

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 системы электроснабжения ПС 35/10 кВ «КС Рождественская»  
Ставропольского УПХГ

Обучающийся

А.Г. Арефьев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Д. Л. Спиридонов

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

Тольятти 2022

## Аннотация

Пояснительная записка содержит 47 страниц, графическая часть выполнена в виде презентации, 6 источников.

Ключевые слова: реконструкция, электроснабжение, распределительное устройство, трансформатор, оборудование.

Объектом исследования являются ПС «Рождественская» 35/10 кВ Ставропольского УХПГ.

Цель работы – разработка проекта реконструкции системы электроснабжения ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» Ставропольского УПХГ в соответствии с актуальной нагрузкой.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- сбор общих сведений об объекте исследования;
- обоснование необходимости реконструкции;
- расчет актуальной нагрузки подстанции;
- выбор силовых трансформаторов подстанции;
- выбор линий электроснабжения;
- выбор коммутационного оборудования подстанции;
- расчет релейной защиты оборудования подстанции;
- расчет заземления и молниезащиты.

В результате выполнения работы проведены расчеты низковольтных и высоковольтных линий, выбраны трансформаторы, рассчитаны электрические нагрузки, потери напряжений в линиях, выбраны сечения кабелей.

## Содержание

Введение.....	4
1 Общая часть .....	5
1.1 Краткая характеристика Ставропольского УПХГ .....	5
1.2 Описание системы электроснабжения .....	6
2 Разработка системы электроснабжения.....	8
2.1 Определение расчетной нагрузки подстанции .....	8
2.2 Выбор силовых трансформаторов.....	13
2.3 Расчет токов КЗ .....	15
2.4 Выбор оборудования ПС .....	25
3 Релейная защита .....	33
3.1 Релейная защита и автоматика силового трансформатора .....	33
3.2 Релейная защита отходящих линий.....	36
Заключение .....	44
Список используемых источников.....	46

## Введение

Модернизация системы электроснабжения является сложным и ответственным процессом.

Цель работы – разработка проекта реконструкции системы электроснабжения ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» Ставропольского УПХГ в соответствии с актуальной нагрузкой.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- анализ системы электроснабжения объекта исследования;
- расчет электрических нагрузок потребителей подстанции;
- выбор силовых трансформаторов подстанции;
- выбор линий электроснабжения;
- выбор коммутационного оборудования подстанции;
- расчет релейной защиты оборудования подстанции;
- расчет заземления и молниезащиты.

Объектом исследования в представленной работе схемы является ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» Ставропольского УПХГ.

Предмет исследования – электроснабжение кустовых площадок, расположенных в непосредственной близости от подстанции

## **1 Общая часть**

### **1.1 Краткая характеристика Ставропольского УПХГ**

Филиал «Ставропольское УПХГ» эксплуатирует самое крупное в России и в мире Северо-Ставропольское подземное хранилище газа с двумя объектами хранения: Хадумский горизонт и Зеленая свита [1].

В состав Ставропольского ПХГ входят следующие структурные подразделения:

- аппарат управления;
- отдел охраны труда и промышленной безопасности;
- три оперативно-производственные службы;
- газокompрессорная служба;
- механоремонтная служба;
- служба энерговодоснабжения;
- служба автоматизации и телемеханизации производства;
- производственно-диспетчерская служба;
- геологическая служба;
- цех производственных работ;
- участок по ремонту зданий и сооружений;
- служба защиты от коррозии
- отдел материального снабжения;
- служба связи;
- служба по внедрению и обслуживанию АСУ;
- отдел службы безопасности.

Объект расположен в умеренно-континентальной климатической зоне. Климатические условия в районе расположения объекта, в целом, характеризуются значительными амплитудами суточных и сезонных изменений температуры воздуха, неравномерным распределением по сезонам количества выпадающих осадков с максимумом в мае-июне [2].

Характеристика климатических условий приведена в таблице 1.

## 1.2 Описание системы электроснабжения

Площадка ПС расположена по адресу: Ставропольский край, Изобильненский район, Рождественский сельский совет, ст. Рождественская.

ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» предназначена для электроснабжения потребителей объектов:

КС Рождественская – Ставропольского УПХГ;

вдольтрассовых ВЛ-10 кВ – Ставропольского ЛПУМГ.

Основными потребителями сети 10 кВ являются площадные ТП-10/0,4 кВ КС Рождественская.

Однолинейная схема электроснабжения приведена на рисунке 1.

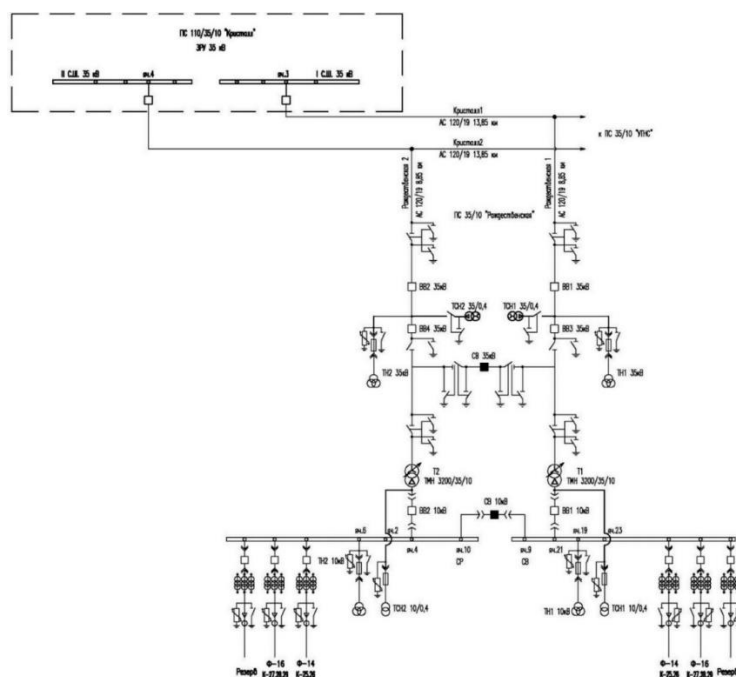


Рисунок 1 – Однолинейная схема электроснабжения ПС 35/10 кВ «КС Рождественская»

На рисунке 1.2 видно, что ПС 35/10 кВ питает 5 кустовых площадок – №25, 26, 27, 28 и 29. В дальнейшем планируется подключение еще четырех

кустовых площадок – №30, 31, 32 и 33. В связи с увеличением мощности и количества потребителей, необходимо провести реконструкцию оборудования ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» [3].

Состав объектов реконструкции ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Состав объектов реконструкции ПС 35/10 кВ «КС Рождественская»

Наименование объекта	Местоположение объекта	Год постройки	Краткая характеристика объекта
Здание закрытого распределительного устройства фидерного пункта КС	Ставропольский край, Изобильненский район, ст. Рождественская	1979	Площадь общая S=126,82 м <sup>2</sup> ; Высота = 4,0 м.
Трансформатор масл. №1 ТМ 3200-35/10 кВ КС Рождественская	Ставропольский край, Изобильненский район, ст. Рождественская	1966	Силовой трансформатор 1 шт; Тип ТМ 3200/35/10; Мощность 3200 кВА
Трансформатор масл. №2 ТМ 3200-35/10 кВ КС Рождественская	Ставропольский край, Изобильненский район, ст. Рождественская	1964	Силовой трансформатор 1 шт; Тип ТМ 3200/35/10; Мощность 3200 кВА
Открытое распределительное устройство 10 кВ ФП КС	Ставропольский край, Изобильненский район, ст. Рождественская	1978	Выключатель ВВ/TEL-10; разрядник РВС-10
Распред. Устройство 35 кВ 2 секции шин подстанции КС	Ставропольский край, Изобильненский район, ст. Рождественская	1979	Разъединитель РЛНДЗ-5; разрядник РВС; предохранитель ПСН-35
Открытое распред. устройство 35 кВ 1 секция шин	Ставропольский край, Изобильненский район, ст. Рождественская	1979	Разъединитель РЛНДЗ-5; разрядник РВС; предохранитель ПСН-35

Вывод по разделу 1.

В данном разделе приведено основное оборудование понизительной подстанции 35/10 кВ. На основании исходных данных проведем в дальнейшем расчет нагрузок понизительной подстанции

## 2 Разработка системы электроснабжения

### 2.1 Определение расчетной нагрузки подстанции

На стадии проектирования очень важно верно определить электрические нагрузки предприятия, так как от этого зависит выбор оборудования системы электроснабжения предприятия.

Существуют несколько методов расчета нагрузки промышленного предприятия.

Расчет электрических нагрузок потребителей подстанции будет выполнен на основании установленной мощности потребителей и их коэффициента спроса [6].

Сведения о установленной мощности и коэффициентах спроса потребителей ПС 35/10 кВ приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Сведения о установленной мощности и коэффициентах спроса

Наименование потребителей	$P_y$ , кВт	$K_c$	$\cos\varphi$
Куст №25	367,92	0,9	0,91
Куст №26	319,54	0,9	0,91
Куст №27	373,45	0,9	0,91
Куст №28	270,05	0,9	0,91
Куст №29	441,84	0,9	0,91
Куст №30	126,46	0,9	0,91
Куст №31	561,45	0,9	0,91
Куст №32	481,00	0,9	0,91
Куст №33	283,70	0,9	0,91
Итого:	3225,41		

Активные и реактивные расчетные нагрузки кустовых площадок определяются по формулам [23]:

$$P_p = P_y \cdot K_c \quad (1)$$



$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2)$$

где  $P_p$  – активная мощность потребителя, кВт;

$Q_p$  – реактивная мощность потребителя, квар;

$k_c$  – коэффициент спроса объекта [23];

$\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент мощности объекта.

Для примера произведем расчет кустовой площадки №25.

Исходные данные для расчета (по таблице 3):

$$P_{\text{уст}} = 367,92 \text{ кВт};$$

$$k_c = 0,9;$$

$$\cos \varphi = 0,85;$$

$$\operatorname{tg} \varphi = 0,62.$$

Таким образом, для кустовой площадки №25 расчетная активная мощность составит:

$$P_p = 367,92 \cdot 0,9 = 331,13 \text{ кВт}$$

Расчетная реактивная мощность для кустовой площадки №25 составит:

$$Q_p = 331,13 \cdot 0,62 = 205,21 \text{ квар}$$

Для остальных потребителей расчеты выполняются аналогично.

Полная расчетная мощность потребителей вычисляется по формуле:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (3)$$

$$S_p = \sqrt{2902,87^2 + 1799,04^2} = 3415,14 \text{ кВА}$$

Далее необходимо выполнить расчет потерь мощности на подстанции:

$$\Delta P_{\text{тр.ГПП}} = 0,02 \cdot S_{p\Sigma} = 0,02 \cdot 3415,14 = 68,30 \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_{\text{тр.ГПП}} = 0,10 \cdot S_{p\Sigma} = 0,10 \cdot 3415,14 = 341,51 \text{ квар}$$

Тогда, полная расчетная мощность подстанции со стороны высокого напряжения с учетом потерь мощности в силовых трансформаторах можно определить по формуле:

$$S_p = \sqrt{(P_{p\Sigma} + \Delta P_{\text{тр.ГПП}})^2 + (Q_{p\Sigma} + \Delta Q_{\text{тр.ГПП}})^2} \quad (4)$$

Для ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» полная расчетная мощность составит:

$$S_p = \sqrt{(2902,87 + 68,30)^2 + (1799,04 + 341,51)^2} = 3661,94 \text{ кВА}$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Расчет силовой нагрузки

Наименование потребителей	$P_y$ , кВт	$K_c$	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_{p\Sigma}$ , кВА	$\Delta P_{тр}$ , кВт	$\Delta Q_{тр}$ , квар	$S_p$ , кВА
Куст №25	367,92	0,9	0,85	0,62	331,13	205,21	389,56	7,79	38,96	417,71
Куст №26	319,54	0,9	0,85	0,62	287,59	178,23	338,34	6,77	33,83	362,79
Куст №27	373,45	0,9	0,85	0,62	336,11	208,30	395,42	7,91	39,54	424,00
Куст №28	270,05	0,9	0,85	0,62	243,05	150,63	285,94	5,72	28,59	306,60
Куст №29	441,84	0,9	0,85	0,62	397,66	246,45	467,83	9,36	46,78	501,64
Куст №30	126,46	0,9	0,85	0,62	113,81	70,54	133,90	2,68	13,39	143,57
Куст №31	561,45	0,9	0,85	0,62	505,31	313,16	594,48	11,89	59,45	637,44
Куст №32	481,00	0,9	0,85	0,62	432,90	268,29	509,29	10,18	50,93	546,10
Куст №33	283,70	0,9	0,85	0,62	255,33	158,24	300,39	6,00	30,04	322,09
Итого:	3225,41	0,9	0,85	0,62	2902,87	1799,04	3415,14	68,30	341,51	3661,94

Стоит учесть, что перед определением мощности силовых трансформаторов необходимо выполнить расчет компенсации реактивной мощности.

Для выбора мощности компенсирующих устройств необходимо определить расчетную мощность компенсирующего устройства:

$$Q_{кр} = \alpha \cdot P_p \cdot (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_k) \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий повышение коэффициента мощности естественным способом, принимается равным 0,9.

$P_p$  – расчетная активная мощность, согласно таблице 4.

$\operatorname{tg}\varphi$  – фактический коэффициент реактивной мощности, согласно таблице 4.

$\operatorname{tg}\varphi_k$  – требуемый коэффициент реактивной мощности, равный 0,4.

$$Q_{кр} = 0,9 \cdot 2902,87 \cdot (0,62 - 0,4) = 574,76 \text{ квар}$$

По результатам расчетов выбирается конденсаторная установка мощностью 600 квар напряжением 10,5 кВ. Компенсирующее устройство будет подключено к секциям шин 10 кВ ПС 35/10 кВ.

После установки компенсирующего устройства коэффициент мощности на шинах 10 кВ ПС 35/10 кВ составит:

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{факт}} = \operatorname{tg} \varphi - \frac{Q_{\text{КУ}}}{\alpha \cdot P_{\text{P}}} \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{факт}} = 0,62 - \frac{600}{0,9 \cdot 2902,87} = 0,39$$

Что соответствует:

$$\cos \varphi_{\text{факт}} = \cos(\operatorname{arctg}(\varphi_{\text{факт}})) \quad (7)$$

$$\cos \varphi_{\text{факт}} = 0,93$$

Результат расчета электрической нагрузки подстанции с учетом компенсации реактивной мощности приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Расчет силовой нагрузки с учетом компенсации реактивной мощности

Наименование потребителей	$P_{\Sigma}$ , кВт	$K_c$	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$P_{\text{P}}$ , кВт	$Q_{\text{P}}$ , квар	$S_{\text{P}\Sigma}$ , кВА	$\Delta P_{\text{тр}}$ , кВт	$\Delta Q_{\text{тр}}$ , квар	$S_{\text{P}}$ , кВА
Куст №25	367,92	0,9	0,93	0,40	331,13	130,87	356,05	7,12	35,61	377,00
Куст №26	319,54	0,9	0,93	0,40	287,59	113,66	309,23	6,18	30,92	327,42
Куст №27	373,45	0,9	0,93	0,40	336,11	132,84	361,40	7,23	36,14	382,67
Куст №28	270,05	0,9	0,93	0,40	243,05	96,06	261,34	5,23	26,13	276,72
Куст №29	441,84	0,9	0,93	0,40	397,66	157,16	427,59	8,55	42,76	452,74
Куст №30	126,46	0,9	0,93	0,40	113,81	44,98	122,38	2,45	12,24	129,58
Куст №31	561,45	0,9	0,93	0,40	505,31	199,71	543,34	10,87	54,33	575,31
Куст №32	481	0,9	0,93	0,40	432,90	171,09	465,48	9,31	46,55	492,86
Куст №33	283,7	0,9	0,93	0,40	255,33	100,91	274,55	5,49	27,46	290,70
Итого:	3225,41	-	-	-	2902,87	1147,29	3121,36	62,43	312,14	3304,98

На основании проеденных расчетов проведем выбор силовых трансформаторов.

## 2.2 Выбор силовых трансформаторов

Основным вопросом построения рациональной схемы электроснабжения является определение числа и мощности силовых трансформаторов, необходимых для бесперебойного энергоснабжения потребителей предприятия.

Число силовых трансформаторов зависит от категории надежности потребителей предприятия.

Так, для электроснабжения потребителей третьей категории надежности достаточно трансформаторной подстанции с одним силовым трансформатором.

Для электроснабжения потребителей второй категории надежности требуется трансформаторная подстанция с двумя силовыми трансформаторами.

Для электроснабжения потребителей первой категории надежности требуется, также, как и для электроснабжения второй категории надежности, трансформаторная подстанция с двумя силовыми трансформаторами, но уже с устройством АВР.

Выбор мощности силовых трансформаторов зависит от ряда условий:

- полной расчетной нагрузки потребителей, запитанных от рассматриваемой подстанции;
- количества требуемых силовых трансформаторов в зависимости от категории надежности потребителей;
- оптимальный коэффициент загрузки силовых трансформаторов, который зависит, также, от категории надежности потребителей.

Потребители подстанций имеют 1 категорию надежности электроснабжения. Для питания потребителей 1 категории надежности требуется два силовых трансформатора.

Расчетная номинальная мощность силового трансформатора, необходимого к установке на ПС 35/10 кВ составит:

$$S_{\text{номТР}} = \frac{S_p}{n \cdot k_3} \quad (8)$$

где:  $S_p$  – полная расчетная мощность, кВА;

$n$  – количество трансформаторов;

$k_3$  – коэффициент загрузки, для потребителей I категории  $K_3 = 0,7$ .

Также стоит отметить, что при проектировании РУ-10 кВ необходимо предусмотреть 4 резервные ячейки с запасом мощности 3000 кВА.

Таким образом, номинальная мощность силовых трансформаторов, необходимых к установке на ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» составит:

$$S_{\text{номТР}} = \frac{3304,98 + 3000}{2 \cdot 0,7} = 4504 \text{ кВА}$$

По расчетному значению выбраны два силовых трансформатора мощностью 6300 кВА.

Далее необходимо проверить выбранные силовые трансформаторы на перегрузочную способность, в случае отключения одного из трансформаторов [5]:

$$1,4 \cdot S_{\text{ТР}} \geq S_p \quad (9)$$

$$1,4 \cdot 6300 = 8820 \geq 4504$$

Условие выполняется. Таким образом, два силовых трансформатора мощностью 6300 кВА проходит по условию аварийной перегрузки и обеспечивают требуемый уровень надежности на ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» [4].

Определим коэффициент загрузки трансформатора в нормальном режиме по формуле:

$$k_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{\text{номТР}}} \quad (10)$$

$$k_3 = \frac{3304,98 + 3000}{2 \cdot 6300} = 0,5$$

По результатам выполненных расчетов по выбору силовых трансформаторов были выбраны два масляных трансформатора ТМН 6300/35/10 кВ [6].

### 2.3 Расчет токов КЗ

Для проверки выбранного защитного оборудования и настройки устройств релейной защиты необходимо выполнить расчет токов короткого замыкания.

В данном случае, требуется определить токи короткого замыкания на шинах НН и ВН ПС 35/10 кВ.

Для расчета токов короткого замыкания выполняется расчетная схема для определения места токов короткого замыкания и элементов, влияющих на величину короткого замыкания. После чего, составляется схема замещения, на которой наносятся активные и индуктивные сопротивления расчетной схемы. В соответствии со схемой замещения определяется общее сопротивление системы электроснабжения до места тока короткого замыкания.

Расчетная схема представлена на рисунке 2.

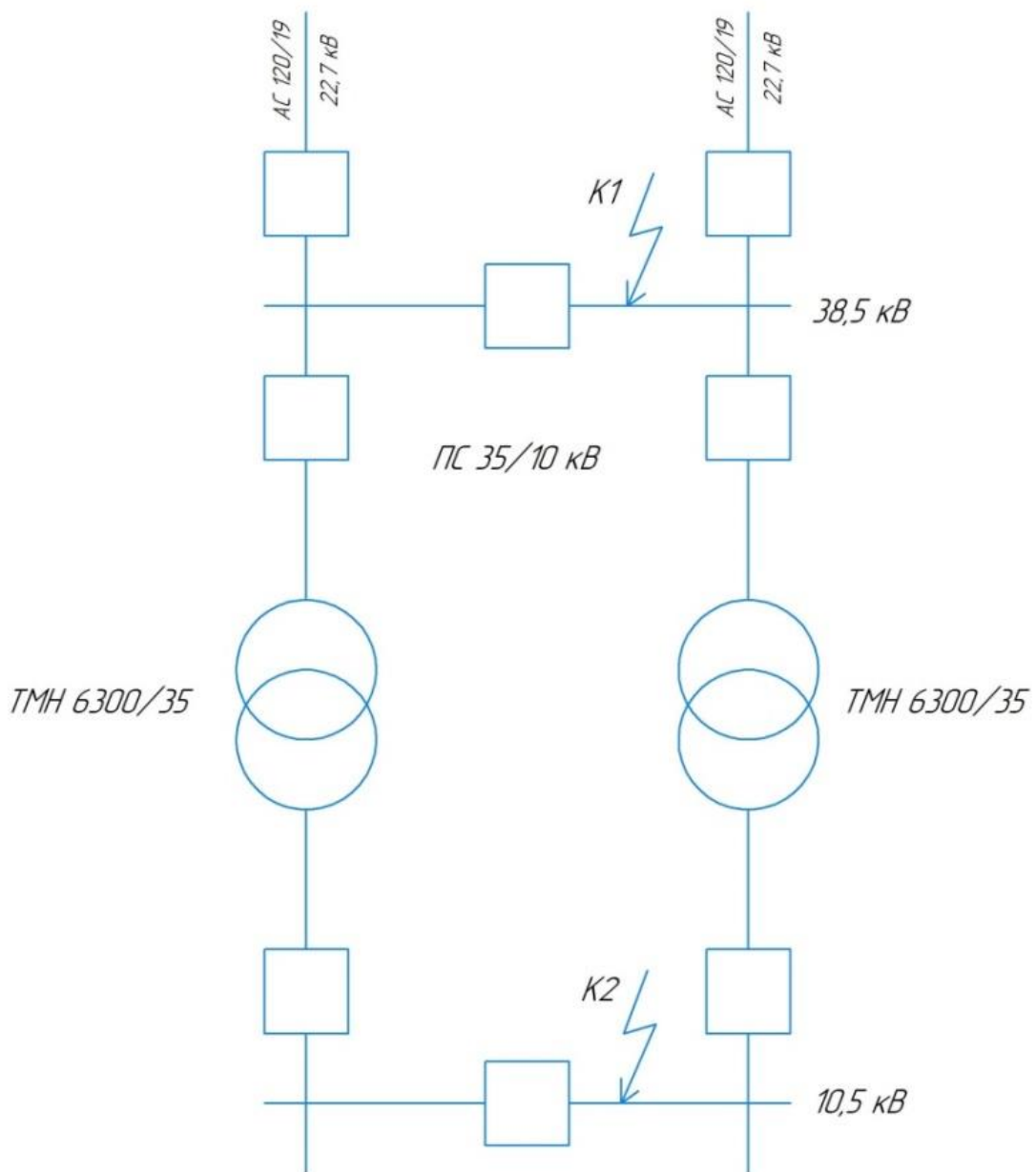


Рисунок 2 – Расчетная схема

Схема замещения представлена на рисунке 3.



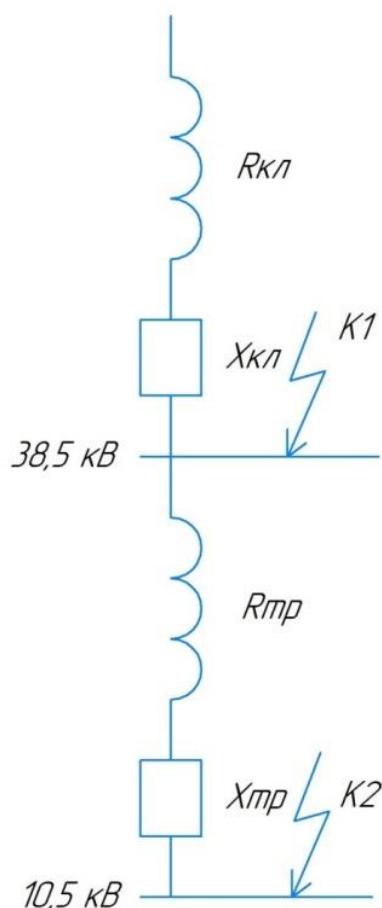


Рисунок 3 – Схема замещения

В соответствии с расчетной схемой, точка КЗ К1 находится на шинах 35 кВ ПС 35/10 кВ. Базисное напряжение больше на 5%, чем номинальное значение [7]. Таким образом, для точки К1 базисное значение напряжения составит:

$$U_{б1} = 38,5 \text{ кВ}$$

Так как ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» запитана от двух разных ПС 110/35/10 кВ, значение тока КЗ для разных центров питания будет различаться. Так, максимальное значение тока КЗ в центре питания составит 1,547 кА. Минимальное значение тока КЗ в центре питания составит 0,922 кА.

В соответствии со схемой замещения, результирующее сопротивление до точки К1 будет складываться из сопротивления воздушной линии, а также сопротивления системы [8].

Реактивное сопротивление системы определяется по формуле:

$$X_C = Z_C = \frac{U_{61}}{\sqrt{3} \cdot I_C} \quad (11)$$

Реактивное сопротивление системы для максимального значения тока КЗ составит:

$$X_C = Z_C = \frac{38,5}{\sqrt{3} \cdot 1,547} = 14,385 \text{ Ом}$$

Активное значение сопротивления системы не учитывается в данном случае, в связи с тем, что его значение слишком мало по сравнению с реактивным [10].

Питание ПС 35/10 кВ осуществляется по двум воздушным линиям АС 120/19 протяженностью 22,7 км. \_x0001\_

Далее определяется реактивное сопротивление воздушной линии:

$$X_{\text{кЛ}} = X_0 \cdot L_{\text{кЛ}} \quad (12)$$

где  $X_0$  – удельное индуктивное сопротивление воздушной линии (для АС 120/19 составляет 0,391 Ом/км).

Таким образом, для воздушной линии АС 120/19 протяженностью 22,7 км индуктивное сопротивление составит:

$$X_{\text{КЛ}} = 0,391 \cdot 22,7 = 8,876 \text{ Ом}$$

Затем выполняется расчет активного сопротивления воздушной линии:

$$R_{\text{КЛ}} = R_0 \cdot L_{\text{КЛ}} \quad (13)$$

где  $R_0$  – удельное активное сопротивление воздушной линии (для АС 120/19 равное 0,249 Ом/км).

Таким образом, для воздушной линии АС 120/19 протяженностью 22,7 км активное сопротивление составит [11]:

$$R_{\text{КЛ}} = 0,249 \cdot 22,7 = 5,652 \text{ Ом}$$

Далее определяется реактивное сопротивление до точки К1:

$$X_{\Sigma\text{К1}} = X_{\text{С}} + X_{\text{КЛ}} \quad (14)$$

Таким образом, общее сопротивление до точки К1ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» составит:

$$X_{\Sigma\text{К1}} = 14,385 + 8,876 = 23,261 \text{ Ом}$$

Далее определяется активное сопротивление до точки К1:

$$R_{\Sigma\text{К1}} = R_{\text{КЛ}} = 5,652 \text{ Ом} \quad (15)$$

После чего, необходимо определить полное сопротивление до точки К1:

$$Z_{\Sigma K1} = \sqrt{R_{\Sigma K1}^2 + X_{\Sigma K1}^2} \quad (16)$$

$$Z_{\Sigma K1} = \sqrt{5,652^2 + 23,261^2} = 23,938 \text{ Ом}$$

Ток короткого замыкания в точке К1 определяется по формуле:

$$I_{K1} = \frac{U_{61}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma K1}} \quad (17)$$

$$I_{K1} = \frac{38,5}{\sqrt{3} \cdot 23,938} = 0,93 \text{ кА}$$

Ударный ток короткого замыкания в точке К1 определяется по формуле:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{K1} \cdot K_{уд1} \quad (18)$$

где  $K_{уд1}$  – ударный коэффициент, равный 1,8.

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 0,93 \cdot 1,8 = 2,367 \text{ кА}$$

Мощность короткого замыкания в точке К1 определяется по формуле:

$$S_{K1} = \sqrt{3} \cdot I_{K1} \cdot U_{61}$$

$$S_{K1} = \sqrt{3} \cdot 0,93 \cdot 38,5 = 62,016 \text{ МВА} \quad (19)$$

После определения тока КЗ в точке К1 необходимо выполнить расчет тока КЗ в точке К2 – на шинах 10 кВ ПС 35/10 кВ [12].

Базисное напряжение в точке К2 составит:

$$U_{62} = 10,5 \text{ кВ}$$

Согласно схеме замещения, для расчета тока КЗ в точке К2 необходимо определить сопротивление силового трансформатора, установленного на ПС 35/10 кВ [13].

Расчет активного сопротивления силового трансформатора, выполняется по формуле:

$$R_{\text{ТР}} = \frac{P_{\text{к}} \cdot U_{\text{н}}^2}{S_{\text{ТР}}^2} \quad (20)$$

где  $P_{\text{к}}$  – потери короткого замыкания (для ТМН 6300/35 составляют 46,5 кВт);

$U_{\text{н}}$  – номинальное напряжение трансформатора (38,5 кВ);

$S_{\text{ТР}}$  мощность трансформатора (6300 кВА).

$$R_{\text{ТР}} = \frac{46,5 \cdot 38,5^2}{6300^2} = 1,737 \text{ мОм}$$

Расчет полного сопротивления силового трансформатора, выполняется по формуле:

$$Z_{\text{ТР}} = \frac{U_{\text{к}} \cdot U_{\text{н}}^2}{100 \cdot S_{\text{ТР}}} \quad (21)$$

где  $U_{\text{к}}$  – напряжение короткого замыкания (для ТМН 6300/35 составляют 7,5%).

$$Z_{\text{ТР}} = \frac{7,5 \cdot 38,5^2}{100 \cdot 6300} = 17,56 \text{ мОм}$$

Индуктивное сопротивление силового трансформатора, установленного на ПС 35/10 кВ определяется по формуле:

$$X_{TP} = \sqrt{Z_{TP}^2 - R_{TP}^2} \quad (22)$$

$$X_{TP} = \sqrt{17,56^2 - 1,737^2} = 17,474 \text{ мОм}$$

Затем, необходимо определить индуктивное и активное сопротивления системы до точки К1, приведенные к базисному напряжению в точке К2 [14].

Активное сопротивления системы до точки К1, приведенные к базисному напряжению в точке К2 определяется по формуле:

$$R'_{\Sigma K1} = R_{\Sigma K1} \cdot \left(\frac{U_{62}}{U_{61}}\right)^2 \quad (23)$$

Индуктивное сопротивления системы до точки К1, приведенные к базисному напряжению в точке К2 определяется по формуле:

$$X'_{\Sigma K1} = X_{\Sigma K1} \cdot \left(\frac{U_{62}}{U_{61}}\right)^2 \quad (24)$$

Активное сопротивления системы до точки К1, приведенные к базисному напряжению в точке К2 для ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» составит [15]:

$$R'_{\Sigma K1} = 5,652 \cdot \left(\frac{10,5}{38,5}\right)^2 = 0,42 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление системы до точки К1, приведенные к базисному напряжению в точке К2 для ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» составит [16]:

$$X'_{\Sigma K1} = 23,261 \cdot \left(\frac{10,5}{38,5}\right)^2 = 1,73 \text{ мОм}$$

После этого, необходимо определить суммарное активное сопротивление системы до точки К2. Согласно схеме замещения на рисунке 3, суммарное активное сопротивление системы до точки К2 на ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» составит:

$$R_{\Sigma K2} = R_{\text{КЛ}} + R_{\text{ТР}} \quad (25)$$

Таким образом, суммарное активное сопротивление системы до точки К2 равно:

$$R_{\Sigma K2} = 5,652 + 1,737 = 7,389 \text{ Ом}$$

После этого, необходимо определить суммарное индуктивное сопротивление системы до точки К2. Согласно схеме замещения на рисунке 3, суммарное индуктивное сопротивление системы до точки К2 на ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» составит [17]:

$$X_{\Sigma K2} = X_{\text{С}} + X_{\text{КЛ}} + X_{\text{ТР}} \quad (26)$$

Таким образом, суммарное индуктивное сопротивление системы до точки К2 равно [18]:

$$X_{\Sigma K2} = 14,385 + 8,876 + 17,56 = 40,821 \text{ Ом}$$

После чего, необходимо определить полное сопротивление до точки К2:

$$Z_{\Sigma K2} = \sqrt{R_{\Sigma K2}^2 + X_{\Sigma K2}^2} \quad (27)$$

$$Z_{\Sigma K1} = \sqrt{7,389^2 + 40,821^2} = 41,48 \text{ Ом}$$

Ток короткого замыкания в точке К2 определяется по формуле:

$$I_{K2} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 41,48} = 0,146 \text{ кА}$$

Ударный ток короткого замыкания в точке К2 составит:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 0,143 \cdot 1,8 = 0,364 \text{ кА}$$

Мощность короткого замыкания в точке К2 составит:

$$S_{K2} = \sqrt{3} \cdot 0,146 \cdot 10,5 = 2,652 \text{ МВА}$$

Для минимального значения тока Кз расчеты выполняются аналогично максимальному значению.

Результаты расчетов токов КЗ приведены в таблице 6. Для дальнейшей проверки и выбора оборудования будут использованы максимальные значения токов КЗ и ударных токов КЗ [19].



Таблица 6 – Результаты расчета токов КЗ

Точка КЗ	Значение	X, Ом	R, Ом	Z, Ом	I <sub>к</sub> , кА	i <sub>уд</sub> , кА	S <sub>к</sub> , МВА
К1	Мин.	33,010	5,652	33,490	0,664	1,686	112,329
	Макс.	23,261	5,652	23,938	0,93	2,367	62,016
К2	Мин.	50,570	7,389	51,107	0,435	1,105	20,075
	Макс.	40,821	7,389	41,48	0,146	0,364	2,652

По результатам расчетов проведем выбор силового оборудования ПС 35/10 кВ.

## 2.4 Выбор оборудования ПС

### 2.4.1 Выбор выключателей нагрузки

Распределительные устройства ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» комплектуются высоковольтными вакуумными выключателями ВВ/TEL производства «Таврида электрик» [22].

Под высоковольтным выключателем подразумевается устройство, выполняющее оперативное отключение и включение электрической сети. Управление высоковольтным выключателем может осуществляться в ручном, автоматическом или дистанционном режиме.

В вакуумных выключателях в дугогасительной камере образуется вакуум, за счет чего производит гашение дуги. Вакуумные выключатели применяются в электроустановках до 35 кВ.

Выбранные высоковольтные выключатели проверяются по ряду условий:

- по номинальному напряжению. В данном случае, номинальное напряжение высоковольтного выключателя должно быть не меньше номинального напряжения распределительного устройства:

$$U_{\text{ном.выкл}} \geq U_{\text{ном.уст}}, \quad (28)$$

- по номинальному току. В данном случае, номинальный ток высоковольтного выключателя должен быть не меньше расчетного тока ячейки:

$$I_{\text{ном.выкл}} \geq I_{\text{макс.расч}}, \quad (29)$$

- по отключающей способности. В данном случае, значение предельно отключающего тока ( $I_{\text{по}}$ ) должно быть выше значения тока короткого замыкания в месте установки высоковольтного выключателя:

$$I_{\text{откл.ном}} \geq I_{\text{кз(КЗ)}}, \quad (30)$$

- на термическую стойкость. В данном случае, значение номинального теплового импульса должно быть не меньше расчетного теплового импульса:

$$B_{\text{к.ном}} \geq B_{\text{к.расч}}, \quad (31)$$

- на электродинамическую стойкость. В данном случае, значение тока электродинамической стойкости высоковольтного выключателя должно быть выше значения ударного тока короткого замыкания в месте установки высоковольтного выключателя:

$$I_c \geq I_{\text{уд(К4)}}, \quad (32)$$

Результаты выбор выключателей нагрузки приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Выбор выключателей нагрузки

РУ	С.Ш.	Назначение	S, кВа	I, А	Тип	Ikз,кА	В <sub>расч</sub> , кА <sup>2</sup> ·с	В <sub>ном</sub> , кА <sup>2</sup> ·с	i <sub>уд</sub> , кА	i <sub>с</sub> , кА
РУ-35 кВ	1 с.ш.	Ввод 1	6305	104	ВВ/TEL-35-12,5/630	0,93	0,069	468,75	2,367	32
		T1	6305	104	ВВ/TEL-35-12,5/630	0,93	0,069	468,75	2,367	32
	Секционный		6305	104	ВВ/TEL-35-12,5/630	0,93	0,069	468,75	2,367	32
	2 с.ш.	T2	6305	104	ВВ/TEL-35-12,5/630	0,93	0,069	468,75	2,367	32
		Ввод 2	6305	104	ВВ/TEL-35-12,5/630	0,93	0,069	468,75	2,367	32
РУ-10 кВ	1 с.ш.	T1	6121	354	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
		Куст №25	356	21	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
		Куст №26	309	18	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
		Куст №27	361	21	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
		Куст №28	261	15	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
		Куст №29	428	25	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
		Резерв	750	43	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
		Резерв	750	43	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
	Секционный		6121	354	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
	2 с.ш.	Резерв	750	43	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
		Резерв	750	43	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
		Куст №30	122	7	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
		Куст №31	543	31	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
		Куст №32	465	27	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
		Куст №33	275	16	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51
T2		6121	354	ВВ/TEL-10-20/630	0,435	0,015	1200	1,105	51	

По результатам расчетов проведем выбор разъединителей ПС 35/10 кВ.

#### 2.4.2 Выбор разъединителей

Под разъединителем подразумевается устройство, предназначенное для создания видимого разрыва между источником напряжения и отдельным оборудованием электрической сети. разъединители применяются для вывода оборудования в ремонт, осмотра оборудования, а также для изменения коммутационной схемы распределительного устройства. Обеспечение видимого разрыва необходимо, как правило, для обеспечения электробезопасности на участке, на котором производится ремонт или осмотр.

Разъединители применяются в электроустановках всех уровней напряжения.

Выбор разъединителей произведен по [5].

Проверка высоковольтных разъединителей выполняется аналогично проверке высоковольтных выключателей (формулы 28-32).

Для РУ-35 кВ ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» выбраны разъединители РГП-2-35/1000УХЛ, удовлетворяющий всем требованиям и проверкам (Таблица 8).

Таблица 8 – Выбор разъединителей

Наименование РУ		Тип	$U_{уст} \leq U_{ном}$	$I_{max} \leq I_{ном}$	$B_k \leq I_{тер}^2 \cdot t_{тер}$
РУ-35 кВ	ввод	РГП-2-35/1000УХЛ-1	$35 \leq 35$	$104 \leq 1000$	$0,069 \leq 768,00$
	секц.	РГП-2-35/1000УХЛ-1	$35 \leq 35$	$104 \leq 1000$	$0,069 \leq 768,00$
	T1, T2	РГП-2-35/1000УХЛ-1	$35 \leq 35$	$104 \leq 1000$	$0,069 \leq 768,00$

В ячейках РУ-10 кВ разъединители не предусмотрены.

### 2.4.3 Выбор измерительных трансформаторов тока

Выбор и проверка измерительных трансформаторов тока выполняется аналогично с другим оборудованием подстанции.

Проверка трансформаторов тока выполняется аналогично проверке высоковольтных выключателей (формулы 28-32).

В РУ-35 кВ выбраны трансформаторы тока ТОЛ-35[6].

В РУ-10 кВ выбраны трансформаторы тока ТОЛ-10[6].

Результаты выбора и проверка трансформаторов тока приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Выбор трансформаторов тока

РУ	С.Ш.	Назначение	S, кВа	I, А	Тип	I <sub>кз</sub> , кА	V <sub>расч</sub> , кА <sup>2</sup> ·с	S <sub>ном</sub> , кА <sup>2</sup> ·с	
РУ-35 кВ	1 с.ш.	Ввод 1	6305	104	ТОЛ-35-III-0,2/10P-300/5	0,93	0,069	7500	
		T1	6305	104	ТОЛ-35-III-0,2/10P-300/5	0,93	0,069	7500	
		Секционный	6305	104	ТОЛ-35-III-0,2/10P-300/5	0,93	0,069	7500	
	2 с.ш.	T2	6305	104	ТОЛ-10-1-0,2/5P-600/5	0,93	0,069	7500	
		Ввод 2	6305	104	ТОЛ-35-III-0,2/10P-300/5	0,93	0,069	7500	
РУ-10 кВ	1 с.ш.	T1	6121	354	ТОЛ-10-1-0,2/5P-600/5	0,435	0,015	7500	
		Куст №25	356	21	ТОЛ-10-1-0,2/5P-100/5	0,435	0,015	7500	
		Куст №26	309	18	ТОЛ-10-1-0,2/5P-100/5	0,435	0,015	7500	
		Куст №27	361	21	ТОЛ-10-1-0,2/5P-100/5	0,435	0,015	7500	
		Куст №28	261	15	ТОЛ-10-1-0,2/5P-100/5	0,435	0,015	7500	
		Куст №29	428	25	ТОЛ-10-1-0,2/5P-100/5	0,435	0,015	7500	
		Резерв	750	43	ТОЛ-10-1-0,2/5P-100/5	0,435	0,015	7500	
		Резерв	750	43	ТОЛ-10-1-0,2/5P-100/5	0,435	0,015	7500	
		Секционный	6121	354	ТОЛ-10-1-0,2/5P-600/5	0,435	0,015	7500	
	2 с.ш.		Резерв	750	43	ТОЛ-10-1-0,2/5P-100/5	0,435	0,015	7500
			Резерв	750	43	ТОЛ-10-1-0,2/5P-100/5	0,435	0,015	7500
			Куст №30	122	7	ТОЛ-10-1-0,2/5P-100/5	0,435	0,015	7500
			Куст №31	543	31	ТОЛ-10-1-0,2/5P-100/5	0,435	0,015	7500
			Куст №32	465	27	ТОЛ-10-1-0,2/5P-100/5	0,435	0,015	7500
		Куст №33	275	16	ТОЛ-10-1-0,2/5P-100/5	0,435	0,015	7500	
		T2	6121	354	ТОЛ-10-1-0,2/5P-600/5	0,435	0,015	7500	

Как видно по результатам проверки, выбранные трансформаторы тока удовлетворяют все требованиям.

#### 2.4.4 Выбор измерительных трансформаторов напряжения

Основные параметры и методику выбора принимаем по [7].

Выбор по номинальному напряжению осуществляется по формуле:

$$U_{уст} \leq U_{ном}, \quad (33)$$

Выбор по вторичной нагрузке осуществляется по формуле:

$$S_{2S} \leq S_{2ном}, \quad (34)$$

где  $S_{2ном}$  – номинальная мощность вторичной обмотки в выбранном классе точности, ВА, [7];

$S_{2\Sigma}$  – нагрузка всех измерительных приборов и реле, присоединенных к трансформатору напряжения, ВА, [7].

Полная мощность, подключённая к трансформатору напряжения для РУ-35 кВ  $S_{2\Sigma} = 94,32$  ВА. Посчитанная мощность должна удовлетворять условию:

$$2 \cdot 150 \geq 94,32,$$

Условие выполняется и был выбран для КРУМ –35 кВ трансформатор типа ЗНОЛ–35–65–У1 он подходит по всем параметрам которые мы заносим в таблицу 2.9

Полная мощность, подключённая к трансформатору напряжения для РУ–10 кВ  $S_{2\Sigma} = 48,01$  ВА.

Посчитанная мощность должна удовлетворять условию:

$$2 \cdot 120 > 48,01.$$

Характеристики выбранных трансформаторов напряжения заносим в таблицу 10.

Таблица 10 – Измерительные трансформаторы напряжения

Наименование РУ	Тип трансформатора напряжения	$U_{уст} \leq U_{ном}$ , кВ	Класс точности
КРУМ–35 кВ	ЗНОЛ–35–65	$35 \leq 35$	0,5
КРУМ–10 кВ	ЗНОЛ–СЭЦ–10	$10 \leq 10$	0,5

Таким образом, выбранные трансформаторы подходят по всем требованиям.

### 2.4.5 Выбор ограничителей перенапряжения

Проверка ограничителей перенапряжения осуществляется на основании следующих условий:

- наибольшее допустимое напряжение ОПН  $U_{нд}$  должно быть больше наибольшего рабочего напряжения сети  $U_{нр}$  или оборудования, В:

$$U_{нд} > U_{нр}, \quad (35)$$

- уровень временных перенапряжений должен быть меньше максимального значения напряжения промышленной частоты выдерживаемого ОПН в течении времени  $t$ :

$$T \cdot U_{нд} > U_{пер}, \quad (36)$$

где  $U_{пер}$  – уровень квазистационарных перенапряжений (феррорезонансные перенапряжения, резонансное смещение нейтрали);

- поглощаемая ограничителем энергия не должна превосходить энергоемкость ОПН:

$$W_{уд} \cdot U_{нд} > W_c, \quad (37)$$

- ограничитель должен обеспечить необходимый защитный координационный интервал по грозovým воздействиям  $A_{гр}$ :

$$A_{гр} = (U_{исп} - U_{ост}) / U_{исп} > (0,2 \div 0,25), \quad (38)$$

где  $U_{исп}$  – значение грозового испытательного импульса;

$U_{ост}$  – остающееся напряжение на ОПН при номинальном разрядном

токе.

– ограничитель должен обеспечить защитный координационный интервал по внутренним перенапряжениям  $A_{\text{вн}}$  :

$$A_{\text{вн}} = (U_{\text{доп}} - U_{\text{ост}}) / U_{\text{доп}} > (0,15 \div 0,25), \quad (39)$$

где  $U_{\text{доп}}$  – допустимый уровень внутренних перенапряжений;

$U_{\text{ост}}$  – остающееся напряжение на ОПН при коммутационном импульсе.

– ток короткого замыкания сети должен быть меньше тока взрывобезопасности ОПН,  $A$ :

$$I_{\text{кз}} < I_{\text{вз без}}, \quad (40)$$

Для защиты распределительных устройств 35 и 10 кВ выбираем, соответственно, по [8], ОПНК–П1–35 УХЛ и ОПНК–П1–10 УХЛ.

Выводы по разделу 2.

В вышеприведенном разделе на основании расчета нагрузок, приходящихся на силовые трансформаторы. Выбрали к установке силовые трансформаторы ТМН 6300/35/10 кВ. По результатам расчетов токов короткого замыкания проведен выбор электрооборудования электрической части ПС 35/10 кВ, которое обеспечит надежную работу самой подстанции и обеспечит требуемую надежность системы электроснабжения предприятия.



### 3 Релейная защита

#### 3.1 Релейная защита и автоматика силового трансформатора

На основании правил устройства электроустановок для силовых трансформаторов была выбрана следующая релейная защита и автоматика, таблица 11.

Таблица 11– Релейная защита и автоматика силового трансформатора

Наименование повреждений или ненормальный режим	Наименование РЗ и А	Пункт ПУЭ	Условное обозначение
Защита от повреждений внутри кожуха и от понижения уровня масла	Газовая защита	3.2.53	ГЗ
Защита от повреждений на выводах и от внутренних повреждений трансформатора	Продольная дифференциальная токовая защита	3.2.54	ДЗТ
Защита от токов внешних многофазных КЗ	Максимальная токовая защита с пуском напряжения	3.2.59	МТЗ
Защита от токов перегрузки	Максимальная токовая защита с действием на сигнал	3.2.69	МТЗ

При выборе блока РЗиА было рассмотрено оборудование 4 марок Российских производителей:

- Шкаф защиты трансформатора «ШЭ2607 244»;
- Устройство микропроцессорной защиты «Seram»;
- Устройство микропроцессорной защиты «RET650»;
- Устройство микропроцессорной защиты «Сириус-Т-БПТ»;

В качестве блока релейной защиты трансформаторе выбираем блок Сириус-Т, как наиболее подходящий по цене, набору необходимых функций защит.

Основные технические характеристики перечисленных блоков РЗиА представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Характеристики перечисленных блоков РЗиА

Название	ЭКРАШЭ2607 146	ABB «RET650»	<a href="#">SchneiderElectric</a> «Sepam 80»	РАДИУС Автоматика «Сириус-Т-БПТ»
Цена, руб.	От 180 000	От 160 000	от 150 000	от 100 000
ТО	+	+	+	+
МТЗ	+	+	+	+
Диф.защ	+	+	+	+
RS-485, Modbus	+	+	+	+
Область применения	основная защита двухобмоточного трансформатора с ВН 35–220 кВ	для защиты двух- и трехобмоточных трансформаторов	электрооборудование 6–35 кВ и трансформаторов 110 (220) кВ	основная защита двухобмоточного трансформатора

Расчет продольной дифференциальной защиты.

В качестве основного вида защиты принимаем продольную дифференциальную защиту.

Расчёт уставок ДТО. Максимальный расчётный ток небаланса  $I_{НБ\ МАКС}$  при максимальном токе внешнего КЗ находят по формуле [9]:

$$I_{НБ\ МАКС} = (\varepsilon_{\max} \cdot k_a \cdot k_{\text{одн}} + \gamma) \cdot I_{\text{КЗ}\max}^{(3)}, \quad (41)$$

где  $\varepsilon_{\max}$  - максимальное значение полной погрешности ТТ;

$k_a$  - от 2 до 4 - коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую тока КЗ;

$k_{\text{одн}} = 0,5$  (для однотипных ТТ) или 1 (для разнотипных ТТ) - коэффициент однотипности ТТ;

$\gamma = 0,05$  - погрешность цифрового выравнивания токов "плеч";

$I_{\text{КЗ}\max}^{(3)}$  - периодическая составляющая максимально возможного первичного тока КЗ (в начальный момент времени КЗ), проходящего при внешнем КЗ по ТТ присоединения, являющегося расчётным, А.

$$I_{НБ\ МАКС} = (0,1 \cdot 2 \cdot 0,5 + 0,05) \cdot 930 = 232,5 \text{ А}$$

Уставку срабатывания ДТО  $I_{ДТО}$  рассчитывают по формуле:

$$I_{ДТО} = K_{отс} \cdot I_{НБ макс}, \quad (42)$$

где  $K_{отс} =$  от 1,15 до 1,3 – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас;

$$I_{ДТО} = 1,15 \cdot 232,5 = 267,4 \text{ А}$$

Расчёт уставок ДЗТ. Для определения уставки начального тока срабатывания органов ДЗТ  $I_{ДЗТ НАЧ}$  используют формулу[9]:

$$I_{ДЗТ НАЧ} = K_{отс} \cdot I_{Нагр макс}, \quad (43)$$

где  $K_{отс} = 1,2$  – коэффициент отстройки от дифференциального тока, возникающего при обрыве вторичных цепей ТТ;

$I_{НАГР МАКС}$  - максимальный ток нагрузочного режима (первичный ток нагрузки базисного присоединения), А.

$$I_{ДЗТ НАЧ} = 1,2 \cdot 98 = 117,6 \text{ А}$$

Для нахождения максимального тока небаланса в рабочем режиме  $I_{НБ РАБ}$  используют формулу[9]:

$$I_{НБ РАБ} = (\epsilon_{макс} + \gamma) \cdot I_{Нагр макс}, \quad (44)$$

$$I_{НБ РАБ} = (0,1 + 0,05) \cdot 98 = 14,7 \text{ А}$$

Используя исходные данные находят уставку срабатывания ступени ДЗШ, действующей на сигнализацию небаланса при обрыве вторичных цепей ТТ  $I_{НБ}$  по формуле[9]:

$$I_{\text{ДЗТ СРАБ}} = K_{\text{отс}} \cdot I_{\text{НБ РАБ}}, \quad (45)$$

где  $K_{\text{отс}} = 1,4$  - коэффициент отстройки.

$$I_{\text{ДЗТ СРАБ}} = 1,4 \cdot 14,7 = 20,6 \text{ А}$$

После выбора уставки срабатывания  $I_{\text{НБ СРАБ}}$  необходимо проверить выполнение условия:

$$I_{\text{ДЗТ СРАБ}} < 0,9 \cdot I_{\text{НАГР МИН}}, \quad (46)$$

$$I_{\text{НАГР МИН}} = \frac{P_{\text{тр2}} / \cos_{\text{ср.тр2}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{6305}{\sqrt{3} \cdot 37} = 98 \text{ А}$$

$$0,9 \cdot 98,4 = 88,5 > 20,6$$

Условие выполняется.

### **3.2 Релейная защита отходящих линий**

На основании правил устройства электроустановок для высоковольтных электродвигателей была выбрана следующая релейная защита и автоматика, таблица 14 [21].

Таблица 14 - Релейная защита отходящих линий

Наименование повреждений или ненормальный режим	Наименование РЗ и А	Пункт ПУЭ	Условное обозначение
Защита от многофазных замыканий и от однофазных замыканий на землю	Токовая однорелейная отсечка	5.3.46	ТО
Защита от однофазных замыканий на землю	Направленная защита от замыканий на землю	5.3.48	ТНЗНП
Защита от перегрузки.	Максимальная токовая защита с действием на сигнал	5.3.49	МТЗ

В качестве блока релейной защиты также выбираем, интеллектуальное устройство управления и защиты фидера Сириус-2МЛ-02 фирмы «РАДИУС Автоматика», как наиболее подходящий по цене, набору необходимых функций защит [20].

Произведем выбор уставок МП РЗА терминала КЛ, питающей ТП. Тип исполнения устройства РЗА Сириус-2МЛ-02.

Расчет токовой отсечки

Ток срабатывания мгновенной токовой отсечки при коротком замыкании определяем по формуле:

$$I_{с.з\ TO} = k_n \cdot I_{кз}, \quad (50)$$

где  $I_{с.з\ TO}$  - ток срабатывания токовой отсечки, А;

$I_{кз}$  – ток короткого замыкания в конце линии, А;

$k_n$  – коэффициент надежности, для блока Сириус-2МЛ-02 равен 1,1[15].

Так как собственное время действия токовой отсечки составляет около 0,02 с, то ток короткого замыкания рассчитываем для момента времени  $t = 0$  и принимаем равным действующему значению периодической составляющей.

$$I_{с.з\ TO} = 1,15 \cdot 435 = 500 \text{ А}$$

Коэффициент чувствительности токовой отсечки определим по формуле:

$$k_{\text{ч}} = \frac{0,87 \cdot I_{\text{к.з. min}}}{I_{\text{с.з.}}} \geq 1,5, \quad (51)$$
$$k_{\text{ч}} = \frac{0,87 \cdot 930}{500} = 1,6 > 1,5$$

Токовая отсечка для электродвигателя не проходит по условию чувствительности.

Расчет максимальной токовой отсечки.

Произведем расчет для отходящей кабельной линии от ячейки Куст №25. Полная мощность насосной станции  $S_{\text{н}} = 356$  кВА. Номинальный ток нагрузки определяется по формуле:

$$I_{1\text{н}} = \frac{S_{\text{н1}}}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad (52)$$

где  $I_{1\text{н}}$  - номинальный ток нагрузки, А;

$S_{\text{н1}}$  - номинальная полная мощность потребителей, кВА;

$U$  - номинальное напряжение потребителей, кВ.

$$I_{1\text{н}} = \frac{356}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 21 \text{ А}$$

При настройке МТЗ необходимо выполнять следующие условия

$$I_{\text{срМТЗ}} \geq I_{\text{раб. max}} \quad (53)$$

где  $I_{\text{срМТЗ}}$  - ток срабатывания МТЗ;

$I_{\text{раб. max. ЛЭП}}$  - максимальный рабочий ток линии.

Рабочий максимальный ток  $I_{\text{раб.мах}}$  является током нагрузки электроприемников:

$$I_{\text{раб.мах}} = I_{\text{н1}} = 21 \text{ А}$$

Ток срабатывания МТЗ определяется по формуле:

$$I_{\text{ср.МТЗ}} = \frac{k_{\text{н}} \cdot I_{\text{раб.мах}}}{k_{\text{воз}}}, \quad (54)$$

где  $k_{\text{н}}$  – коэффициент надежности, для блока Сириус-2МЛ-02 равен 1,1[15];

$I_{\text{раб.мах}}$  – ток нагрузки электроприемников, А;

$k_{\text{воз}}$  – коэффициент возврата соответствующего вида защиты устройства для устройства Сириус-2МЛ-02  $k_{\text{воз}}$  равен 0,94;

$N_{\text{м}}$  - коэффициент трансформации трансформатора тока.

$$I_{\text{ср.МТЗ}} = \frac{1,1 \cdot 21}{0,94} = 24,6 \text{ А}$$

Проверим защиту на чувствительность:

$$k_{\text{ч}} = \frac{0,87 \cdot I_{\text{к.з.}}}{I_{\text{ср.МТЗ}}} > 2, \quad (55)$$

где  $I_{\text{к.з.}}(К6)$  - ток короткого замыкания.

$I_{\text{ср.МТЗ}}$  - ток срабатывания МТЗ, А.

$$k_{\text{ч}} = \frac{0,87 \cdot 435}{24,6} = 15,4 > 2$$

Нормативная чувствительности обеспечена.

Расчет направленной защиты от замыканий на землю

Ток срабатывания данной защиты отстраивается от емкостных токов, которые задаются, по формуле:

$$I_{сз.расч} = k_{отс} \cdot k_б \cdot I_c, \quad (56)$$

где  $k_б$  - коэффициент, учитывающий бросок собственного емкостного тока при соединении в начальный момент внешнего ОЗЗ  $k_б = 2$ ;

$k_{отс} = 1,2$  - коэффициент отстройки;

$I_c$  - емкостной ток присоединения.

$$I_{сз.расч} = 1,2 \cdot 2 \cdot 0,0261 = 0,0626 \text{ A}$$

Значение собственного емкостного тока определяется следующим образом:

$$I_c = I_{с.л.} \quad (57)$$

$$I_c = 0,0261 = 0,0261 \text{ A}$$

Собственный емкостной ток КЛ, входящей в зону защиты, определяется по выражению:

$$I_{с.л.} = I_{с.уд} \cdot l \cdot m, \quad (58)$$

где  $l$  - длина линии, км;

$m$  - число кабелей в линии;

$I_{с.уд}$  - удельное значение емкостного тока КЛ,  $I_{с.уд} = 0,58 \text{ A/км}$ .

$$I_{с.л.} = 0,58 \cdot 0,015 \cdot 3 = 0,0261 \text{ A}$$



Чувствительность защиты от ОЗЗ можно оценить по формуле:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{с.сум}}}{I_{\text{сз.расч}}} = \frac{0,18}{0,0626} = 2,87 \quad (59)$$

Значение емкостного тока линии и, соответственно, суммарного емкостного тока линий всей сети можно ориентировочно определить по эмпирической формуле:

$$I_{\text{с.сум}} = \frac{U \cdot l}{10} \quad (60)$$

где  $l$  - длина линии, км;

$U$  - номинальное напряжение сети.

$$I_{\text{с.сум}} = \frac{10,5 \cdot 0,3}{10} = 0,315$$

Произведем выбор уставок для блока релейной защиты двухобмоточного трансформатора Сириус-Т-БПТ.

Расчет токовой отсечки.

Для отстройки от тока БТН уставку срабатывания ТО  $I_{\text{с.з}}^I$ , вычисляют по формуле:

$$I_{\text{с.з.}}^I = k_{\text{БНТ}} \cdot I_{\text{номтрВН}} \quad (61)$$

где  $k_{\text{БНТ}} = 3 - 7$  - коэффициент, учитывающий увеличение тока относительно номинального тока трансформатора при БНТ;

$I_{\text{номтрВН}}$  - номинальный первичный ток стороны ВН трансформатора, А.

Номинальный ток трансформатора рассчитать по формуле[9]:

$$I_{\text{ном.тр}} = \frac{S_{\text{ном тр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} \quad (62)$$

где  $S_{\text{ном тр}}$  – номинальная мощность трансформатора.

$U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение питающей сети.

$$I_{\text{ном.тр}} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 37} = 98 \text{ А}$$

$$I_{\text{с.з.}}^1 = 5 \cdot 98 = 490 \text{ А}$$

Для отстройки от максимального тока внешнего КЗ уставку срабатывания ТО  $I_{\text{с.з.}}^1$ , вычисляют по формуле [9]:

$$I_{\text{с.з.}}^1 = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{КЗвнеш}}^{(3)} \quad (63)$$

где  $I_{\text{с.з.}}$  – ток срабатывания токовой отсечки, А;

$k_{\text{отс}}$  – коэффициент отстройки ( $k_{\text{отс}} = 1,1 \dots 1,2$ );

$I_{\text{КЗвнеш}}^{(3)}$  – максимальное первичное значение тока на стороне ВН при внешнем трехфазном КЗ на шинах НН в режиме с наибольшим значением этого тока:

$$I_{\text{КЗвнеш}}^{(3)} = \frac{930}{\frac{37}{10,5}} = 263,92 \text{ А.}$$

$$I_{\text{с.з.}}^1 = 1,2 \cdot 263,92 = 316,7 \text{ А}$$

Ток срабатывания токовой отсечки принимаем равным большему из значений, которые определили по формулам (3.21) и (3.23).

Коэффициент чувствительности токовой отсечки определим по формуле[9]:

$$k_q = \frac{0,87 \cdot I_{к.з.}}{I_{с.з.}} \geq 1,5, \quad (64)$$

где  $I_{к.з.}$  – значение тока короткого замыкания;

$I_{с.з.}$  – ток срабатывания токовой отсечки.

$$k_q = \frac{0,87 \cdot 930}{316,7} = 2,55 > 1,5$$

ТО работает без выдержки времени.

Вывод по разделу 3.

Выбранная в данном разделе релейная защита Сириус-2МЛ-02 фирмы «РАДИУС Автоматика» соответствует всем требованиям предъявляемым к устройствам РЗА, а рассчитанные уставки защиты обеспечат селективную работу микропроцессорного устройства.

## Заключение

В результате написания работы была достигнута цель работы – разработка проекта реконструкции системы электроснабжения ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» Ставропольского УПХГ в соответствии с актуальной нагрузкой.

В результате выполнения поставленных в рамках исследования задач были получены следующие результаты:

- собраны общие сведения об объекте исследования.
- приведено обоснование необходимости реконструкции.
- выполнен расчет актуальной нагрузки подстанции.
- выполнен выбор силовых трансформаторов подстанции.
- выполнен выбор линий электроснабжения.
- выполнен выбор коммутационного оборудования подстанции.
- выполнен расчет релейной защиты оборудования подстанции.

В работе выполнен расчет электрических нагрузок потребителей подстанции выполнен на основании установленной мощности потребителей и их коэффициента спроса.

Потребители подстанций имеют 1 категорию надежности электроснабжения. Для питания потребителей 1 категории надежности требуется два силовых трансформатора.

По расчетному значению выбирается компенсирующее устройство мощностью 600 квар напряжением 10,5 кВ. Компенсирующее устройство будет подключено к секциям шин 10 кВ ПС 35/10 кВ.

При проектировании РУ-10 кВ предусмотрены 4 резервные ячейки с запасом мощности 3000 кВА. Выбраны 2 силовых трансформатора ТМН-6300/35 мощностью 6300 кВА.

В качестве коммутационных аппаратов на стороне 35 кВ и 10 кВ выбраны выключатели нагрузки марки ВВ/TEL.

Для РУ-35 кВ ПС 35/10 кВ «КС Рождественская» выбраны разъединители РГП–2–35/1000УХЛ, удовлетворяющий всем требованиям и проверкам

В РУ-35 кВ выбраны трансформаторы тока ТОЛ–35. В РУ-10 кВ выбраны трансформаторы тока ТОЛ–10. По результатам проверки было установлено, что выбранные трансформаторы тока удовлетворяют все требованиям.

Для КРУМ –35 кВ был выбран трансформатор напряжения типа ЗНОЛ–35–65.

Для КРУМ –35 кВ был выбран трансформатор напряжения типа ЗНОЛ– СЭЦ–10.

Для защиты распределительных устройств 35 и 10 кВ выбираем, соответственно, ОПНК–П1–35 УХЛ и ОПНК–П1–10 УХЛ.

Все оборудование прошло проверку на термическую и электродинамическую стойкость к короткому замыканию.

На основании правил устройства электроустановок для силовых трансформаторов была выбрана релейная защита и автоматика.

В качестве блока релейной защиты трансформаторе выбираем блок Сириус-Т, как наиболее подходящий по цене, набору необходимых функций защит.

## Список используемых источников

1. Гужов Н.П., Ольховский В.Я., Павлюченко Д.А. Системы электроснабжения. Учебник. — Новосибирск: НГТУ, 2008. — 258 с.
2. Зорин В.В., Тисленко В.В. Системы электроснабжения общего назначения. Учебник. — Чернигов: ЧГТУ, 2005. — 341 с.
3. Измерительные трансформаторы тока высокого напряжения. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.cztt.ru/transformator\\_to-ka.html](http://www.cztt.ru/transformator_to-ka.html).
4. Каталог. Аппараты высокого напряжения. Т1. Разъединители и заземлители наружной установки. —М: Информэлектро, 2000— 84 с.
5. Каталог. Аппараты защиты. Т2. Ограничители перенапряжения. — М: Информэлектро, 2000— 132 с.
6. Каталог. Электрические аппараты высокого напряжения. Выключатели. Т1. —М: Информэлектро, 2001— 120 с.
7. Конюхова Е.А. Электроснабжение. Учебник для вузов. — М.: МЭИ, 2014. — 510 с.
8. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебник для студентов вузов. — М.: Интернет Инжиниринг, 2005. — 672 с.
9. М788-1069 - Справочные данные по расчетным коэффициентам электрических нагрузок
10. Маньков В.Д. Основы проектирования систем электроснабжения. Справочное пособие. — СПб: НОУ ДПО «УМИТЦ «Электро Сервис», 2010
11. Комплектные распределительные устройства внутренней установки 6-10 кВ. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.moselectro-yug.ru/prod/pdf/2\\_kru2006.pdf](http://www.moselectro-yug.ru/prod/pdf/2_kru2006.pdf).
12. Правила устройства электроустановок. - М.: Изд-во КноРус, 2010 — 488 с.
13. РД 153-34.0-20.527-98 «Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования» - М: Энергоатомиздат, 1999. — 131 с.

14. РТМ 36.18.32.4-92. Указания по расчету электрических нагрузок
15. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: учебное пособие / Л.Д. Рожкова, Т.В. Чиркова, Л.К. Карнеева. – М: Academia. 2009. – 448 с
16. Сборник укрупненных показателей стоимости строительства (реконструкции) подстанции и линий электропередачи для нужд ОАО «Холдинг МРСК». – М.: МРСК, 2012. – 72 с.
17. Сибикин М.Ю., Сибикин Ю.Д., Яшков В.А. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. М.: Высш. шк., 2001. - 336 с.
18. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Сайгаш А.С. Основы электроснабжения. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 180 с.
19. Холянов В.С., Холянова О.М. Электроснабжение непромышленных объектов. Учеб. пособие. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. - 149 с.
20. Щербаков Е.Ф. и др. Электроснабжение объектов строительства. Учебное пособие / Е.Ф. Щербаков, Д.С. Александров, А.Л. Дубов. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 404 с.
21. Электроснабжение: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров «Электроэнергетика и электротехника» / А.М. Ершов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 215 с.
22. Электроэнергетические системы и сети. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: метод. указания по курсовому проектированию / сост. : А. А. Герасименко, Е. С. Кинев, Л. И. Пилюшенко. – Электрон. дан. (2 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2008.