, кВт
Система охлаждения силовых трансформаторов	5
Приводы систем РПН силовых трансформаторов	2,5
Обогрев приводов оборудования по стороне 110 кВ	15
Обогрев приводов оборудования по стороне 35 кВ	10
Обогрев КРУН	15
Освещение	5
Эксплуатационные нагрузки	25
Σ	77,5

Определим полную мощность потребителей собственных нужд

подстанции по формуле (41):

$$S_{\text{сн}} = \frac{P_{\text{сн}}}{\cos \varphi} = \frac{77,5}{0,93} = 83,3 \text{ кВА.} \quad (41)$$

Значение мощности ТСН найдем используя формулу (42):

$$S_{\text{ТСН}} \geq k_c \cdot S_{\text{сн}} = 0,7 \cdot 83,3 = 58,31 \text{ кВА,} \quad (42)$$

где k_c – коэффициент спроса принимаемый равным 0,7.

Для двухтрансформаторной подстанции 110/10 кВ выбираем два трансформатора собственных нужд типа ТЛС-СЭЩ мощностью 63 кВА напряжением 10/0,4 кВ [14].

Проверим их по коэффициенту загрузки используя формулу:

$$k_z = \frac{S_{\text{сн}}}{n \cdot S_{\text{номТ}}} = \frac{83,3}{2 \cdot 63} = 0,66 < 0,7. \quad (43)$$

Вывод: По условиям проверки для эксплуатации на подстанции «Шацкая» назначаем к установке трансформатор собственных нужд типа ТЛС-СЭЩ мощностью 63 кВА напряжением 10/0,4 кВ.

8 Молниезащита подстанции

Грозовые разряды являются самым непредсказуемым и опасным природным явлением для электроустановок и электрооборудования, особенно во время их эксплуатации.

Существует статистика интенсивности грозовой деятельности, характеризующая количество ударов молний на 1 квадратный километр или 1 километр воздушной линии. «Основной мерой защиты от прямых ударов молнии является применение молниеотводов – стержневых для территориально сосредоточенных объектов и тросовых для протяженных» [17].

Учитывая требования ПУЭ, где указано, что здания ЗРУ и ПС следует защищать от прямых ударов молнии в районах с числом грозových часов в году более 20, для обеспечения молниезащиты подстанции «Шацкая» выберем одиночные стержневые молниеотводы СМ-30 (высота 30 м) [17].

«В соответствии с «Инструкцией по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций»¹ минимально допустимый уровень надежности защиты подстанции от прямых ударов молний принимаем равным $P_z=0,99$ » [20].

Чтобы найти значение высоты конуса зоны действия стержневого молниеотвода воспользуемся формулой (44), указанной в таблице 3.4 Инструкции [20]:

$$h_0 = 0,8h = 0,8 \cdot 30 = 24 \text{ м.} \quad (44)$$

Чтобы найти внешний радиус конуса зоны действия СМ воспользуемся формулой (45) указанной в таблице 3.4 Инструкции [20]:

$$r_0 = 0,8h = 0,8 \cdot 30 = 24 \text{ м.} \quad (45)$$

¹ Далее – «Инструкция».

Радиус горизонтального сечения r_x для зоны защиты требуемой надежности (рисунок 5) на высоте h_x от поверхности земли [20] определяется по формуле (46):

$$r_x = \frac{r_0(h_0 - h_x)}{h_0} = \frac{24(24 - 7)}{24} = 17 \text{ м.} \quad (46)$$

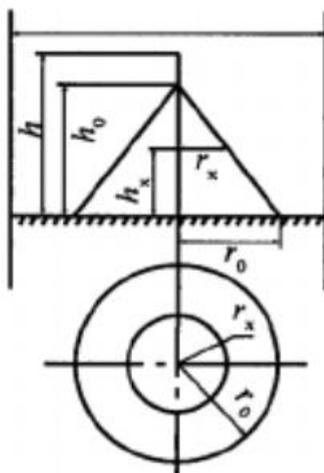


Рисунок 5 – Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода

Выполним расчет молниеотводов для установки на трансформаторных порталах аналогичным образом используя формулы (44, 45, 46):

$$\begin{aligned} h_0 &= 0,8h = 0,8 \cdot 20 = 16 \text{ м,} \\ r_0 &= 0,8h = 0,8 \cdot 20 = 16 \text{ м,} \\ r_x &= \frac{r_0(h_0 - h_x)}{h_0} = \frac{16(16 - 7)}{16} = 9 \text{ м.} \end{aligned}$$

Вывод: На основании полученных значений устройство молниезащиты подстанции «Шацкая» будет иметь следующую конструкцию:

одиночные стержневые молниеотводы СМ-30 $h = 30 \text{ м}$ – 4 шт., расположенные по периметру ПС;

одиночные стержневых молниеотводы СМ-20 $h = 20 \text{ м}$ – 2 шт., установленные на трансформаторных порталах.

9 Заземление подстанции

В случае повреждения изоляции электрооборудования подстанции, для защиты от поражения электрическим током персонала, производящего работы или проверку работы оборудования, применяется комплекс мер защиты, где одним из основных устройств является защитное заземление [17].

Для сооружения защитного заземления подстанции применяются как естественные (фундаменты зданий и опор, и их металлические части) так и искусственные (горизонтальные и вертикальные неизолированные металлические стержни, уголки, полосы) заземлители, надежно соединенные с землей, то есть погруженные в почву. В качестве вертикальных искусственных заземлителей целесообразно использовать металлические стержни (уголки), а в качестве горизонтальных – металлические полосы [17].

В соответствии с размерами подстанции построим схему заземления, представленную на рисунке 6, которая необходима нам для проведения расчетов по определению разности потенциалов заземлителя.

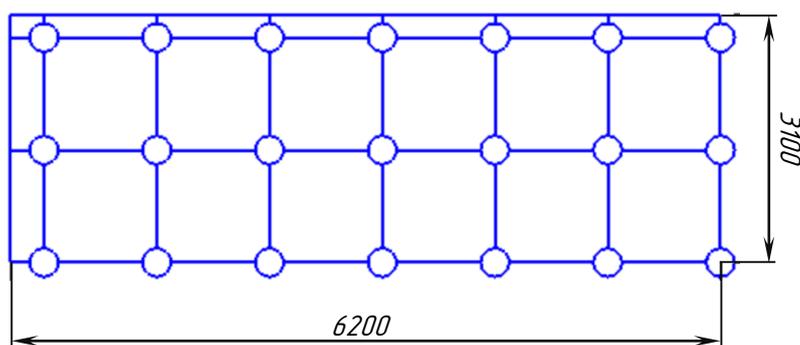


Рисунок 6 – Схема заземления

Сначала, найдем коэффициент сопротивления тела человека, значение которого определяется с помощью формулы (47):

$$\beta = \frac{R_{\text{ч}}}{R_{\text{ч}} + R_{\text{с}}} = \frac{1000}{1000 + 1,66 \cdot 500} = 0,38, \quad (47)$$

где $R_{\text{ч}}$ – сопротивление тела человека, Ом;

$R_{\text{с}}$ – сопротивление, определяемое как произведение удельного сопротивления земли $\rho_{\text{в.с.}}$ и коэффициента сопротивления грунта для вертикального заземлителя, Ом [17].

Значение удельного сопротивления земли для производства расчетов и построения заземления для подстанции «Шацкая» возьмем из таблицы величины расчётного электрического удельного сопротивления грунта в соответствии с картой грунтов Шацкого района Рязанской области, которое будет составлять 500 Ом·м (песчаник).

На практике следует принимать сезонное значение удельного сопротивления земли, соответствующее наиболее неблагоприятным условиям [17].

Затем, найдем коэффициент напряжения прикосновения, значение которого определяется с помощью формулы (48):

$$k_{\text{П}} = \frac{M \cdot \beta}{\left(\frac{l_{\text{В}} \cdot L_{\text{Г}}}{a \cdot \sqrt{S}}\right)^{0,45}} = \frac{0,5 \cdot 0,38}{\left(\frac{5 \cdot 496}{10 \cdot \sqrt{62 \cdot 31}}\right)^{0,45}} = 0,087, \quad (48)$$

где M – параметр, определяемый как отношение ρ_1 / ρ_2 ;

$l_{\text{В}}$ – длина вертикального заземлителя, м;

a – расстояние между вертикальными заземлителями, м;

$L_{\text{Г}}$ – суммарная длина горизонтальных заземлителей, м

($4 \cdot 62 \text{ м} + 8 \cdot 31 \text{ м} = 496 \text{ м}$);

S – площадь устройства заземления, м².

Потом, найдем разность потенциалов заземлителя, значение которого определяется с помощью формулы (49):

$$U_{\text{з}} = \frac{U_{\text{пр.доп}}}{k_{\text{П}}} = \frac{500}{0,087} = 5747 \text{ В}, \quad (49)$$

где $U_{\text{пр.доп}}$ – допустимое напряжение прикосновения при длительности воздействия $\tau = 0,07$ с [17].

Теперь найдем значение сопротивления устройства заземления используя выражение (50):

$$R_3 \leq \frac{U_3}{I_3} = \frac{5747}{4252} = 1,35 \text{ Ом}, \quad (50)$$

где I_3 – расчетный ток однофазного к.з. на стороне ВН.

Чтобы найти длину стороны схемы заземления, которая по форме соответствует квадрату, воспользуемся формулой (51):

$$a = \sqrt{S} = \sqrt{1922} = 43,84 \text{ м}. \quad (51)$$

Чтобы найти число ячеек по стороне схемы заземления воспользуемся формулой (52):

$$m = \frac{L_{\Gamma}}{2 \cdot \sqrt{S}} = \frac{496}{2 \cdot 43,84} = 5,67 \approx 6 \text{ м}. \quad (52)$$

Чтобы найти длину полос горизонтальных заземлителей схемы заземления воспользуемся формулой (53):

$$L'_{\Gamma} = 2\sqrt{S}(m + 1) = 2 \cdot 43,84 \cdot (6 + 1) = 613,76 \text{ м}. \quad (53)$$

Чтобы найти длину сторон ячейки схемы заземления воспользуемся формулой (54):

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m} = \frac{43,84}{6} = 7,31 \text{ м}. \quad (54)$$

Чтобы найти число вертикальных заземлителей, расположенных по периметру схемы заземления, воспользуемся формулой (55):

$$n_B = \frac{4\sqrt{S}}{l_B} = \frac{4 \cdot 43,84}{5} = 35,072 \approx 35. \quad (55)$$

Чтобы найти длину вертикальных заземлителей схемы заземления воспользуемся формулой (56):

$$L_{B\Sigma} = l_B n_B = 5 \cdot 35 = 175 \text{ м.} \quad (56)$$

Чтобы найти глубину погружения вертикальных заземлителей воспользуемся формулой (57):

$$H_{\text{отн}} = \frac{l_B + t}{\sqrt{S}} = \frac{5 + 0,7}{43,84} = 0,13 > 0,1. \quad (57)$$

Чтобы найти значение напряжения прикосновения воспользуемся формулой (58):

$$U_{\text{пр}} = k_{\text{п}} \cdot I_3 \cdot R_3 = 0,087 \cdot 4252 \cdot 1,35 = 499,4 \text{ В.} \quad (58)$$

Вывод: Найденное значение напряжение прикосновения не превышает допустимое значение 500 В, поэтому проектируемое заземляющее устройство для подстанции «Щацкая» целесообразно к применению.

Заключение

В представленной выпускной квалификационной работе решалась комплексная задача, по реконструкции подстанции «Шацкая», включающей вычисление электрических параметров нагрузки и токов к.з., а также подбор электрооборудования, необходимого для эксплуатации трансформаторной подстанции, а также устройств молниезащиты и заземления.

При выполнении работы достигнута основная цель – получен опыт и навыки в применении теоретических и практических знаний для проведения реконструкции (проектирования) трансформаторной подстанции с подбором электрооборудования для её эффективной эксплуатации, необходимого для надежного электроснабжения потребителей.

В процессе выполнения работы и проведения исследований предложены к установке на подстанции «Шацкая» новые трансформаторы производства ООО «Тольяттинский трансформатор» типа ТДТН-10000/110-У1, что вызвано необходимостью замены находящихся в настоящее время в эксплуатации с 1976 и 1994 годов силовых трансформаторов (1*10+1*25 МВА). Определена оптимальная схема электрической подстанции. Найдены значения токов короткого замыкания и на их основе произведен выбор типа оперативного тока, трансформаторов собственных нужд и другого электрического оборудования (высоковольтные выключатели, разъединители, трансформаторы тока и напряжения, комплектное распределительное устройство), необходимого при эксплуатации подстанции, а также систем релейной защиты, молниезащиты и заземления. При выборе основного оборудования учитывались параметры его работы при нормальном и максимальном режимах. Проводилась проверка оборудования на термическую и электродинамическую стойкость при коротких замыканиях.

Все проектные решения были нацелены на надежное обеспечение электроэнергией потребителей города Шацк и Шацкого района.

Список используемых источников

1. ГОСТ 12965-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110 и 150 кВ. Технические условия. General-purpose 110 and 150 kV power oil transformers. Specifications. Государственный стандарт Союза ССР утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 26 сентября 1985 г. N 3055: разработан Министерством электротехнической промышленности СССР. – Москва: Издательство стандартов, 1985. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012412> (дата обращения 08.08.2021).

2. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки (с Изменением № 1) = General-purpose oil-immersed power transformers. Permissible loads: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 31.01.85 № 236: введен взамен ГОСТ 14209-69; дата введения 1985-07-01 / разработан Министерством электротехнической промышленности СССР. – Москва: Стандартиформ, 2009. – 37 с. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-14209-85> (дата обращения 30.07.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст: электронный.

3. ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. Введ. 2008-07-01. М.: Стандартиформ, 2019. 36 с.

4. Завод электротехнического оборудования: ЗАО «ЗЭТО»: [сайт] / ЗАО «ЗЭТО». – URL: <http://zeto.ru> (дата обращения 5.09.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст: электронный.

5. ЗАО «ГК «Электрощит» – ТМ Самара»: [сайт] / ЗАО «ГК «Электрощит». – URL: <http://electroshield.nt-rt.ru> (дата обращения 14.08.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст: электронный.

6. Инструкция по оформлению цитат и ссылок на первоисточники.

[сайт] / Тольяттинский государственный университет. – URL: https://www.tltsu.ru/upravlenie/educational-methodical-management/regulatory-documents-of-educational-process/index.php?sphrase_id=2565637 (дата обращения 14.09.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст: электронный.

7. Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные и методические материалы для выполнения квалификационных работ: учебно-справочное пособие для вузов / Крючков И.П., Пираторов М.В., Старшинов В.А.; под ред. Крюčkова И.П. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2015. – 138 с. – ISBN 978-5-383-00958-1. – Текст: электронный // ЭБС «Консультант студента»: [сайт]. – URL: http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN_9785383012703 (дата обращения: 06.09.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

8. Кулеева, Л.И. Проектирование подстанции: учебное пособие / Кулеева Л.И., Митрофанов С.В., Семенова Л.А. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2016. – 111 с. – ISBN 978-5-7410-1542-1. – Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/69935.html> (дата обращения: 04.08.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

9. Номенклатурный каталог. Завод «Энергон» г. Воронеж. [Электронный ресурс]. URL: <https://forca.ru/vyklyuchateli/elegazovye/vgt-110ii-40/2500.html> (дата обращения 05.09.2021).

10. Номенклатурный каталог. ЗАО «ЗЭТО» г. Великие Луки. [Электронный ресурс]. URL: https://zeto.ru/products_and_services/high_voltage_equipment (дата обращения 06.09.2021).

11. Номенклатурный каталог. НТИЦ «Механотроника». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mtrele.ru/shop/relejnaya-zashhita/bmrz/> (дата обращения 12.09.2021).

12. Номенклатурный каталог. Тольяттинский трансформатор. [Электронный ресурс]. URL: http://toltrans.ntrt.ru/images/showcase/catalogue_

toltrans.pdf (дата обращения 23.08.2021).

13. Номенклатурный каталог. Уралэлектротяжмаш. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.uetm.ru/katalogproduktsii/item> (дата обращения 05.09.2021).

14. Номенклатурный каталог. Электрощит Самара. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.electroshield.ru/catalog> (дата обращения 05.09.2021).

15. ОАО «Электроприбор»: [сайт] / ОАО «Электроприбор». – URL: <https://www.elpribor.ru> (дата обращения 14.09.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст: электронный.

16. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Москва: ИНФРА-М, 2018. – 262 с. – Текст: электронный. – URL: <https://new.znaniium.com/catalog/product/944357> (дата обращения: 04.08.2021).

17. Правила устройства электроустановок. Главы 1.4, 1.7, 3.2, 4.1, 4.2. / 7-е изд. – Москва: ЭНАС, 2013. – 104 с. – ISBN 978-5-4248-0036-8. – Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/76191.html> (дата обращения: 04.08.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

18. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций / Рожкова Л.Д., Корнеева Л.К., Чиркова Т.В. – 2-е изд., стер. – Москва: Издательский центр «Академия», 2005. – 448 с. – Текст: электронный. – URL: <http://library.nuft.edu.ua/ebook/file/rojkoval.pdf> (дата обращения: 05.08.2021).

19. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования: РД 153-34.0-20.527-98/ под ред. Б.Н. Неклепаева. – Москва: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2006. – 152 с. – URL: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4294817/4294817179.pdf> (дата обращения 30.07.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст: электронный.

20. СО 153-34.21.122-2003 Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. ЦПТИ ОРГРЭС, 2017. 69 с.

21. Старшинов, В.А. Электрическая часть электростанций и подстанций: учебное пособие / Старшинов В.А., Пираторов М.В., Козина М.А.; под ред. Старшинова В.А. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2015. – 296 с. – ISBN 978-5-383-00874-4. – Текст: электронный // ЭБС «Консультант студента»: [сайт]. – URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383012611.html> (дата обращения: 06.09.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

22. СТО 34.01-3.1-002-2016 Типовые технические решения подстанций 6–110 кВ: [сайт] / ПАО «ФСК ЕЭС». – URL: https://www.rosseti.ru/investment/standart/corp_atandart/doc/34.01-3.1-002-2016.pdf (дата обращения 8.09.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст: электронный.

23. СТО 56947007-29.240.30.010-2008 Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35–750 кВ. Типовые решения: [сайт] / ПАО «ФСК ЕЭС». – URL: <http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.240.30.010-2008.pdf> (дата обращения 8.09.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст: электронный.

24. СТО 56947007– 29.240.30.047-2010 Рекомендации по применению типовых принципиальных электрических схем распределительных устройств подстанций 35–750 кВ [сайт] / ПАО «ФСК ЕЭС». – URL: <http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.240.30.047-2010.pdf> (дата обращения 8.09.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст: электронный.

25. СТО 56947007-29.240.10.248-2017 Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ (НТП ПС.): [сайт] / ПАО «ФСК ЕЭС». – URL: <http://www.fsk->

ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.10.248-2017.pdf (дата обращения 8.09.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст: электронный.

26. Схемы электрических соединений подстанций: учебное пособие / Кокин С.Е., Дмитриев С.А., Хальясмаа А.И., – 2-е изд., стер. – Москва: Флинта, Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 100 с. – ISBN 978-5-9765-3134-5 – Текст: электронный. – URL: <https://new.znanium.com/catalog/product/947712> (дата обращения: 04.08.2021).

27. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций: учебное пособие / Немировский А.Е., Сергиевская И.Ю., Крепышева Л.Ю. – 2-е изд., доп. – Москва: Инфра-Инженерия, 2018. – 148 с.: 60 × 84 1/16 (Переплёт). – ISBN 978-5-9729-0207-1. – Текст: электронный. – URL: <https://new.znanium.com/catalog/product/989739> (дата обращения: 04.08.2021).