

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 Электроснабжение лакокрасочного завода

Обучающийся

О.А. Якушева

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

С.В. Шлыков

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

Тольятти 2022

## Аннотация

Пояснительная записка: 66 страниц, 16 рисунков, 28 таблиц, 32 информационных источников.

Объектом работы является система электроснабжения лакокрасочного завода.

Целью работы является расчет системы электроснабжения данного объекта.

По полученным «результатам анализа технологического процесса производства завода, были определены:

- технологические коэффициенты электрических нагрузок в цехах;
- категории электроприемников по надёжности электроснабжения;
- характеристика окружающей среды цехов предприятия.

Во время работы по ВКР производились:

- расчет электрических нагрузок предприятия;
- расчёт мощности компенсирующих устройств;
- построение картограммы электрических нагрузок;
- определение центра электрических нагрузок и выбор места размещения ПГВ;
- расчёт и выбор системы питания;
- построение графиков электрических нагрузок;
- транспорт электрической энергии в системе распределения;
- расчет токов короткого замыкания в различных точках;
- выбор и проверка основного оборудования системы электроснабжения» [2].

## Содержание

Введение.....	5
1 Описание технологического процесса.....	6
2 Определение расчетных электрических нагрузок .....	10
2.1 Расчетные нагрузки на стороне высшего напряжения цеховой ТП .....	14
2.2 Расчет мощности компенсирующих устройств узла нагрузки .....	17
2.3 Расчетные нагрузки на шинах низшего напряжения ППЭ.....	18
2.4 Расчетные нагрузки на высшем напряжении ППЭ .....	19
3 Картограмма и центр электрических нагрузок завода .....	21
3.1 Расчет и построение картограммы электрических нагрузок.....	21
3.2 Определение центра электрических нагрузок предприятия .....	21
4 Расчет и выбор системы питания .....	24
4.1 Выбор рационального напряжения системы питания .....	24
4.2 Компенсация реактивной мощности системы распределения.....	24
4.3 Построение суточных графиков нагрузок.....	25
4.4 Построение годового графика нагрузок .....	27
4.5 Выбор силовых трансформаторов пункта приема электроэнергии.....	28
4.6 Выбор схемы устройства высшего напряжения ППЭ.....	31
5 Расчет системы распределения.....	32
5.1 Выбор класса напряжения системы распределения и выбор мощности и места размещения цеховых трансформаторных подстанций.....	32
5.2 Потери мощности в трансформаторах цеховых подстанций .....	33
5.3 Транспорт электрической энергии в системе распределения .....	36
5.4 Выбор двигателей .....	37
5.5 Выбор кабельных линий системы распределения.....	37
6 Расчет токов короткого замыкания .....	41
6.1 Расчет токов короткого замыкания в точке К1 .....	41
6.2 Расчет токов короткого замыкания в точке К-2 .....	43
6.3 Расчет токов короткого замыкания в точке К-3 .....	44

7	Выбор и проверка основного оборудования .....	45
7.1	Выбор и проверка коммутационных аппаратов выше 1 кВ .....	45
7.2	Выбор и проверка коммутационных аппаратов 0,4 кВ.....	48
7.3	Проверка кабельных линий на термическую стойкость.....	52
8	Расчет заземляющего устройства подстанции.....	54
8.1	Сопротивление искусственного заземлителя.....	56
8.2	Форма и размеры электродов.....	58
8.3	Выбор количества вертикальных электродов .....	58
8.4	Сопротивление растеканию тока одного электрода.....	58
8.5	Уточнение коэффициентов использования.....	59
	Заключение .....	62
	Список используемых источников.....	63

## Введение

«В настоящее время электроэнергия стала незаменимой частью нашей жизни. Потребителями электрической энергии являются различного рода промышленные предприятия, заводы и жилые комплексы. Наибольшую часть потребления берёт на себя именно промышленная часть.

Система электроснабжения промышленного предприятия обязана быть надёжной, быть готовой к непрекращающемуся развитию технологий, повышению мощности предприятий и изменению самих производственных условий.

Целью выпускной работы бакалавра является разработка системы электроснабжения лакокрасочного завода.

На сегодняшний день известны и апробированы методы расчета и проектирование питающих и распределительных сетей, выбор элементов системы электроснабжения, выбор мощности цеховых трансформаторных подстанций и т.п.» [3]

«Однако при проектировании систем электроснабжения существуют современные проблемные вопросы, а именно:

- правильное определение ожидаемых электрических нагрузок;
- рациональное построение систем электроснабжения.

Тему выпускной работы можно считать актуальной, так как на сегодняшний день существуют проблемные вопросы проектирования систем электроснабжения, а с учётом современных технологий разрабатываются и вводятся в действие новые нормативные документы.

Все разделы выполнены с соблюдением требований основных действующих нормативных документов» [14].

## 1 Описание технологического процесса

В данной работе рассмотрено электроснабжение лакокрасочного завода генеральный план и основной технологический процесс, которого представлен на рисунке 1 и 2, сведения об электрических нагрузках предприятия представлены в таблице 1 и 2.

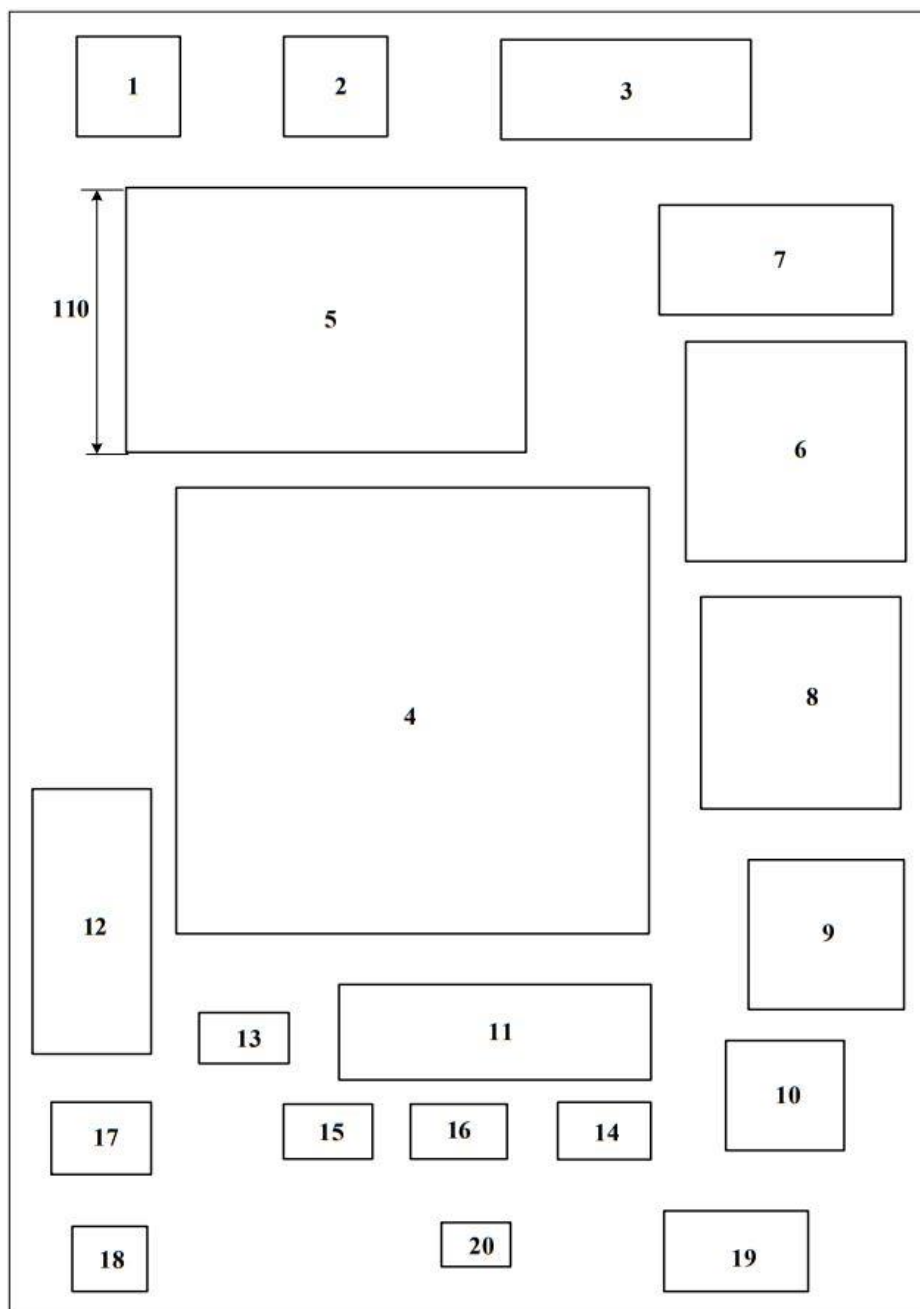


Рисунок 1 – Генеральный план лакокрасочного завода

Таблица 1 – Ведомость электрических нагрузок завода

Наименование цехов и номер на генеральном плане	Руст, кВт
Склад ЛВЖ 1	240
Склад кислот 2	238
Цех полупродуктов 3	1700
Холодильная установка (0,4 кВ) 4	2500
Компрессорная (0,4 кВ) 5	2100
Насосная 6	4100
Градирня (0,4 кВ) 7	440
Цех прямых красителей 8	4764
Цех активных красителей 9	1497
Цех натриевой соли 10	953
Очистные сооружения 11	1700
Система вентиляции 12	3650
Газоспасательная станция 13	440
Подсобный цех 14	440
Ремонтно-механический цех 15	440
Бытовой корпус 16	504
Административный корпус, маркетинг 17	544
Столовая 18	381
Склад готовой продукции 19	354
Магазин 20	50
Холодильная установка (10 кВ — СД)	9000
Компрессорная (10 кВ — АД)	6800
Градирня (10 кВ)	2100

Таблица 2 – Характеристики цехов лакокрасочного завода

Наименование цехов	cos φ	кс	Категория ЭП	Характеристика окружающей среды	Вид и степень защиты оборудования
Склад ЛВЖ	0,7	0,4	III	Нормальная	IP00
Склад кислот	0,7	0,4	III	Химически-активные вещества	IP30
Цех полупродуктов	0,8	0,6	II	Технологическая пыль	IP30
Холодильная установка (0,4 кВ)	0,8	0,7	I	Образование конденсата	IP04
Компрессорная (0,4 кВ)	0,9	0,8	I	Нормальная	IP20
Насосная	0,8	1	I	Повышенная влажность	IP04

Продолжение таблицы 2

Наименование цехов	cos φ	кс	Категория ЭП	Характеристика окружающей среды	Вид и степень защиты оборудования
Градирия (0,4 кВ)	0,8	0,8	I	Повышенная влажность	IP04
Цех прямых красителей	0,9	0,6	II	Химически-активные вещества	IP23
Цех активных красителей	0,8	0,8	II	Химически-активные вещества	IP23
Цех натриевой соли	0,6	0,5	II	Химически-активные вещества	IP23
Очистные сооружения	0,8	0,7	II	Нормальная	IP00
Система вентиляции	0,8	0,6	I	Нормальная	IP00
Газоспасательная станция	0,8	0,5	II	Нормальная	IP00
Подсобный цех	0,7	0,6	III	Нормальная	IP00
Ремонтно-механический цех	0,8	0,5	III	Нормальная	IP43
Бытовой корпус	0,7	0,5	III	Нормальная	IP00
Административный корпус, маркетинг	0,8	0,7	III	Нормальная	IP00
Столовая	0,7	0,3	III	Нормальная	IP00
Склад готовой продукции	0,8	0,4	III	Нормальная	IP00

Цеха основного производства:

- цех прямых красителей;
- цех активных красителей. Современные достижения в области химии красителей позволили расширить ассортимент красителей для крашения кожаной ткани новым классом красителей - активными красителями [32].

Общепроизводственные цеха и службы:

- насосная;
- компрессорная;



- газоспасательные станции;
- очистные сооружения.

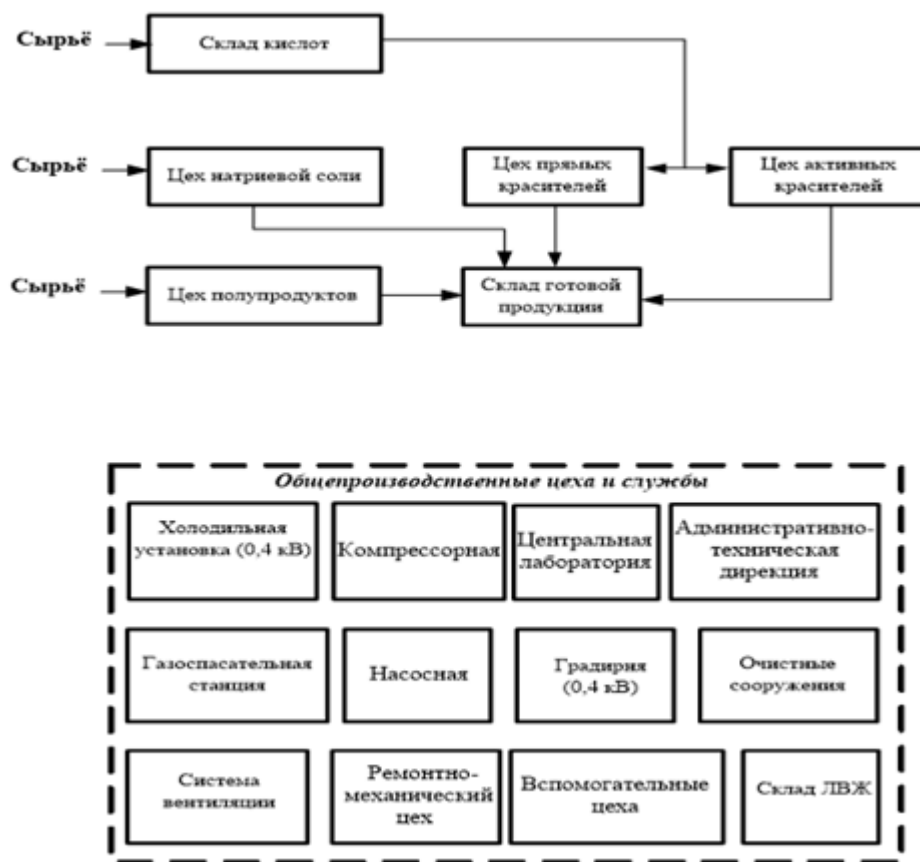


Рисунок 2 – Схема технологического процесса лакокрасочного завода

Вывод по разделу 1: одним из высоко прибыльных бизнесов в наш время является лакокрасочное производство. Лакокрасочное производство- завод состоит из цехов, таких как, ремонтный цех, вспомогательные цеха, очистные сооружения и т.п. Для стабильного энергоснабжения необходимо определить сколько и каких цехов будет на данном заводе, для того чтобы правильно рассчитать какое энергоснабжающее оборудование выбрать, на какой кабельной продукции остановить свой выбор.

## 2 Определение расчетных электрических нагрузок

Самым главным разделом при разработке проекта электроснабжения завода, является расчёт электрических нагрузок.

На рисунке 3 можно увидеть фрагмент схемы электроснабжения.

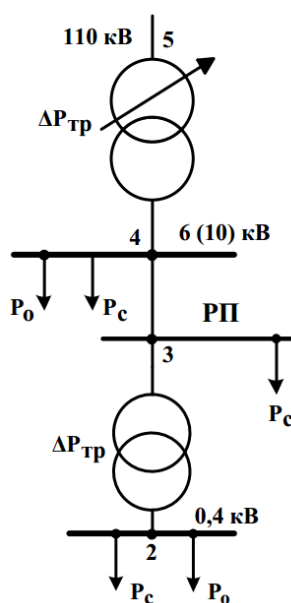


Рисунок 3 – Фрагмент схемы электроснабжения

Для расчета нагрузки цехов нам понадобятся следующие формулы [5]

$$P_c = K_c \cdot P_n, \quad (1)$$

$$Q_c = tg\varphi_n \cdot P_{p.c}, \quad (2)$$

где  $K_c$  – коэффициент спроса;

$P_n$  – номинальная мощность;

$tg\varphi_n$  – коэффициент мощности [27].

Мощность осветительной нагрузки рассчитывается исходя из удельной мощности на единицу площади [5]:

$$P_{н.о} = P_{уд} \cdot F, \quad (3)$$

где « $P_{н.о}$  – номинальная мощность осветительной нагрузки данного цеха, кВт;

$F$  – площадь территории цеха, м<sup>2</sup>;

$p_{уд}$  – удельная мощность осветительной нагрузки, Вт/м<sup>2</sup>.» [9]

Расчетные мощности осветительной нагрузки определяются по формулам:

$$P_o = k_{с.о} \cdot P_{р.о} \cdot k_{пп}, \quad (4)$$

$$Q_o = tg\varphi_{н.о} \cdot P_{р.о}, \quad (5)$$

где  $P_{н.о}$  – номинальная мощность осветительной нагрузки цеха;

$K_{с.о}$  – коэффициент спроса для осветительной нагрузки [6];

$K_{пп}$  – коэффициент потерь в пускорегулирующей аппаратуре.

Для газоразрядных источников света примем  $k_{пп} = 1,05$ ,  $tg\varphi_{н.о} = 0,48$  при  $\cos\varphi = 0,9$  [31].

Тогда расчётные значения активной мощности цеха ( $P_{р.ц}$ ) и реактивной мощности цеха ( $Q_{р.ц}$ ) ((рисунки 3, точка 2) определяются по формулам» [5]:

$$P_{р.ц} = P_c + P_o, \quad (6)$$

$$Q_{р.ц} = Q_c + Q_o. \quad (7)$$

Полная мощность:

$$S_{р.ц} = \sqrt{P_{р.ц}^2 + Q_{р.ц}^2}. \quad (8)$$

Расчетный ток узла нагрузки:

$$I_{P.Ц} = \frac{S_{P.Ц}}{\sqrt{3} \cdot U_H} \quad (9)$$

Исходные данные для цеха №1 (склад ЛВЖ):  $P_H=240$  кВт. Справочные данные для цеха:  $K_c=0,4$ ;  $\cos\varphi=0,8$ ;  $F=1783$  м<sup>2</sup>;  $\rho_{уд}=8$  Вт/м<sup>2</sup>;  $K_{co}=0,6$ .

Расчетные мощности:

$$P_{p.c} = K_c \cdot P_H, \quad (10)$$

$$Q_{p.c} = tg\varphi \cdot P_{p.c}, \quad (11)$$

$$P_{p.o} = F_{уд} \cdot K_{пра}, \quad (12)$$

$$Q_{p.o} = tg\varphi_0 \cdot P_{p.o}, \quad (13)$$

$$P_{p.c} = 0,4 \cdot 240 = 96 \text{ кВт},$$

$$Q_{p.c} = 0,75 \cdot 96 = 72 \text{ квар},$$

$$P_{p.o} = 1783 \cdot 8 \cdot 10^{-1} \cdot 0,6 \cdot 1,1 = 9,4 \text{ кВт},$$

$$Q_{p.o} = 9,4 \cdot 0,484 = 4,56 \text{ квар}.$$

Расчетные значения нагрузок цеха:

$$P_{p.ц} = P_{p.c} + P_{p.o}, \quad (14)$$

$$Q_{p.ц} = Q_{p.c} + Q_{p.o}, \quad (15)$$

$$S_{p.ц} = \sqrt{P_{p.ц}^2 + Q_{p.ц}^2}, \quad (16)$$

$$P_{p.ц} = 96 + 9,4 = 105,4 \text{ кВт},$$

$$Q_{p.ц} = 72 + 4,56 = 76,6 \text{ квар},$$

$$S_{p.ц} = \sqrt{105,4^2 + 76,6^2} = 130,3 \text{ кВА},$$

$$I_{P.Ц} = \frac{130,3}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 188 \text{ А}.$$

Результаты расчётов для остальных цехов сведём в таблицу 3.

Таблица 3 – Расчетные нагрузки цехов до 1000 В

№ На ГП	Наименование цеха	cosφ	Руст, кВт	Ксо	кс	Ррс, кВт	Qрс, квар	руд	Рро, кВт	Qро, квар	Ррц, кВт	Qрц, квар	Срц, кВ·А
1	Склад ЛВЖ	0,8	240	0,6	0,4	96	72,00	8	9,4	4,56	105,4	76,6	130,3
2	Цех полупродуктов	0,8	1700	0,95	0,6	1020	765,00	10	45,0	21,80	1065,0	786,8	1324,1
3	Склад кислот	0,7	238	0,6	0,4	95,2	97,12	8	9,5	4,59	104,7	101,7	146,0
4	Холодильная установка (0,4 кВ)	0,8	2500	0,95	0,7	1750	1312,50	10	383,7	185,86	2133,7	1498,4	2607,3
5	Компрессорная (0,4 кВ)	0,9	2100	0,95	0,8	1680	813,66	10	191,8	92,90	1871,8	906,6	2079,8
6	Градирня (0,4 кВ)	0,8	440	0,95	0,8	352	264,00	8	37,1	17,97	389,1	282,0	480,5
7	Насосная	0,8	4100	0,95	1	4100	3075,00	10	88,1	42,68	4188,1	3117,7	5221,1
8	Цех прямых красителей	0,9	4764	0,95	0,6	2858,4	1384,39	10	76,8	37,17	2935,2	1421,6	3261,3
9	Цех активных красителей	0,8	1497	0,95	0,8	1197,6	898,20	10	42,1	20,39	1239,7	918,6	1542,9
10	Цех натриевой соли	0,6	953	0,95	0,5	476,5	635,33	10	23,7	11,46	500,2	646,8	817,6
11	Очистные сооружения	0,8	1700	0,95	0,7	1190	892,50	10	54,2	26,24	1244,2	918,7	1546,6
12	Система вентиляции	0,8	3650	0,95	0,6	2190	1642,50	10	57,3	27,76	2247,3	1670,3	2800,0
13	Ремонтно-механический цех	0,8	440	0,95	0,5	220	165,00	10	8,9	4,30	228,9	169,3	284,7
14	Бытовой корпус	0,7	504	0,9	0,5	252	257,09	14	12,9	6,24	264,9	263,3	373,5
15	Газоспасательная станция	0,8	440	0,95	0,5	220	165,00	10	8,2	3,96	228,2	169,0	283,9
16	Подсобный цех	0,7	440	0,95	0,6	264	269,33	12	11,6	5,61	275,6	274,9	389,3
17	Административный корпус	0,8	544	0,9	0,7	380,8	285,60	14	17,5	8,48	398,3	294,1	495,1
18	Столовая	0,7	381	0,9	0,3	114,3	116,61	14	11,6	5,62	125,9	122,2	175,5
19	Склад готовой продукции	0,8	354	0,6	0,4	138,06	103,55	8	10,6	5,12	148,6	108,7	184,1
20	Магазин	0,7	50	0,9	0,3	15	15,30	14	7,3	3,53	22,3	18,8	29,2

## 2.1 Расчетные нагрузки на стороне высшего напряжения цеховой ТП

«По расчётным нагрузкам на шинах низшего напряжения цеховой подстанции (рисунок 3, точка 2) определяем расчётные значения нагрузок на стороне ВН цеховых трансформаторных подстанций (рисунок 3, точка 3) с учётом потерь в питающих трансформаторах» [5].

Тип трансформатора еще не определен, поэтому можно принять следующие потери:

$$\Delta P_{\text{тр}} \approx 0,02 \cdot S_{\text{р.ц.}}, \text{ кВт}, \quad (17)$$

$$\Delta Q_{\text{тр}} \approx 0,1 \cdot S_{\text{р.ц.}}, \text{ квар}, \quad (18)$$

$$\Delta P_{\text{тр}} = 0,02 \times 130,3 = 2,6 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{тр}} = 0,1 \times 130,3 = 13,0 \text{ квар}.$$

Расчетная активная мощность:

$$P_{\text{р.в.ц.}} = P_{\text{р.ц.}} + \Delta P_{\text{тр}}, \text{ кВт}, \quad (19)$$

$$P_{\text{р.в.ц.}} = 105,4 + 2,6 = 108,0 \text{ кВт}.$$

Расчетная реактивная мощность [15]:

$$Q_{\text{р.в.ц.}} = Q_{\text{р.ц.}} + \Delta Q_{\text{тр}}, \text{ квар}, \quad (20)$$

$$Q_{\text{р.в.ц.}} = 76,6 + 13,0 = 89,6 \text{ квар}.$$

Расчетная полная мощность:

$$S_{\text{р.в.ц.}} = \sqrt{P_{\text{р.в.ц.}}^2 + Q_{\text{р.в.ц.}}^2}, \text{ кВ} \cdot \text{А}, \quad (21)$$

$$S_{p.v.c.} = \sqrt{108,0^2 + 89,6^2} = 140,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Расчетный ток равен:

$$I_{p.v.c.} = \frac{S_{p.v.c.}}{\sqrt{3}U_H}, \text{ А}, \quad (22)$$

$$I_{p.v.c.} = \frac{140,3}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 202,6 \text{ А}$$

Результаты расчета занесем в таблицу 4.

Расчёт нагрузок ЭП 10 кВ произведём на примере цеха №4 (холодильная установка (10 кВ — СД)).

Расчетная нагрузка:

$$P_{p.c.} = 0,9 \cdot 9000 = 7200 \text{ кВт},$$

$$S_{p.c.} = \sqrt{7200^2 + 0,0^2} = 7200 \text{ кВ} \cdot \text{А},$$

$$I_{p.c.} = \frac{7200,0}{\sqrt{3} \cdot 10} = 415,69 \text{ А}.$$

Таблица 4 – Расчетные нагрузки цехов предприятия 0,4 кВ

Наименование цеха	$\Delta P_{тр}$ , кВт	$\Delta Q_{тр}$ , квар	$P_{рвц}$ , кВт	$Q_{рвц}$ , квар	$S_{рвц}$ , кВ·А	$I_{расч}$ , А
Склад ЛВЖ	2,61	13,03	108,02	89,59	140,34	202,56
Цех полупродуктов	26,48	132,41	1091,49	919,21	1426,99	2059,68
Склад кислот	2,92	14,60	107,60	116,31	158,45	228,70
Холодильная установка (0,4 кВ)	52,15	260,73	2185,89	1759,08	2805,80	4049,82
Компрессорная (0,4 кВ)	41,60	207,98	1913,41	1114,54	2214,34	3196,13
Градирия (0,4 кВ)	9,61	48,05	398,70	330,02	517,57	747,04
Насосная	104,42	522,11	4292,55	3639,80	5627,97	8123,28
Цех прямых красителей	65,23	326,13	3000,38	1747,69	3472,28	5011,80

Продолжение таблицы 4

Наименование цеха	$\Delta P_{тр}$ , кВт	$\Delta Q_{тр}$ , квар	$P_{рвц}$ , кВт	$Q_{рвц}$ , квар	$S_{рвц}$ , кВ·А	$I_{расч}$ , А
Цех активных красителей	30,86	154,29	1270,56	1072,89	1662,95	2400,27
Цех натриевой соли	16,35	81,76	516,51	728,55	893,07	1289,04
Очистные сооружения	30,93	154,66	1275,11	1073,40	1666,76	2405,76
Система вентиляции	56,00	280,00	2303,31	1950,26	3018,07	4356,21
Ремонтно-механический цех	5,69	28,47	234,57	197,77	306,81	442,84
Бытовой корпус	7,47	37,35	272,36	300,69	405,70	585,58
Газоспасательная станция	5,68	28,39	233,86	197,36	306,01	441,68
Подсобный цех	7,79	38,93	283,37	313,87	422,87	610,36
Административный корпус, маркетинг	9,90	49,51	408,21	343,59	533,56	770,13
Административный корпус, маркетинг	9,90	49,51	408,21	343,59	533,56	770,13
Столовая	3,51	17,55	129,41	139,78	190,48	274,94
Склад продукции	3,68	18,41	152,32	127,08	198,37	286,32
Магазин	0,58	2,92	22,87	21,75	31,57	45,56

Расчетные нагрузки ЭП 10 кВ определяем через коэффициент спроса, проведенные расчеты сводим в таблицу 5.

Таблица 5 – Расчетные нагрузки цехов предприятия 10 кВ

Наименование цеха	$P_{уст}$ , кВт	$\cos\phi$	$k_c$	$P_{рс}$ , кВт	$Q_{рс}$ , квар	$S_{рс}$ , кВ·А	$I_{расч}$ , А
Холодильная установка (10 кВ)	9000	1	0,8	7200	0	7200	415,69
Градирня (10 кВ)	2100	1	0,7	1470	0	1470	84,87
Компрессорная (10 кВ — АД)	6800	0,8	0,9	6120	4590	7650	441,67



## 2.2 Расчет мощности компенсирующих устройств узла нагрузки

«Мощность компенсирующих устройств в узле нагрузки определяется по формулам:

$$Q_{куi} = P_{pi} \cdot K_i, \quad (23)$$

где  $P_i$  – расчетная активная мощность  $i$ -го узла нагрузки, кВт;

$K$  – коэффициент пропорциональности» [7].

«Расчетную мощность компенсирующих устройств округляют до ближайшей (по стандартной шкале) мощности» [5].

Рассмотрим расчет на примере цеха № 1 (склад ЛВЖ):  $P_p=108$  кВт,  $Q_p=89,6$  квар. Расчетная мощность компенсирующих устройств цеха №1 (см. таблицу 6):

$$Q_{p.ку} = 108 \cdot 0.57 = 51.07 \text{ квар.}$$

Таблица 6 – Компенсация реактивной мощности

Наименование цеха	Qр.ц, квар	cosφ	K	Qр.ку, квар	Q БСКст, квар	Qр.БСК, квар	Sp.БСК, кВ·А
0,4 кВ							
Склад ЛВЖ	89,59	0,77	0,57	51,07	0,00	89,59	140,34
Цех полупродуктов	919,21	0,76	0,57	523,95	500,00	419,21	1169,23
Склад кислот	116,31	0,68	0,82	95,37	0,00	116,31	158,45
Холодильная установка (0,4 кВ)	1759,08	0,78	0,54	949,91	1000,00	759,08	2313,94
Компрессорная (0,4 кВ)	1114,54	0,86	0,30	334,36	400,00	714,54	2042,47
Насосная	3639,80	0,76	0,57	2074,68	2000,00	1639,80	4595,09
Градирия (0,4 кВ)	330,02	0,77	0,54	178,21	200,00	130,02	419,37
Цех прямых красителей	1747,69	0,86	0,30	524,31	600,00	1147,69	3212,39

Продолжение таблицы 6

Наименование цеха	Qp.ц, квар	cosφ	K	Qp.ку, квар	Q БСКст, квар	Qp.БСК, квар	Sp.БСК, кВ·А
Цех активных красителей	1072,89	0,76	0,57	611,54	600,00	472,89	1355,71
Цех натриевой соли	728,55	0,58	1,19	866,98	900,00	-171,45	544,22
Очистные сооружения	1073,40	0,77	0,57	611,84	600,00	473,40	1360,15
Система вентиляции	1950,26	0,76	0,57	1111,65	1100,00	850,26	2455,23
Ремонтно-механический цех	197,77	0,76	0,57	112,73	0,00	197,77	306,81
Бытовой корпус	300,69	0,67	0,82	246,56	300,00	0,69	272,36
Газоспасательная станция	197,36	0,76	0,57	112,49	200,00	-2,64	233,88
Подсобный цех	313,87	0,67	0,82	257,38	300,00	13,87	283,71
Административный корпус, маркетинг	343,59	0,77	0,57	195,85	200,00	143,59	432,72
Столовая	139,78	0,68	0,82	114,62	0,00	139,78	190,48
Склад готовой продукции	127,08	0,77	0,57	72,44	0,00	127,08	198,37

### 2.3 Расчетные нагрузки на шинах низшего напряжения ППЭ

Для дальнейшей работы, нам необходимо определить мощность осветительной нагрузки на предприятии. Площадь территории предприятия ( $F_{\text{тер}}$ ) для освещения составляет [29]:

$$F_{\text{тер}} = F_3 - F_{\Sigma\text{ц}}, \text{ м}^2, \quad (24)$$

где  $F_3$  – площадь по периметру всего предприятия,  $\text{м}^2$ ;

$F_{\Sigma\text{ц}}$  – сумма площади всех цехов предприятия,  $\text{м}^2$ .

$$F_{\text{тер}} = 209421 - 108253 = 101168 \text{ м}^2.$$

Активная и реактивная мощности:

$$P_{0.ТЕР} = F_{ТЕР} \cdot \rho_{УД} \cdot k_{С.О.} \cdot k_{ПРА}, \text{ кВт}, \quad (25)$$

$$Q_{0.ТЕР} = P_{0.ТЕР} \cdot tg\varphi_o, \text{ квар}, \quad (26)$$

$$P_{0.ТЕР} = 101168 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 1,1 = 222,6 \text{ кВт},$$

$$Q_{0.ТЕР} = 222,6 \times 0,484 = 107,8 \text{ квар}.$$

Расчетные нагрузки ППЭ:

$$P_{р.нн.ппэ} = K_o \cdot K_{ПОТ} \times \Sigma P_{р.з} + P_{0.ТЕР}, \quad (27)$$

$$Q_{р.нн.ппэ} = K_o \cdot K_{ПОТ} \times \Sigma Q_{р.з} + Q_{0.ТЕР}, \quad (28)$$

$$P_{р.нн.ппэ} = (20200,5 + 14790) \cdot 0,9 \cdot 1,05 + 222,6 = 33288,6 \text{ кВт},$$

$$Q_{р.нн.ппэ} = (7283,2 + 4590,0) \cdot 0,9 \cdot 1,05 + 107,8 = 11328,0 \text{ квар},$$

$$S_{р.нн.ппэ} = \sqrt{33288,6^2 + 11328,0^2} = 35163,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

#### 2.4 Расчетные нагрузки на высшем напряжении ППЭ

«Потери в силовом цеховом трансформаторе, так как его тип ещё не определён, можно принять:» [5]

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot S_{р.ц}, \quad (29)$$

$$\Delta Q_T = 0,1 \cdot S_{р.ц}. \quad (30)$$

«Расчетное значение полной мощности:» [5]

$$S_3 = \sqrt{P_3^2 + Q_3^2}, \quad (31)$$

где  $S_3$  - расчетное значение полной мощности на стороне ВН ПГВ, кВ·А

Нагрузки на стороне ВН ПГВ:

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot 35163,2 = 703,3 \text{ кВт},$$

$$\begin{aligned}\Delta Q_T &= 0,1 \cdot 35163,2 = 3516,3 \text{ квар}, \\ P_3 &= 33288,6 + 703,3 = 33991,8 \text{ кВт}, \\ Q_3 &= 11328,0 + 3516,3 = 14844,3 \text{ квар}, \\ S_3 &= \sqrt{33991,8^2 + 14844,3^2} = 37091,8 \text{ кВ} \cdot \text{А}.\end{aligned}$$

Выводы по разделу 2: я использовала формулы в данном разделе работы, чтобы найти расчетные нагрузки. «Важным этапом проектирования системы электроснабжения является определение электрических нагрузок. Зная электрические нагрузки, можно выбрать нужное число и мощности силовых трансформаторов, мощности и места подключения компенсирующих устройств, выбрать и проверить токоведущие элементы по условию допустимого нагрева, рассчитать потери и колебания напряжения и выбрать защиты.» [5]

### 3 Картограмма и центр электрических нагрузок завода

Радиус окружности для  $i$ -го цеха  $r_i$ :

$$r = \sqrt{\frac{P_P}{\pi \cdot m}}, \quad (32)$$
$$r = \sqrt{\frac{108,0}{3,14 \cdot 0,30}} = 10,7 \text{ мм.}$$

Осветительная нагрузка цехов изображена в виде окружности. Угол определяется по формуле [8]:

$$\alpha = \frac{P_{\text{осв}i} \cdot 360^\circ}{\pi \cdot r^2 \cdot m} \quad (33)$$

где  $P_{\text{осв}i}$  – активная мощность осветительной нагрузки  $i$  – го цеха, кВт.

#### 3.1 Расчет и построение картограммы электрических нагрузок

«Произведём расчёт на примере цеха № 1 (склад ЛВЖ), результаты расчетов остальных цехов сведём в таблицу 11.

Угол равен:

$$\alpha = \frac{P_{\text{осв}i} \cdot 360^\circ}{\pi \cdot r^2 \cdot m}, \quad (34)$$
$$\alpha = \frac{9,4 \cdot 360^\circ}{3,14 \cdot 10,7^2 \cdot 0,30} = 31,4^\circ$$

#### 3.2 Определение центра электрических нагрузок предприятия

Координаты центра электрических нагрузок предприятия определяются по следующим выражениям:

$$X_0 = \frac{\sum(P_{P,Цi} \cdot x_i)}{\sum P_{P,Цi}}, \text{ м}, \quad (35)$$

$$Y_0 = \frac{\sum(P_{P,Цi} \cdot y_i)}{\sum P_{P,Цi}}, \text{ м}, \quad (36)$$

где  $x_i, y_i$  – координаты ЦЭН для  $i$ -го цеха;

$P_{P_i}$  – расчетная нагрузка  $i$ -го цеха,

$$X_0 = \frac{4656442,9 + 2502630}{20200,5 + 14790} = 204,60 \text{ м},$$

$$Y_0 = \frac{5439895,5 + 5030580}{20200,5 + 14790} = 299,24 \text{ м}.$$

По данным из таблицы 7, построим картограмму электрических нагрузок (рисунок 4).

Таблица 7 – Результаты расчетов картограммы нагрузок

№ На ГП	Ррци, кВт	Рро, кВт	х, мм	у, мм	гi, мм	аi, град	Ррци·хi, кВт·мм·10 <sup>-4</sup>	Ррци·уi, кВт·мм·10 <sup>-4</sup>
1	108,02	9,41	51	514	10,71	31,38	0,551	5,552
2	2185,89	383,74	169	254	48,16	63,20	36,942	55,522
3	107,60	9,48	137	514	10,68	31,71	1,474	5,530
4	1091,49	45,01	258	513	34,03	14,84	28,160	55,993
5	1913,41	191,81	133	417	45,06	36,09	25,448	79,789
6	4292,55	88,12	329	362	67,49	7,39	141,225	155,390
7	398,70	37,09	321	442	20,57	33,49	12,798	17,623
8	3000,38	76,76	332	257	56,42	9,21	99,613	77,110
9	1270,56	42,10	342	160	36,72	11,93	43,453	20,329
10	516,51	23,66	325	93	23,41	16,49	16,787	4,804
11	1275,11	54,17	204	120	36,78	15,29	26,012	15,301
12	13	233,86	8,18	99	117	15,75	12,60	2,315
13	14	283,37	11,59	249	79	17,34	14,72	7,056
14	2303,31	57,31	36	166	49,44	8,96	8,292	38,235
15	234,57	8,87	134	78	15,78	13,62	3,143	1,830

Продолжение таблицы 7

№ на ГП	Ррці, кВт	Рро, кВт	х, мм	у, мм	гі, мм	аі, град	Ррці·хі, кВт·мм·10 <sup>-4</sup>	Ррці·уі, кВт·мм·10 <sup>-4</sup>
16	272,36	12,89	189	78	17,00	17,04	5,148	2,124
17	408,21	17,51	39	75	20,81	15,44	1,592	3,062
18	129,41	11,60	43	25	11,72	32,27	0,556	0,324
19	152,32	10,58	304	28	12,71	25,00	4,630	0,426
20	22,87	7,29	196	31	4,93	114,74	0,448	0,071
Итого	20200,49		-				465,644	543,990
10 кВ								
4	7200,00	-	169,0	254,0	87,4	-	169,0	254,0
5	6120,00	-	133,0	417,0	80,6	-	81,396	255,204
7	1470,00	-	321,0	442,0	39,5	-	47,187	64,974
Итого	14790,00	-	250,263	503,058	-		-	-

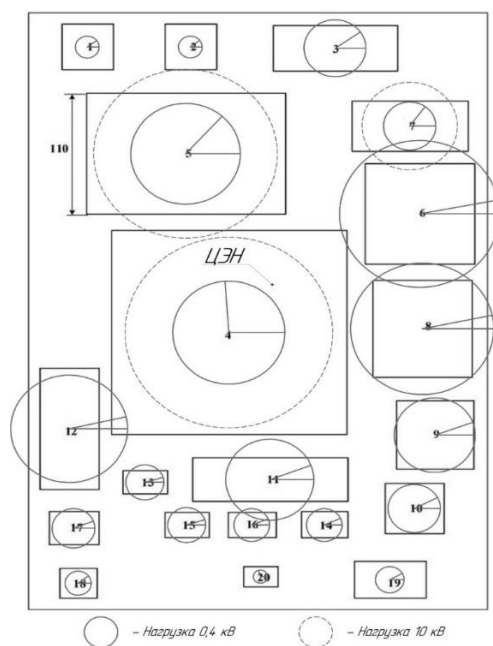


Рисунок 4 – Картограмма электрических нагрузок

Выводы по разделу 3: в данном разделе я рассчитала и построила картограммы электрических нагрузок завода, также смогла определить центр электрических нагрузок предприятия.

## 4 Расчет и выбор системы питания

Распределительные устройства (РУ) на электростанциях и подстанциях предназначены для электроэнергии от генераторов электростанций, от трансформаторов или линий электропередачи и для распределения принятой электроэнергии между потребителями [11].

В состав РУ входят: коммутационная аппаратура, устройства защиты и автоматики, шинопроводы, измерительные приборы и др.

Распределительные устройства подразделяются на закрытые распределительные устройства (ЗРУ), в которых оборудование размещено в закрытых помещениях, и открытые (ОРУ), в которых оборудование размещается на открытом воздухе.

### 4.1 Выбор рационального напряжения системы питания

Рациональное напряжение  $U_{\text{рац}}$  :

$$U_{\text{рац}} = 16^4 \sqrt{P_p l}, \text{ кВ}, \quad (37)$$
$$U_{\text{рац}} = 16^4 \sqrt{33288,6 \cdot 10^{-3} \cdot 27} = 87,61 \text{ кВ}.$$

В связи с тем, что ТЭР в работе не предусмотрен, то берем за рациональное напряжение ближайшее большее напряжение, т.е. 110 кВ. » [5]

### 4.2 Компенсация реактивной мощности системы распределения

«Согласно [4] нормативное значение коэффициента реактивной мощности  $\text{tg}\varphi_{\text{Э}} = 0,5$ .

Далее определим экономическую величину перетока реактивной мощности:» [4]



$$Q_3 = P_3 \cdot \operatorname{tg}\varphi_3, \text{ квар}, \quad (38)$$

$$Q_3 = 33991,8 \cdot 0,5 = 16995,9 \text{ квар},$$

$$Q_3 = 14844,3 \text{ квар} \leq Q_3 = 16995,9 \text{ квар}.$$

### 4.3 Построение суточных графиков нагрузок

Составляются графики нагрузок предприятия с учётом компенсирующих устройств (таблица 8, рисунки 5, 6, 7).

Таблица 8 – Суточный график нагрузок предприятия с учетом компенсации (зима, лето)

t, ч	%Ppз	P, МВт	Оз, Мвар	Sз, МВ·А	%Pрл	Pл, МВт	Ол, Мвар	Sl, МВ·А
0	70	23,3	7,9	24,6	92	30,6	10,4	32,4
1	72	24,0	8,2	25,3	92	30,6	10,4	32,4
2	78	26,0	8,8	27,4	92	30,6	10,4	32,4
3	85	28,3	9,6	29,9	90	30,0	10,2	31,6
4	79	26,3	8,9	27,8	92	30,6	10,4	32,4
5	96	30,6	10,4	32,4	92	30,6	10,4	32,4
6	90	30,0	10,2	31,6	88	29,3	10,0	30,9
7	92	30,6	10,04	32,4	89	29,6	10,1	31,3
8	97	32,6	11,1	34,5	94	31,3	10,6	33,1
9	100	33,3	11,3	35,2	96	32,0	10,9	33,8
10	100	33,3	11,3	35,2	97	32,3	11,0	34,1
11	97	32,3	11,0	34,1	97	32,3	11,0	34,1
12	94	31,6	10,8	33,4	95	31,6	10,8	33,4
13	98	32,6	11,1	34,5	96	32,0	10,9	33,8
14	98	32,6	11,1	34,5	96	32,0	10,9	33,8
15	96	32,0	10,9	33,8	96	32,0	10,9	33,8
16	93	31,0	10,5	32,7	93	31,0	10,5	32,7
17	95	31,6	10,8	33,4	92	30,6	10,4	32,4
18	95	31,6	10,8	33,4	91	30,3	10,3	32,0

Продолжение таблицы 8

t, ч	%Ppз	P, МВт	Оз, Мвар	Sз, МВ·А	%Ppл	Pл, МВт	Ол, Мвар	Sl, МВ·А
19	95	31,6	10,8	33,4	91	30,3	10,3	32,0
20	94	31,3	10,6	33,1	91	30,3	10,3	32,0
21	97	32,3	11,0	34,1	95	31,6	10,8	33,4
22	96	32,0	10,9	33,8	95	31,6	10,8	33,4
23	94	31,5	10,6	33,1	94	31,3	10,6	33,1

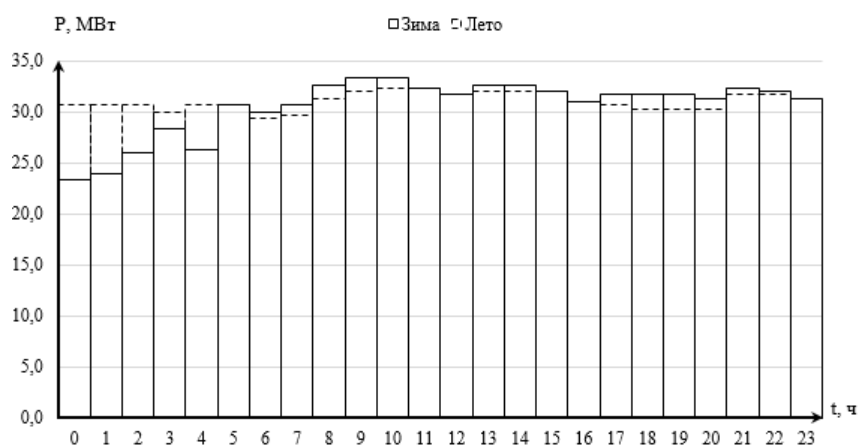


Рисунок 5 – Суточный график по активной мощности (зима, лето)

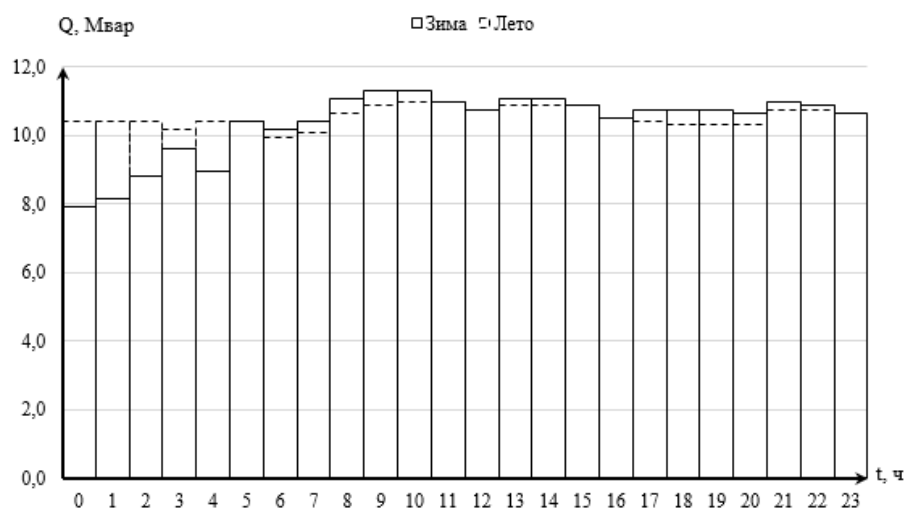


Рисунок 6 – Суточный график по реактивной мощности (Зима Лето)

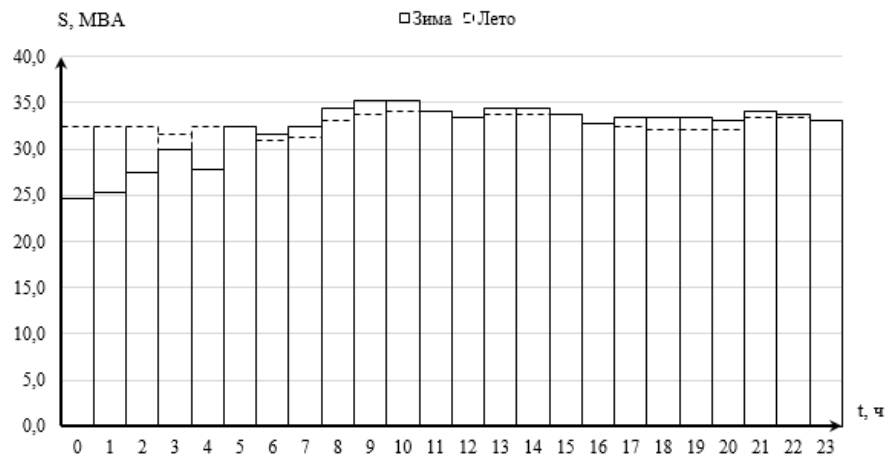


Рисунок 7 – Суточный график полной мощности (Зима Лето) на стороне НН ППЭ

#### 4.4 Построение годового графика нагрузок

Годовой график активной мощности показан на рисунке 8.

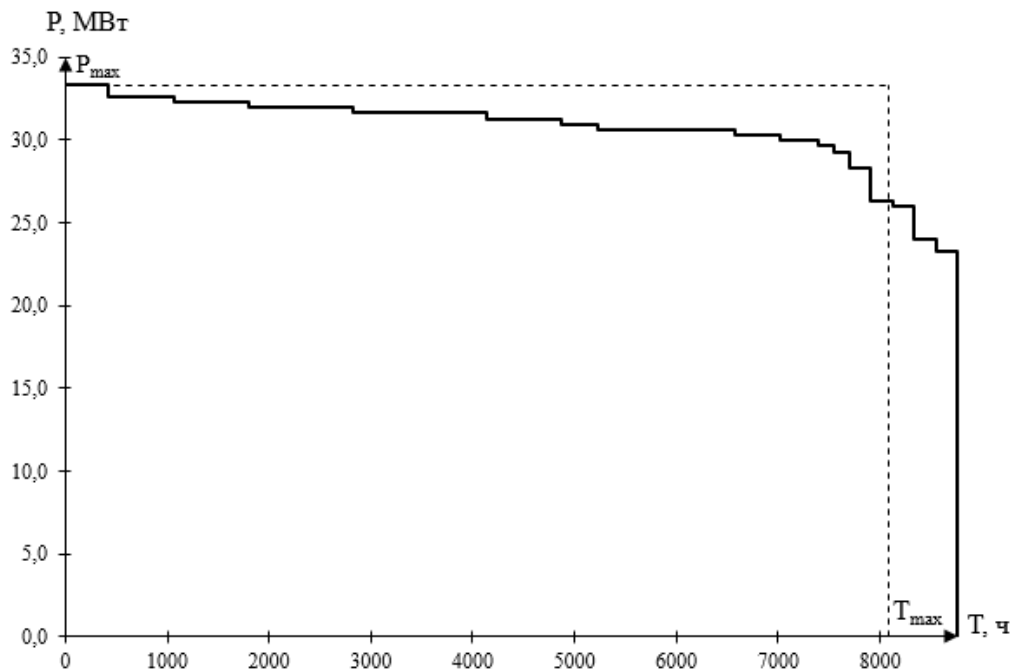


Рисунок 8 – Годовой график активной мощности по продолжительности

Продолжительность работы:

$$T_{max} = \frac{W_{год}}{P_{max}}, \text{ ч}, \quad (39)$$
$$T_{max} = \frac{269058,0}{33,3} = 8082,6 \text{ ч.}$$

#### 4.5 Выбор силовых трансформаторов пункта приема электроэнергии

Среднеквадратичные мощности [28]:

$$P_{ср.кв.} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 \cdot \Delta t_i}{\sum \Delta t_i}}, \text{ МВт}, \quad (40)$$

$$\cos \varphi_3 = \frac{P_3}{\sqrt{P_3^2 + Q_3^2}}, \quad (41)$$

$$Q_{ср.кв.} = \sqrt{\frac{\sum Q_i^2 \cdot \Delta t_i}{\sum \Delta t_i}}, \text{ МВт}, \quad (42)$$

$$S_{ср.кв.} = \sqrt{P_{ср.кв.}^2 + Q_{ср.кв.}^2}, \text{ кВА}, \quad (43)$$

$$P_{ср.кв.} = \sqrt{\frac{22511,1}{24}} = 30,6 \text{ МВт},$$

$$\cos \varphi_3 = 0,95;$$

$$Q_{ср.кв.} = \sqrt{\frac{2606,8}{24}} = 10,42 \text{ МВт},$$

$$S_{ср.кв.} = \sqrt{30,6^2 + 10,42^2} = 32,4 \text{ кВА}.$$

Мощность одного трансформатора для n-трансформаторной подстанции:

$$S_{нтр} \geq \frac{S_{ср.кв.}}{n}, \text{ МВА}, \quad (44)$$

$$S_{\text{нтр}} = \frac{32,4}{2} = 16,18 \text{ МВА.}$$

Коэффициент предварительной загрузки  $K_1$ :

$$K_1 = \frac{1}{S_{\text{тр}} \cdot n} \cdot \sqrt{\frac{\sum S_i^2 \cdot \Delta t_i}{\sum \Delta t_i}} \quad (45)$$

Коэффициент аварийной перегрузки  $K_2$ :

$$K_2 = \frac{1}{S_{\text{тр}}} \cdot \sqrt{\frac{\sum S_{\Delta h_i}^2 \cdot \Delta h_i}{\sum \Delta h_i}} \quad (46)$$

Коэффициент предварительной загрузки  $K_1$  и коэффициент максимума:

$$K_1 = \frac{1}{S_{\text{тр}} \cdot n} \cdot \sqrt{\frac{\sum S_i^2 \cdot \Delta t_i}{\sum \Delta t_i}}, \quad (47)$$

$$K_{\text{max}} = \frac{S_{\text{р.нн.ппэ}}}{S_{\text{тр}}}, \quad (48)$$

$$K_1 = \frac{1}{16 \cdot 2} \cdot \sqrt{\frac{25117,92}{24}} = 1,01,$$

$$K_{\text{max}} = \frac{35,2}{16} = 2,20.$$

Коэффициент аварийной перегрузки (в работе один трансформатор):

$$K'_2 = \frac{1}{S_{\text{тр}}} \cdot \sqrt{\frac{\sum S_{\Delta t_i}^2 \cdot \Delta h_i}{\sum \Delta h_i}}, \quad (49)$$

$$K'_2 = \frac{1}{16} \cdot \sqrt{\frac{25117,92}{24}} = 2,02.$$

Предварительно выбираем трансформатор ТДН – 25000/110 [10].

Коэффициент предварительной загрузки  $K_1$  [9]:

$$K_1 = \frac{1}{S_{\text{тр}} \cdot n} \cdot \sqrt{\frac{\sum S_i^2 \cdot \Delta t_i}{\sum \Delta t_i}}, \quad (50)$$
$$K_1 = \frac{1}{25 \cdot 2} \cdot \sqrt{\frac{25117,92}{24}} = 0,65.$$

Коэффициент максимума:

$$K_{\text{max}} = \frac{S_{\text{р.НН.ППЭ}}}{S_{\text{тр}}}, \quad (51)$$
$$K_{\text{max}} = \frac{35,2}{25} = 1,41.$$

Коэффициент аварийной перегрузки (в работе один трансформатор):

$$K'_2 = \frac{1}{S_{\text{тр}}} \cdot \sqrt{\frac{\sum S_{\Delta t_i}^2 \cdot \Delta h_i}{\sum \Delta h_i}}, \quad (52)$$
$$K'_2 = \frac{1}{25} \cdot \sqrt{\frac{24512,06}{23}} = 1,31.$$

Время аварийной перегрузки  $t_{\text{п}} = 23$  часа [12]. Проверим трансформатор по допустимой перегрузки в послеаварийном режиме по следующим условиям:

$$0,9 \cdot K_{\text{max}} < K'_2;$$
$$0,9 \cdot K_{\text{max}} = 0,9 \cdot 1,41 = 1,27 < 1,31.$$

Так как  $0,9 \cdot K_{\text{max}} < K'_2$  принимаем  $K_2 = K'_2$ .

## 4.6 Выбор схемы устройства высшего напряжения ППЭ

Используем провода ЛЭП–110 марки АС-95/16 сечением 95 мм<sup>2</sup> с  $I_{\text{доп}}=260$  А.

Распределительное устройство (РУ) на стороне высокого напряжения примем по схеме 110-4Н (см. рисунок 9).

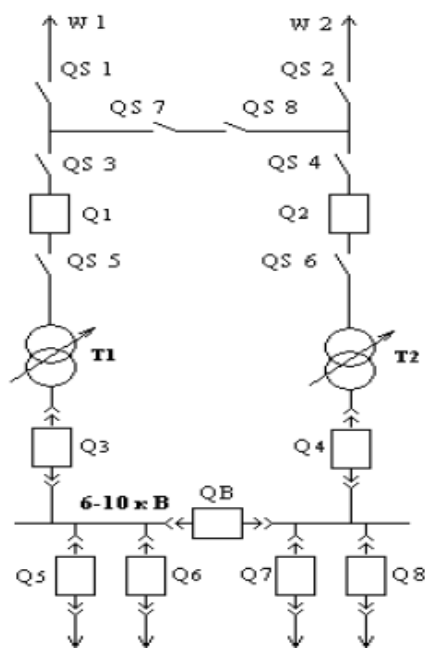


Рисунок 9 – Однолинейная схема устройства высшего напряжения ППЭ

Выводы по разделу 4: в данном разделе я сделала выбор в вопросе системы питания завода, произвела выбор компенсирующих устройств. Для того чтобы мне определиться с выбором силовых трансформаторов, маркой кабельной продукции для линий передач и линий энергоснабжения центра и устройств высшего напряжения ППЭ.

## 5 Расчет системы распределения

### 5.1 Выбор класса напряжения системы распределения и выбор мощности и места размещения цеховых трансформаторных подстанций

На основании того, что на лакокрасочном заводе нет энергоприемников напряжением 6 кВ, принимаем напряжение равным 10 кВ [13].

«Мощность трансформаторов и их число определяется выражениями:

$$S_{\text{ТР}} = \frac{S_{\text{Ц}}}{N \cdot K_3}, \quad (53)$$

$$N = \frac{S_{\text{Ц}}}{K_3 \cdot S_{\text{НТ}}}. \quad (54)$$

В цехах, где нагрузка не превышает 200 кВ·А, устанавливается силовой пункт 0,4 кВ (СП) который запитывается с шин ближайшей ТП. Но если цех находится на большом расстоянии от ближайшей ТП, то целесообразней будет установить в этом цехе КТП» [21].

Рассмотрим на примере цеха № 3:

$$S_{\text{Р.ТР}} = \frac{1169,23}{2 \cdot 0,75} = 779,48 \text{ кВ} \cdot \text{А},$$

$$N = \frac{1169,23}{0,9 \cdot 400} = 3,90.$$

«Выбираем 2КТП-400/10/0,4, в которой установлено 2 силовых масляных трансформатора ТМГ-СЭЩ-400/10 У3 (см. таблицу 9)» [14].

Проверка трансформаторов на перегрузочную способность:

$$k_{\text{Н.Р}} = \frac{S_{\text{Ц}}}{n_{\text{КТП}} \cdot n_{\text{ТР}} \cdot S_{\text{НТ}}}, \quad (55)$$



$$k_{\text{ПАР}} = \frac{S_M}{n_{\text{КТП}} \cdot n_{\text{ТР}} \cdot S_{\text{НТ}}}, \quad (56)$$

$$k_{\text{Н.Р}} = \frac{1169,23}{2 \cdot 2 \cdot 400} = 0,73,$$

$$k_{\text{ПАР}} = \frac{1169,23}{2 \cdot 1 \cdot 400} = 1,46.$$

Таблица 9 – Выбор число ТП и числа трансформаторов 10/0,4 кВ

Обозначение ТП	№ цеха, подкл. к ТП	СЦ, кВ·А	Тип КТП	Кн.р.	Кпар
3	3	1169	2x2КТП-СЭЩ-П-400/10/0,4-У3	0,73	1,46
4	4	2314	1x2КТП-СЭЩ-П-1600/10/0,4-У3	0,72	1,45
5	5,1,2	2341	1x2КТП-СЭЩ-П-1600/10/0,4-У3	0,73	1,46
6	6	4595	2x2КТП-СЭЩ-П-1600/10/0,4-У3	0,72	1,44
7	7	419	1x2КТП-СЭЩ-П-400/10/0,4-У3	0,52	1,05
8	8	3212	1x2КТП-СЭЩ-П-2500/10/0,4-У3	0,64	1,28
9	9	1356	1x2КТП-СЭЩ-П-1000/10/0,4-У3	0,68	1,36
10	10,19	743	2x2КТП-СЭЩ-П-250/10/0,4-У3	0,74	1,49
11	11	1360	1x2КТП-СЭЩ-П-1000/10/0,4-У3	0,68	1,36
12	12	2455	2x2КТП-СЭЩ-П-1000/10/0,4-У3	0,61	1,23
13	13	234	1x2КТП-СЭЩ-П-160/10/0,4-У3	0,73	1,46
14	14, 20	315	1x1КТП-СЭЩ-П-400/10/0,4-У3	0,79	-
15	15	307	1x1КТП-СЭЩ-П-400/10/0,4-У3	0,77	-
16	16	272	1x1КТП-СЭЩ-П-400/10/0,4-У3	0,68	-
17	17	623	1x1КТП-СЭЩ-П-630/10/0,4-У3	0,99	-

## 5.2 Потери мощности в трансформаторах цеховых подстанций

«Определим потери активной и реактивной мощности по формулам:»[3]

$$\Delta P_T = \Delta P_{XX} + K_{3.н.}^2 \cdot \Delta P_{КЗ}, \quad (57)$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{XX} + K_{3.н.}^2 \cdot \Delta Q_{КЗ}, \quad (58)$$

$$K_{3H} = \frac{S_M}{S_{H.T.}}, \quad (59)$$

$$\Delta Q_{K3} = \frac{U_K}{100} \cdot S_{H.T.}, \quad (60)$$

$$\Delta Q_{XX} = \frac{I_{XX}}{100} \cdot S_{H.T.}. \quad (61)$$

«Рассчитаем возможные потери в одном трансформаторе цеха № 1 (склад ЛВЖ):

$$\Delta P_T = 0,83 + 0,73^2 \cdot 5,9 = 3,98 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{K3} = \frac{4,5}{100} \cdot 400 = 18,00 \text{ квар},$$

$$\Delta Q_{XX} = \frac{1,8}{100} \cdot 400 = 7,20 \text{ квар},$$

$$\Delta Q_T = 7,20 + 0,73^2 \cdot 18,00 = 16,81 \text{ квар},$$

$$\Delta S_T = \sqrt{3,98^2 + 16,81^2} = 34,55 \text{ кВА}.$$

Потери в остальных цеховых ТП представлены в таблице 11.

Далее приведены справочные характеристики трансформаторов 10/0,4 кВ (см. таблица 10), результаты уточнения БСК (см. таблица 12) [16]

Таблица 10 – Справочные характеристики трансформаторов 10/0,4 кВ

Тип трансформатора	$\Delta P_{XX}$ , кВт	$\Delta P_{K3}$ , кВт	$U_{K3}$ , %	$I_{XX}$ , %
ТМГ–160/10	0,56	3,3	5,5	4
ТМГ–250/10	0,58	3,7	4,5	1,9
ТМГ–400/10	0,83	5,9	4,5	1,8
ТМГ–630/10	1,05	1,9	5,5	1,8
ТМГ–1000/10	1,55	10,8	5,5	1,2
ТМГ–1600/10	2,1	16,5	6	1
ТМГ–2500/10	3,35	26,3	6	0,8

Таблица 11 – Потери в трансформаторах 10/0,4 кВ

№ ТП*	Тип КТП	Кз.нр	$\Delta P_T$ , кВт	$\Delta Q_{ХХ}$ , квар	$\Delta Q_{КЗ}$ , квар	$\Delta Q_T$ , квар	$\Delta S_T$ , кВт·А
3	4x400	0,73	3,98	7,2	18	16,8	34,55
4	2x1600	0,72	2,10	16	96	66,2	132,46
5	2x1600	0,73	10,93	16	96	67,4	136,54
6	4x1600	0,72	10,61	16	96	65,5	132,68
7	2x400	0,52	2,45	7,2	18	12,1	24,78
8	2x2500	0,64	14,21	20	150	81,9	166,28
9	2x1000	0,68	6,51	12	55	37,3	75,67
10	4x250	0,74	2,62	4,75	11,25	11,0	22,53
11	2x1000	0,68	6,55	12	55	37,4	76,01
12	4x1000	0,61	5,62	12	55	32,7	66,40
13	2x160	0,73	2,32	6,4	8,8	11,1	22,68
14	1x400	0,79	4,50	7,2	18	18,4	18,92
15	1x400	0,77	4,30	7,2	18	17,8	18,30
16	1x400	0,68	3,57	7,2	18	15,5	15,95
17	1x630	0,99	2,91	11,34	34,65	45,2	45,34

Таблица 12 – Уточнённый выбор БСК

№ ТП (СП)	Q БСКст, квар	Тип БСК	Кол-во	Q1бск, квар
3	500	АКУ 0,4–125–25У3	4	125
4	1000	АКУ 0,4–500–25У3	2	500
5	400	АКУ 0,4–200–25У3	2	200
6	2000	АКУ 0,4–500–25У3	4	500
7	200	АКУ 0,4–100–25У3	2	100
8	600	АКУ 0,4–300–25У3	2	300
9	600	АКУ 0,4–300–25У3	2	300
10	900	АКУ 0,4–225–25У3	4	225
11	600	АКУ 0,4–300–25У3	2	300
12	1100	АКУ 0,4–275–25У3	4	275
13	200	АКУ 0,4–100–25У3	2	100
14	300	АКУ 0,4–300–25У3	1	300
16	300	АКУ 0,4–300–25У3	1	300

### 5.3 Транспорт электрической энергии в системе распределения

Трассы кабельных линий электропередачи приведены на рисунке 10.

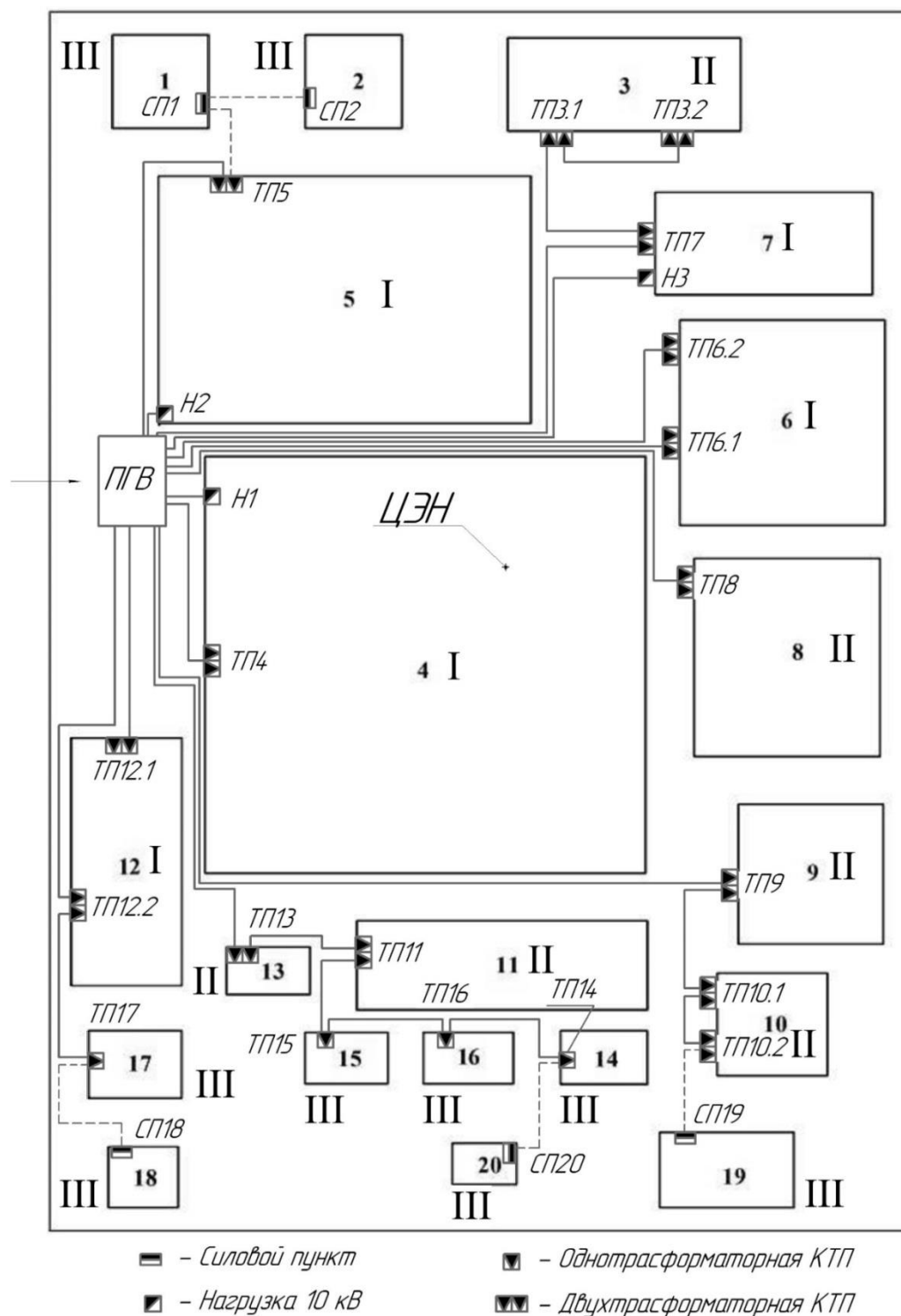


Рисунок 10 – Распределение электрической энергии предприятия

## 5.4 Выбор двигателей

Асинхронный двигатель обеспечивает ступенчатое регулирование скорости (практически не больше четырех ступеней). Асинхронные двигатели с фазным ротором успешно применяются для механизмов, работающих с частыми пусками и остановками и требующих регулирования скорости введением сопротивлений в цепь ротора [25].

Когда имеет место нерегулируемые электроприводы, которые работают длительно без частных пусков и остановок используются синхронные двигатели.

Выберем двигатели в цехах на примере цеха №4 (холодильная установка (10 кВ — СД)).

«Активная мощность цеха  $P_{pc} = 7200$  кВт, напряжение  $U = 10$  кВ. По активной мощности выберем 4 синхронных двигателя СТДМ-2000-23 УХЛ4, мощностью 2000 кВт, КПД)» [16] 96,9%.

## 5.5 Выбор кабельных линий системы распределения

Допустимая токовая нагрузка:

$$I_{\text{доп.н}} = K_1 \cdot K_2 \cdot I_T, \quad (62)$$

Допустимая токовая нагрузка в послеаварийном режиме:

$$I_{\text{доп.ПАР}} = K_{\text{п}} \cdot I_{\text{доп.н}} \quad (63)$$

Пример расчета линии № 1 ГПП-ТП7:

$$I_{\text{нр}} = \frac{1648}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 47,6 \text{ А,}$$

$$I_{\text{пар}} = 47,6 \cdot 2 = 95,1 \text{ А},$$

$$F_3 = \frac{47,6}{1,2} = 39,6 \text{ мм}^2,$$

$$I_{\text{доп.н}} = 1 \cdot 0,75 \cdot 147 = 110,25 \text{ А} > I_{\text{нр}},$$

$$I_{\text{доп.ПАР}} = 1,1 \cdot 110,25 = 121,28 \text{ А} > I_{\text{пар}}.$$

Окончательно принимаем кабель марки 2хАПвПг-10-3х35. Расчёт для остальных кабельных линий сведём в таблицу 13» [16].

Выводы по разделу 5: в данном разделе мной были проведены электротехнические расчеты по выбору оборудования, свой выбор двигателей в цехах остановила на асинхронных, т.к. именно они зарекомендовали себя лучшими при частых пусках и остановках. Я остановила свой выбор на трансформаторной подстанции 2КТП-400/10/0,4, в которой установлено 2 силовых масляных трансформатора ТМГ-СЭЩ-400/10 У3, т.к. считаю более целесообразным выбирать двутрансформаторные подстанции. Двутрансформаторные подстанции имеют два питания и при возникновении какой-либо аварийной ситуации на одной питающей линии, есть возможность перевести нагрузку на другую питающую линию и скорому возобновлению электроснабжения завода, что ведет к наименьшим потерям прибыли.

Таблица 13 – Выбор марки кабелей

№ ТП	Линия между	Кол-во	Sm, кВ·А	Ip.нр, А	Ip.пар, А	K1	K2	Kп	Ipдоп.нр, А	Ipдоп.пар, А	Марка кабеля
10 кВ											
7	ГПП-ТП7	2	1648	47,6	95,1	1	0,75	1,1	110,25	121,28	2хАПвПг-10-3х35
3.1	ТП7-ТП3.1	2	1238	35,7	71,5	1	1	1,1	147,00	161,70	2хАПвПг-10-3х35
6.1	ГПП-ТП6.1	2	2563	74,0	148,0	1	1	1,1	210,00	231,00	2хАПвПг-10-3х70
6.2	ГПП-ТП6.2	2	2563	74,0	148,0	1	0,75	1,1	157,50	173,25	2хАПвПг-10-3х70
4	ГПП-ТП4	2	2446	70,6	141,2	1	0,9	1,1	153,00	168,30	2хАПвПг-10-3х50
5	ГПП-ТП5	2	2478	71,5	143,1	1	0,9	1,1	153,00	168,30	2хАПвПг-10-3х50
12.1	ГПП-ТП12.1	2	1294	37,4	74,7	1	0,75	1,1	110,25	121,28	2хАПвПг-10-3х35
12.2	ГПП-ТП12.2	2	1963	56,7	113,3	1	0,75	1,1	127,50	140,25	2хАПвПг-10-3х50
17	ТП12.2-ТП17	1	669	38,6	-	1	0,75	1,1	110,25	-	1хАПвПг-10-3х35
13	ГПП-ТП13	2	2640	76,2	152,4	1	0,8	1,1	168,00	184,80	2хАПвПг-10-3х70
11	ТП13-ТП11	2	2384	68,8	137,6	1	0,9	1,1	189,00	207,90	2хАПвПг-10-3х70
15	ТП11-ТП15	1	948	54,7	-	1	1	1,1	170,00	-	1хАПвПг-10-3х50
16	ТП15-ТП16	1	623	35,9	-	1	1	1,1	147,00	-	1хАПвПг-10-3х35
14	ТП16-ТП14	1	334	19,3	-	1	1	1,1	147,00	-	1хАПвПг-10-3х35
9	ГПП-ТП9	2	2295	66,2	132,5	1	1	1,1	170,00	187,00	2хАПвПг-10-3х50
10.1	ТП9.1-ТП10.1	2	788	22,7	45,5	1	1	1,1	147,00	161,70	2хАПвПг-10-3х35
10.2	ТП10.1-ТП10.2	2	394	11,4	22,7	1	1	1,1	147,00	161,70	2хАПвПг-10-3х35

Продолжение таблицы 13

№ ТП	Линия между	Кол-во	Sm, кВ·А	Ip.нр, А	Ip.пар, А	K1	K2	Kп	Ipдоп.нр, А	Ipдоп.пар, А	Марка кабеля
3.2	ТПЗ.1-ТПЗ.2	2	619	17,9	35,7	1	1	1,1	147,00	161,70	2хАПвПг-10-3х35
Высоковольтная нагрузка											
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
0,4 кВ											
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19



## 6 Расчет токов короткого замыкания

Принципиальная схема расчётов токов короткого замыкания представлена на рисунке 11 [14].

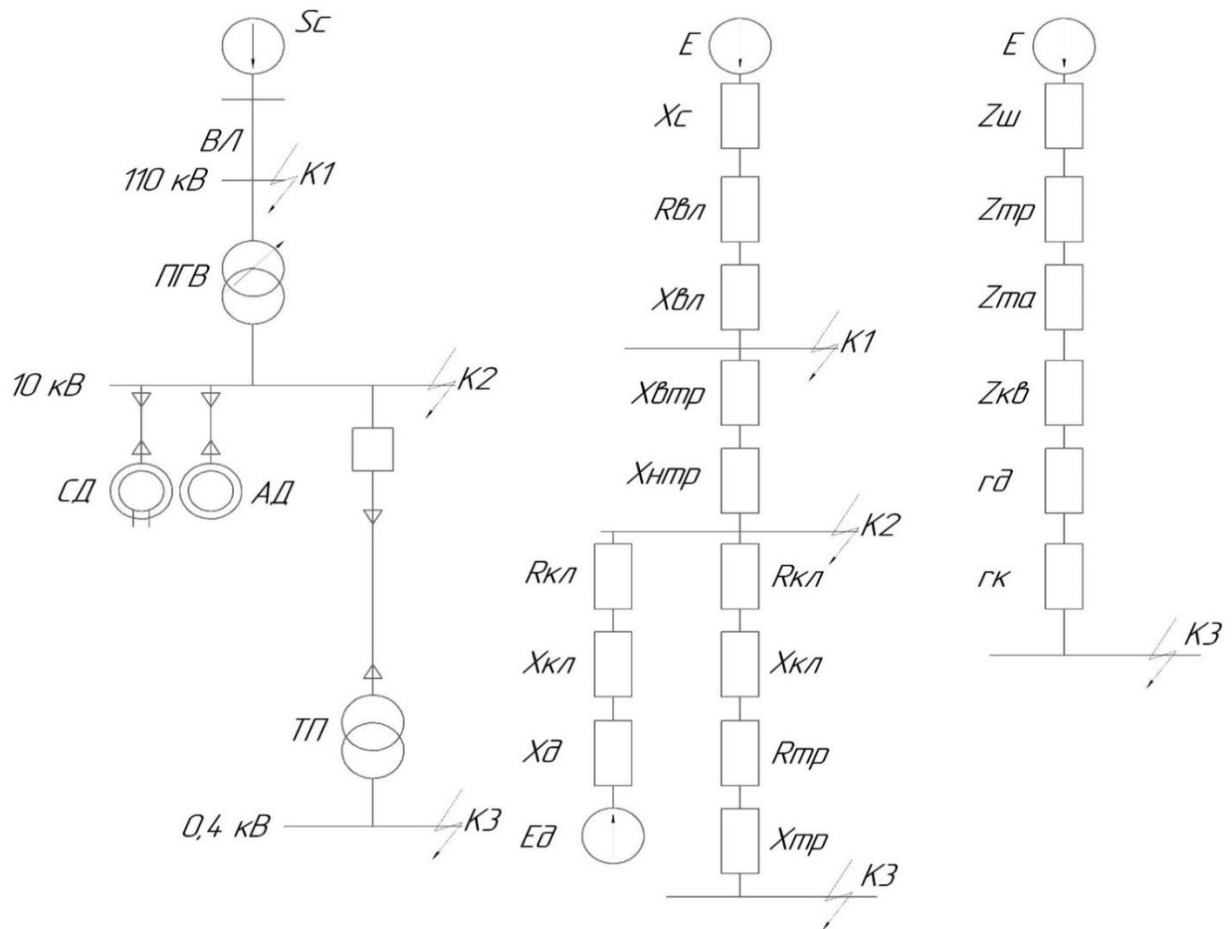


Рисунок 11 – Принципиальная схема расчета токов КЗ

### 6.1 Расчет токов короткого замыкания в точке К1

Базисная мощность:  $S_B = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ; базисное напряжение:  $U_{B1} = 115 \text{ кВ}$ .;  
базисный ток питающей сети:

$$I_{B1} = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_{B1}}, \text{ кА}, \quad (64)$$

$$I_{Б1} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,50 \text{ кА.}$$

Сопротивление системы, приведенное к базисным условиям [26]:

$$x_C = \frac{I_{Б1}}{I_{кз}}, \text{ о. е.}, \quad (65)$$

$$x_C = \frac{0,50}{34} = 0,015 \text{ о. е.}$$

Расчет производим в относительных единицах.

Сопротивление ВЛЭП

$$r_L = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{Б1}^2}, \text{ о. е.}, \quad (66)$$

$$x_L = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{Б1}^2}, \text{ о. е.}, \quad (67)$$

где  $r_L = 0,3$  Ом/км – удельное активное сопротивление линии;

$x_L = 0,43$  Ом/км – удельное реактивное сопротивление линии [1].

$$r_L = 0,3 \cdot 27 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,061 \text{ о. е.},$$

$$x_L = 0,43 \cdot 27 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,088 \text{ о. е.}$$

Результирующее сопротивление схемы замещения до точки К–1

$$z_{\Sigma К1} = \sqrt{r_L^2 + (x_C + x_L)^2}, \text{ о. е.}, \quad (68)$$

$$z_{\Sigma К1} = \sqrt{0,061^2 + (0,015 + 0,088)^2} = 0,119 \text{ о. е.}$$

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ в точке К–1:

$$I_{ПО(К1)} = \frac{E_c''}{z_{\Sigma К1}} \cdot I_{Б1}, \text{ кА.}, \quad (69)$$

$$I_{\text{ПО}(K1)} = \frac{1}{0,119} \cdot 0,50 = 4,20 \text{ кА.}$$

Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ:

$$T_a = \frac{x_{\Sigma}}{\omega \cdot r_{\Sigma}}, \text{ с.}, \quad (70)$$

$$T_a = \frac{0,103}{314 \cdot 0,061} = 0,0053 \text{ с.}$$

Ударный коэффициент для времени  $t=0,01$  с.:

$$K_{\text{уд}} = 1 + e^{-0,01/T_a}, \quad (71)$$

$$K_{\text{уд}} = 1 + e^{-0,01/0,0053} = 1,15$$

Ударный ток КЗ в точке К-1 [14]

$$i_{\text{уд,К-1}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{ПОК-1}}'', \text{ кА.}, \quad (72)$$

$$i_{\text{уд,К-1}} = \sqrt{2} \cdot 1,15 \cdot 4,20 = 6,86 \text{ кА}$$

## 6.2 Расчет токов короткого замыкания в точке К-2

Расчет аналогичен предыдущему, результат:

- базисное напряжение  $U_{\text{Б2}}=10,5$  кВ;
- базисный ток питающей сети  $I_{\text{Б2}} = 5,50$  кА.;
- сопротивление трансформатора:  $x_{\text{ТР}} = 0,42$  о. е.;
- результирующее сопротивление  $z_{\Sigma\text{К2}} = 0,53$  о. е.;
- начальное значение периодической составляющей тока КЗ в точке К2:  $I_{\text{ПО}(K2)} = 10,451$  кА.
- сопротивление кабельной линии:  $r_{\text{каб}} = 0,035$  о. е,  $x_{\text{каб}} = 0,009$  о. е.

- сопротивление двигателя  $x_D = 10,0$  о. е.;
- ток одного двигателя:  $I_{дв4} = 0,604$  кА.

### 6.3 Расчет токов короткого замыкания в точке К-3

Расчет аналогичен предыдущему, результат (см. таблицу 14):

- систему принимаем бесконечной мощности, сопротивление системы равно нулю ( $S_C = \infty$ ,  $x_C = 0$ );
- сопротивление трансформатора ТМГ-2500  $r_{Тр} = 0,64$  мОм;  $x_{Тр} = 3,46$  мОм;
- сопротивление шинпровода:  $r_{ш} = 0,015$  мОм;  $x_{ш} = 0,007$  мОм;
- сопротивление трансформатора тока:  $r_{та} = 0,05$  мОм;  $x_{та} = 0,07$  мОм;
- сопротивление автоматического выключателя:  $r_{кв} = 0,1$  мОм;  $x_{кв} = 0,05$  мОм;
- результирующее сопротивление схемы замещения:  $r_{\Sigma} = 1,82$  мОм;  $x_{\Sigma} = 3,59$  мОм;  $z_{КЗ} = 4,02$  мОм;
- ток трехфазного КЗ в точке К3  $I_{по(КЗ)} = 57,447$  кА;
- ударный ток КЗ:  $i_{уд} = 89,37$  кА.

Таблица 14 – Величины токов КЗ

Точка КЗ	Ипо, кА	iуд, кА
К1	4,20	6,86
К2	12,790	35,69
К3	57,447	89,37

Выводы по разделу 6: в разделе 6 мы рассмотрели принципиальную схему расчётов токов КЗ (см. рисунок 11), а также произвели расчет токов короткого замыкания в точке К-1, К-2, К-3 (см. таблица 14).

## 7 Выбор и проверка основного оборудования

### 7.1 Выбор и проверка коммутационных аппаратов выше 1 кВ

#### 7.1.1 Высоковольтные выключатели

Предварительно выбираем выключатель элегазовый колонковый марки ВГТ-110-40/2000 У1 [14], предназначенный для коммутации высоковольтных электрических цепей (см. таблица 15).

Таблица 15 – Проверка выключателей ВГТ-110-40/2000 У1

Расчетные параметры системы	Каталожные данные выключателя	Условия выбора
$U_{уст} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
$I_{рас} = 190,94 \text{ А}$	$I_{ном} = 2000 \text{ А}$	$I_{расч} \leq I_{ном}$
$I_{ПО} = 4,20 \text{ кА}$	$I_{откл} = 40 \text{ кА}$	$I_{ПО} \leq I_{откл}$
$i_{уд} = 6,86 \text{ кА}$	$i_{дин max} = 102 \text{ кА}$	$i_y \leq i_{дин max}$
$B_k = 25,525 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 4800 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_k \leq I_{тер}^2 \cdot t_{тер}$

#### 7.1.2 Разъединители

Предварительно выбираем разъединитель марки РГ-110/1000УХЛ1 (см. таблица 16) [14].

Таблица 16 – Проверка высоковольтных разъединителей РГ-110/1000УХЛ1

Расчетные параметры системы	Каталожные данные разъединителей	Условия выбора
$U_{уст} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
$I_{рас} = 190,94 \text{ А}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А}$	$I_{расч} \leq I_{ном}$
$i_{уд} = 6,86 \text{ кА}$	$i_{дин max} = 40 \text{ кА}$	$i_y \leq i_{дин max}$
$B_k = 25,525 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 2976,75 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_k \leq I_{тер}^2 \cdot t_{тер}$

### 7.1.3 Выключатели на стороне 10 кВ

«В качестве комплектного распределительно устройства (КРУ) примем КСВ-10 с выключателями ВВУ-СЭЦ-Э-10-31,5/2500» [17]. Технические параметры ячейки приведены в таблице 17, 18.

Максимальный рабочий ток:

$$I_{P.MAX} = \frac{S'}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_C}, \text{ А}, \quad (73)$$

$$I_{P.MAX} = \frac{37367,9}{1 \cdot \sqrt{3} \cdot 10,5} = 2054,70 \text{ А}.$$

«Устанавливаем вакуумный выключатель внутренней установки марки ВВУ-СЭЦ-Э-10-31,5/2500 [17] (см. таблица 19). Тогда тепловой импульс:

$$B_K = I_{ПО(K-2)}^2 \cdot (\tau + T_a), \text{ кА}^2\text{с}, \quad (74)$$

$$B_K = 12,79^2 \cdot (0,87 + 0,370) = 150,492 \text{ кА}^2\text{с}$$

Таблица 17– Технические параметры КРУ 10 кВ

Серия	U <sub>НОМ</sub> , кВ	U <sub>МАХ</sub> , кВ	I <sub>НОМ</sub> , А	Ток, кА	
				термической стойкости	динамической стойкости
КСВ-10	6; 10	7,2; 12	630; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 4000	20; 25; 31,5; 40; 50	51; 64; 81; 102; 128

Таблица 18– Проверка ВВУ-СЭЦ-Э-10-31,5/2500

Расчетные параметры системы	Каталожные данные выключателя	Условия выбора
U <sub>уст</sub> = 10 кВ	U <sub>НОМ</sub> = 10 кВ	U <sub>уст</sub> ≤ U <sub>НОМ</sub>
I <sub>рас</sub> = 2054,70 А	I <sub>НОМ</sub> = 2500 А	I <sub>рас</sub> ≤ I <sub>НОМ</sub>
I <sub>ПО</sub> = 12,79 кА	I <sub>откл</sub> = 31,5 кА	I <sub>ПО</sub> ≤ I <sub>откл</sub>
i <sub>уд</sub> = 35,69 кА	i <sub>дин max</sub> = 80 кА	i <sub>у</sub> ≤ i <sub>дин max</sub>
B <sub>к</sub> = 150,492 кА <sup>2</sup> · с	I <sub>тер</sub> <sup>2</sup> · t <sub>тер</sub> = 2976,75 кА <sup>2</sup> · с	B <sub>к</sub> ≤ I <sub>тер</sub> <sup>2</sup> · t <sub>тер</sub>

Таблица 19 – Выбор выключателя ВВУ-СЭЦ-ПЗ-10-20/1000

Расчетные параметры системы	Каталожные данные выключателя	Условия выбора
$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
$I_{рас} = 195,07 \text{ А}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А}$	$I_{рас} \leq I_{ном}$
$I_{ПО} = 12,79 \text{ кА}$	$I_{откл} = 20 \text{ кА}$	$I_{ПО} \leq I_{откл}$
$i_{уд} = 35,69 \text{ кА}$	$i_{дин max} = 52 \text{ кА}$	$i_y \leq i_{дин max}$
$B_k = 65,431 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_k \leq I_{тер}^2 \cdot t_{тер}$

#### 7.1.4 Выключатели нагрузки

Предварительно выбираем автогазовый выключатель нагрузки с пружинным приводом с ручным заводом – местным управлением марки ВНПР-10/400-20 У2 [18]. На примере цеха №8:

$$I_{р.мах} = \frac{S_{нагр}}{\sqrt{3}U_c}, \text{ А}, \quad (75)$$

$$I_{р.мах} = \frac{3212,4}{\sqrt{3} \cdot 10} = 185,47 \text{ А}.$$

Произведем проверку данных выключателей нагрузки (см. таблица 20).

Таблица 20 – Проверка выключателей нагрузки ВНПР-10/400-20 У2

Расчетные параметры системы	Каталожные данные выключателя	Условия выбора
$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
$I_{рас} = 185,47 \text{ А}$	$I_{ном} = 400 \text{ А}$	$I_{рас} \leq I_{ном}$
$i_{уд} = 35,69 \text{ кА}$	$i_{дин max} = 51 \text{ кА}$	$i_y \leq i_{дин max}$
$B_k = 148,835 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 400 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_k \leq I_{тер}^2 \cdot t_{тер}$

## 7.1.5 Предохранители

Предварительно выбираем предохранитель ПКТ-104-10-200-20 У2» [19] (см. таблица 21).

Таблица 21 – Проверка предохранителей ПКТ-104-10-200-20 У2

Расчетные параметры системы	Каталожные данные предохранителя	Условия выбора
$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
$I_{рас} = 185,47 \text{ А}$	$I_{ном} = 200 \text{ А}$	$I_{расч} \leq I_{ном}$
$I_{ПО} = 12,79 \text{ кА}$	$I_{откл} = 20 \text{ кА}$	$I_{ПО} \leq I_{откл}$

## 7.2 Выбор и проверка коммутационных аппаратов 0,4 кВ

### 7.2.1 Автоматический выключатель

Выбираем автоматический выключатель на стороне 0,4 кВ одной трансформаторной подстанции ТП самого мощного цеха (цех №8) и рассчитаем его проверку в таблице 22. Максимальный рабочий ток:

$$I_{р.мах} = \frac{S_{р.в.ц.}}{\sqrt{3}U_c}, \text{ А}, \quad (76)$$

$$I_{р.мах} = \frac{3212}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 4636,7 \text{ А}.$$

Выбираем выключатель марки ВА50-45Про Протон 63 [20].

Таблица 22 – Проверка выключателей 0,4 кВ ВА50-45Про Протон 63

Расчетные параметры системы	Каталожные данные выключателя	Условия выбора
$U_{уст} = 0,4 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 0,4 \text{ кВ}$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
$I_{рас} = 4636,7 \text{ А}$	$I_{ном} = 6300 \text{ А}$	$I_{расч} \leq I_{ном}$
$I_{ПО} = 57,45 \text{ кА}$	$I_{откл} = 100 \text{ кА}$	$I_{ПО} \leq I_{откл}$



«Уставка тока (задаётся в микропроцессорном расцепителе):  $(1 - 1,2) \cdot I_{\text{раб.мах}}$ . Следовательно, уставка тока срабатывания защиты от перегрузки должна быть выше» [20]

$$I_{\text{сп}} = 1,2 \cdot I_{\text{раб.мах}}, \text{ A}, \quad (77)$$

$$I_{\text{сп}} = 1,2 \cdot 4636,7 = 5564,0 \text{ A}.$$

### 7.2.2 Выбор и проверка трансформаторов тока (ТТ)

«Выбор трансформаторов тока производим по напряжению и току в первичной обмотке. Предварительно выбираем ТТ марки ТШЛ-СЭЦ-10. Перечень измерительных приборов занесем в таблицу 23.

Схема подключения измерительных приборов к ТТ изображена на рисунке 12» [21].

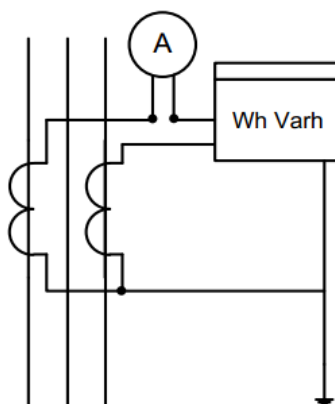


Рисунок 12 – Схема подключения измерительных приборов к ТТ

Таблица 23 – Перечень измерительных приборов

Прибор	Тип	Количество	$S_{\text{ПРА}}, \text{ В} \cdot \text{А}$	$S_{\text{ПРС}}, \text{ В} \cdot \text{А}$
Амперметр	СА3020	1	2	–
Многофункциональный счетчик активной и реактивной энергии	МИР С-03	1	4	4

«Суммарное сопротивление приборов рассчитывается по суммарной мощности:

$$r_{\text{приб}} = \frac{S_2}{I_{2\text{ном}}^2}, \text{ Ом}, \quad (78)$$

$$r_{\text{приб}} = \frac{10}{5^2} = 0,4 \text{ Ом}$$

Расчетная длина провода при включении трансформатора тока в неполную звезду:

$$l_p = \sqrt{3} \cdot l, \text{ м}, \quad (79)$$

где  $l$  – расстояние от трансформатора до приборов. При установке приборов в шкафах КРУ принимаем длину  $l = 5\text{ м}$  [20].

$$l_p = \sqrt{3} \cdot 5 = 8,66 \text{ м}.$$

Определим требуемое сечение провода [30]:

$$F_{\text{треб}} = \frac{\rho_{\text{Al}} l_p}{r_{\text{пров.треб}}}, \text{ мм}^2, \quad (80)$$

ГДЕ  $r_{\text{пров.треб}} = Z_{\text{ном}} - r_{\text{приб}} - r_{\text{к}} = 1,2 - 0,4 - 0,1 = 0,7 \text{ Ом}$ ,

$$F_{\text{треб}} = \frac{0,028 \cdot 5}{0,7} = 0,2 \text{ мм}^2.$$

Принимаем к установке алюминиевый кабель с жилами сечения  $4 \text{ мм}^2$ .

$$r_{\text{пров}} = \frac{\rho_{\text{Al}} l_p}{F}, \text{ Ом}, \quad (81)$$

$$r_{\text{пров}} = \frac{0,028 \cdot \sqrt{3} \cdot 5}{4} = 0,061 \text{ Ом}.$$

Сопротивление контактов  $r_k$  принимаем равным 0,1 Ом, так как количество приборов равно двум, тогда сопротивление приборов:

$$z_2 = r_2 = r_{\text{приб}} + r_{\text{пров}} + r_k, \text{ Ом}, \quad (82)$$

$$z_2 = r_2 = 0,4 + 0,061 + 0,1 = 0,561 \text{ Ом}.$$

Результаты проверки представлены в таблице 24.

Таблица 24 – Проверка трансформатора тока ТШЛ-СЭЦ-10

Расчетные параметры системы	Каталожные данные ТТ	Условия выбора
$U_{\text{уст}} = 10,0 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 10,0 \text{ кВ}$	$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$
$I_{\text{рас}} = 2054,7 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 2500 \text{ А}$	$I_{\text{рас}} \leq I_{\text{ном}}$
$B_k = 594,03 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 4800 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_k \leq I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}}$
$Z_2 = 0,561 \text{ Ом}$	$Z_{2\text{ном}} = 4 \text{ Ом}$	$Z_2 \leq Z_{2\text{ном}}$

Вывод: трансформатор тока по условиям проверки проходит [20].

### 7.2.3 Выбор и проверка трансформаторов напряжения (ТН)

В соответствии со спецификацией шкафов КРУ КСВ-10 намечаем к установке трансформатор напряжения марки: НАЛИ-СЭЦ-10 (см. рисунок 13, таблицу 25 и 26).

Таблица 25 – Перечень измерительных приборов

Прибор	Тип	Количество	$S_{\text{пр}}, \text{ В} \cdot \text{А}$	$S_{\text{пр}\Sigma}, \text{ В} \cdot \text{А}$
Многофункциональный счетчик активной и реактивной энергии	МИР С-03	8	2	16
Вольтметр	СВ3020	1	4	4

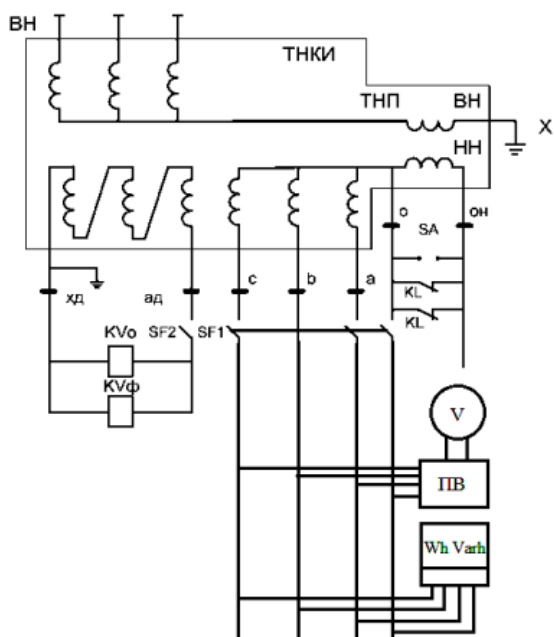


Рисунок 13 – Схема подключения измерительных приборов к ТН

Таблица 26 – Проверка НАЛИ-СЭЩ-10

Расчетные параметры системы	Каталожные данные ТН	Условия выбора
$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
$S_{2расч} = 20 \text{ В} \cdot \text{А}$	$S_{2ном} = 25 \text{ В} \cdot \text{А}$	$S_{2расч} \leq S_{2ном}$

Вывод: трансформатор напряжения по условиям проверки проходит.

### 7.3 Проверка кабельных линий на термическую стойкость

Результаты проверки кабельных линий приведены в таблице 27.

Таблица 27 – Проверка кабелей на термическую стойкость

№ ТП	Линия между	Марка кабеля	F, мм <sup>2</sup>	Iт, А
7	ТПП-ТП7	АПвПг-10-3x120	120	288
3.1	ТП7-ТП3.1	АПвПг-10-3x120	120	288

Продолжение таблицы 27

№ ТП	Линия между	Марка кабеля	F, мм <sup>2</sup>	Iт, А
6.1	ГПП-ТП6.1	АпвПг-10-3х120	120	288
6.2	ГПП-ТП6.2	АпвПг-10-3х120	120	288
4	ГПП-ТП4	АпвПг-10-3х120	120	288
5	ГПП-ТП5	АпвПг-10-3х120	120	288
12.1	ГПП-ТП12.1	АпвПг-10-3х120	120	288
12.2	ГПП-ТП12.2	АпвПг-10-3х120	120	288
17	ТП12.2-ТП17	АпвПг-10-3х120	120	288
13	ГПП-ТП13	АпвПг-10-3х120	120	288
11	ТП13-ТП11	АпвПг-10-3х120	120	288
15	ТП11-ТП15	АпвПг-10-3х120	120	288
16	ТП15-ТП16	АпвПг-10-3х120	120	288
14	ТП16-ТП14	АпвПг-10-3х120	120	288
9	ГПП-ТП9	АпвПг-10-3х120	120	288
8	ГПП-ТП8	АпвПг-10-3х120	120	288
10.1	ТП9.1-ТП10.1	АпвПг-10-3х120	120	288
10.2	ТП10.1-ТП10.2	АпвПг-10-3х120	120	288
3.2	ТП3.1-ТП3.2	АпвПг-10-3х120	120	288
ВН				
1	ПГВ-Н1	АпвПг-10-3х120	120	288
2	ПГВ-Н2	АпвПг-10-3х120	120	288
3	ПГВ-Н3	АпвПг-10-3х120	120	288

Вывод по разделу 7: в данном разделе я сделала выбор и проверку основного оборудования подстанции. Свой выбор я остановила именно на этом оборудовании, потому что согласно данным простора интернета именно эти марки зарекомендовали себя с лучшей стороны. Мной были проанализированы квалификационные данные и других марок, но эти более надежные модели и менее аварийные, так же именно эти модели оборудования, наиболее подходящие для завода с такой нагрузкой. Также в 7 разделе я произвела корректировку марок кабеля кабельных линий 10 кВ.

## 8 Расчет заземляющего устройства подстанции

Защитой электрических установок от высоковольтных грозových перенапряжений служит молниезащитное заземление. К этому заземлению относят обеспечение заземления крыш ЗРУ, опор линий, разрядников, молниеотводов.

Разберем пример расчета и устройство защитного заземления. Применяется два инженерных приема» [23]:

- коэффициентов использования;
- наведенных потенциалов.

Для расчёта примем стандартную подстанцию ОРУ 110/10 кВ с использованием ремонтной переемычки и размерами 30×50 м как на рисунке 14. Периметр подстанции составляет 124 м. Исходные данные представлены в таблице 28.

Таблица 28 – Исходные данные для расчета

Показатель	Величина
Климатическая зона	3
Ток замыкания низкой стороны, А	12
Грунт	Чернозем
Удельное сопротивление грунта, Ом·м	48
Характеристики структуры трос-опора	
Длина пролета, м	190
Сопротивление опоры, Ом	11
Сечение троса, мм <sup>2</sup>	50
Высота оборудования:	
- ЗРУ, м	6
- трансформатора, м	6
- портала, м	10

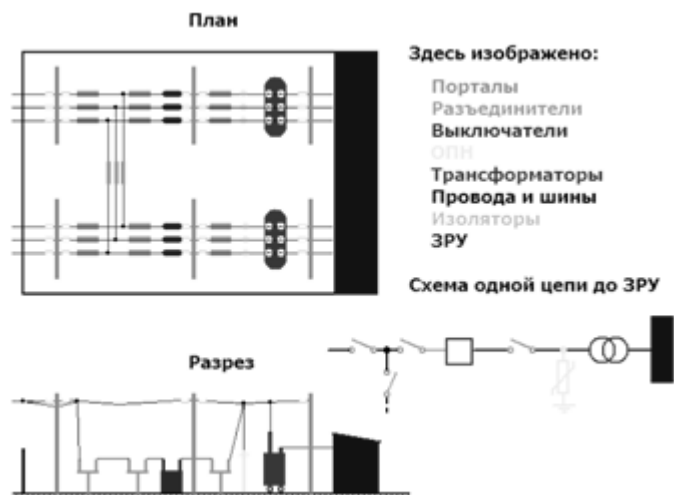


Рисунок 14 – Изображение подстанции с ремонтной перемычкой

На подстанциях у заземляющих устройств сопротивление растеканию  $R_3$  должно составлять:

- для высокой стороны  $R_3 = 0,5 \text{ Ом}$ ;
- для низкой стороны  $R_3$  определяется по формуле 8.1, но при этом оно должно быть меньше  $10 \text{ Ом}$ ;  $R_3 \leq \frac{250}{I_3}$ , где  $I_3$  – рассчитываемый ток замыкания на землю, А.

Расчетный ток  $I_3$  – ток в сетях с изолированной нейтралью, который принимается равным полному току замыкания на землю при всех включенных присоединениях сети. Данный ток рассчитывается по формуле:

$$I_3 = \frac{U(35l_K + l_B)}{350}, \quad (83)$$

где  $U$  – линейное напряжение сети, кВ;

$l_K$  и  $l_B$  – суммарная длина всех кабельных и воздушных линий, км;

Примем для нашего случая  $I_3 = 12 \text{ А}$ . Вычислим  $R_3$  для низкой стороны:  $R_3 \leq 250/12 = 20,833 \text{ Ом}$ . Полученное значение получилось больше  $10 \text{ Ом}$ , соответственно на низкой стороне принимаем  $R_3 = 10 \text{ Ом}$ . Сравнив значения

$R_3$  на верхней и нижней стороне, принимаем наименьшее сопротивление 0,5 Ом.

### 8.1 Сопротивление искусственного заземлителя

Заземлители подразделяют на искусственные и естественные. Естественным заземлителем выступает система трос-опора.

Естественные заземлители позволяют измерить их сопротивление, которое необходимо умножить на коэффициент сезонности  $K_C$ . Если данные измерений отсутствуют, то для определения сопротивления можно воспользоваться формулой 95 для искусственных заземлителей той же формы [24].

$$R_E = \sqrt{\frac{r_{оп}r}{n}}, \quad (84)$$

где  $r_{оп}$  – расчетное сопротивление заземления одной опоры, Ом;  
 $r$  – активное сопротивление троса в одном пролете ЛЭП, Ом;  
 $n$  – число тросов на опоре.

Активное сопротивление стального троса находится по формуле:

$$r = 0,15 \cdot \frac{l}{S}, \quad (85)$$

где  $S$  – сечение троса, мм<sup>2</sup>;  
 $l$  – длина пролета, м.

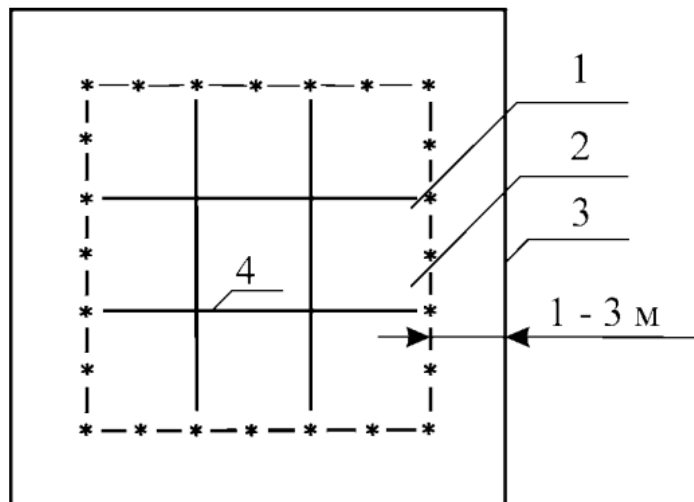
По варианту имеем: одна опора имеет сопротивление  $r_{оп} = 11$  Ом, длина пролета  $l = 190$  м, сечение троса  $S = 50$  мм<sup>2</sup>, линия двучепная и защищена одним тросом (см. рисунок 15). Рассчитаем активное сопротивление стального троса по формуле (96):



$$r = 0,15 \cdot \frac{190}{50} = 0,57 \text{ Ом.}$$

Рассчитаем сопротивление системы трос-опора:

$$R_E = \sqrt{\frac{11 \cdot 0,57}{1}} = 2,504 \text{ Ом.}$$



1 – вертикальные электроды; 2 – горизонтальный электрод; 3 – ограда; 4 – выравнивающая сетка

Рисунок 15 – Контурный заземлитель подстанции

Рассчитанного сопротивления недостаточно и необходимо использовать искусственное, которое рассчитаем по формуле:

$$R_{и} = \frac{R_E \cdot R_3}{R_E - R_3}, \quad (86)$$

$$R_{и} = \frac{2,504 \cdot 0,5}{2,504 - 0,5} = 0,625 \text{ Ом}$$

## 8.2 Форма и размеры электродов

«Вертикальные электроды не следует устанавливать слишком часто, так как они экранируют друг друга, вызывая увеличение общего сопротивления» [1].

Горизонтальные и вертикальные электроды сваривают между собой, при этом их окраска недопустима. В качестве вертикальных электродов применяют прутья из черной стали диаметром 18 мм и длиной 5 м, а для горизонтальных электродов используют полосу металла с размерами 5×40 мм.

## 8.3 Выбор количества вертикальных электродов

Предварительно примем количество электродов 50, расстояние между ними  $a = 2,48$  м, а отношение  $a/l = 0,5$ , расчетное значение  $K_{ИВ} = 0,317$ . С учетом коэффициента сезонности ( $K_C = 1,2$ , грунт – чернозем) расчетное удельное сопротивление грунта  $R_{ИЗМ} = 48$  Ом·м,  $R_{РАСЧ.В.} = 57,6$  Ом·м. Коэффициент сезонности  $K_C = 2,0$  для горизонтальных электродов.  $R_{РАСЧ.Г.} = 96$  Ом·м.

## 8.4 Сопротивление растеканию тока одного электрода

Сопротивление растеканию тока для вертикального электрода найдем по формуле:

$$R_B = \frac{R_{РАСЧ.В.}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left( \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (87)$$
$$R_B = \frac{57,6}{2 \cdot \pi \cdot 5} \left( \ln \frac{2 \cdot 5}{0,018} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 3,2 + 5}{4 \cdot 3,2 - 5} \right) = 12,34 \text{ Ом.}$$

Для нахождения примерного числа вертикальных электродов  $n_B$  с учетом использования вертикальных электродов  $k_{ИВ}$  применим формулу:

$$n_B = \frac{R_B}{k_{ИВ} \cdot R_{И}}, \quad (88)$$

где  $R_{И}$  – сопротивление искусственного заземлителя.

$$n_B = \frac{12,34}{0,317 \cdot 0,625} = 62,284 \approx 63.$$

Сопротивление растеканию тока для горизонтального электрода находится по формуле:

$$R_{Г} = \frac{R_{РАСЧ.Г.}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left( \ln \frac{l^2}{dt} \right), \quad (89)$$

где  $t$  – глубина заложения электрода, м;

$l$  – длина горизонтального электрода, м;

$d$  – диаметр электрода, м.

Для нашей полосы примем параметры: эквивалентный диаметр  $d_{Э} \approx 0,5b$ ,  $d = 0,04$  м,  $t = 0,7$  м и рассчитаем сопротивление растеканию тока для горизонтального электрода по формуле (99):

$$R_{Г} = \frac{96}{2 \cdot \pi \cdot 124} \left( \ln \frac{124^2}{0,04 \cdot 0,7} \right) = 1,628 \text{ Ом.}$$

## 8.5 Уточнение коэффициентов использования

По количеству вертикальных электродов определяем среднее значение  $a = p/n_B = 124/63 = 1,968$  и по отношению  $a/l = 1,968/5 = 0,394$ , определяем итоговые коэффициенты использования для вертикальных и горизонтальных электродов ( $k_{ИВ} = 0,32$  и  $k_{ИГ} = 0,18$ ). Уточним число вертикальных электродов:

$$n_{\text{ВУ}} = \frac{R_{\text{В}} R_{\Gamma} - R_{\text{И}} k_{\text{ИГ}} R_{\text{В}}}{R_{\text{И}} R_{\Gamma} k_{\text{ИВ}}}, \quad (90)$$

$$n_{\text{ВУ}} = \frac{12,34 \cdot 1,628 - 0,625 \cdot 0,18 \cdot 12,34}{0,625 \cdot 1,628 \cdot 0,32} = 57,436 \approx 58.$$

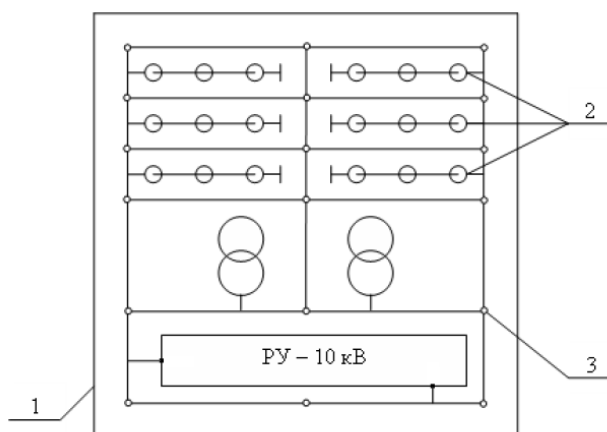
При 10% отклонении уточненного числа вертикальных электродов  $n_{\text{ВУ}}$  от примерного числа  $n_{\text{В}}$  требуется уточнение коэффициентов использования  $k_{\text{ИВ}}$  и  $k_{\text{ИГ}}$  и повторный расчет  $n_{\text{ВУ}}$ . На рассматриваемой подстанции вышло 58 электродов. Окончательное сопротивление растекания группового заземлителя найдем по формуле:

$$R_0 = \frac{R_{\text{В}} R_{\Gamma}}{R_{\text{В}} \cdot k_{\text{ИГ}} + R_{\Gamma} n_{\text{ВУ}} k_{\text{ИВ}}}, \quad (91)$$

$$R_0 = \frac{12,34 \cdot 1,628}{12,34 \cdot 0,18 + 1,628 \cdot 58 \cdot 0,32} = 0,619.$$

Запас по сопротивлению вышел 0,006 Ом.

Итоговый заземлитель представлен на рисунке 16 [1].



1 - забор; 2 - оборудование; 3 - заземляющее устройство

Рисунок 16 – Контурный заземлитель открытой подстанции

Вывод по разделу 8: правильно рассчитав и выполнив на деле устройство заземления электрооборудования- это гарантия безопасности в электроснабжении энергоприемников, в данном случае дорогостоящего оборудования завода в целом и залог безопасности обслуживающего персонала. Заземление электроустановок является обязательным условием, служащее защите людей от поражения электрическим током. Так как использовать естественное заземление в электроустановках запрещено правилами, то в данном разделе я произвела расчет заземляющего устройства подстанции, а именно сколько и каких должно быть количество горизонтальных и вертикальных электродов заземления, их диаметр и длина, также определила коэффициенты использования для вертикальных и горизонтальных электродов.

## Заключение

Целью проделанной работы являлось произвести проектирование системы электроснабжения лакокрасочного завода. «В ходе выполнения работы мы рассмотрели технологический процесс предприятия, генеральный план расположения цехов лакокрасочного завода, их характеристики, вид и степень защиты оборудования цехов определили расчётные электрические нагрузки на разных уровнях ППЭ, нашли расчетные нагрузки на стороне высшего напряжения цеховой ТП, на шинах низшего напряжения ППЭ, произвели расчет мощности компенсирующих устройств узла нагрузки построили картограмму и определили центр электрических нагрузок, выбрали систему питания предприятия, произвели расчёт мощности компенсирующих устройств узла нагрузки и системы распределения, рассчитали токи КЗ в различных точках, выбрали и проверили основную коммутационную аппаратуру предприятия, произвели расчет заземляющего устройства подстанции» [22]

Питание энергосистемы лакокрасочного завода осуществляется от подстанции по двум воздушным ЛЭП – 110 кВ, выполненным проводом марки АС-95/16 на двухцепных металлических опорах.

«Подстанция глубокого ввода (ПГВ) расположена с небольшим смещением от найденного расчётным путём центра электрических нагрузок.

На ПГВ установлены два трансформатора типа ТДН – 25000/110.

РУ – 10 кВ ПГВ выполнено ячейками КРУ КСВ-10 с выкатными элементами.

Большинство цеховых подстанций выполнено двухтрансформаторными.

Полагаю, что разработанная система электроснабжения лакокрасочного завода удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым нормативной документацией» [16]

## Список используемых источников

1. Беляев А. В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. СПб. : ПЭИПК, 2018. 230 с.
2. Булычев А. В., Наволочный А. А. Релейная защита распределительных сетей в примерах и задачах с решениями: учеб. пособие. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. 202 с.
3. ГОСТ 14209–85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки : межгос. стандарт : утв. и введ. в действие Постановлением Госкомитета СССР по стандартам от 31.01.85 г. N 236 : дата введ. 1985–07–01. Москва : Стандартиформ, 2019. 30 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012414> (дата обращения: 21.08.2022).
4. ГОСТ Р 2.105-2019. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие требования к текстовым документам : дата введ. 2020–02–01. Москва : Стандартиформ, 2019. 35 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200164120> (дата обращения: 21.08.2022)
5. Грунин В. К. Основы электроснабжения объектов. Расчет электрических нагрузок : конспект лекций. Омск : изд-во ОмГТУ, 2019. 72 с.
6. Грунин В. К., Горюнов В. Н. Выпускная квалификационная работа бакалавра по проектированию систем электроснабжения промышленных объектов: учебное пособие. Омск : изд-во ОмГТУ, 2016. 156 с. URL: <https://studfile.net/preview/6761249/> (дата обращения: 22.08.2022)
7. Грунин В. К., Горюнов В. Н. Технологические процессы производств промышленных предприятий : учеб. пособие для вузов по специальности 140211 "Электроснабжение" направления подгот. 140200 «Электроэнергетика». Омск : изд-во ОмГТУ, 2020. 158 с.
8. Грунин, В. К. Основы электроснабжения объектов. Проектирование систем электроснабжения : конспект лекций / Ом. гос. техн. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019. 68 с.

9. Комплектные распределительные устройства [Электронный ресурс] : официальный сайт компании «Cheaz». URL: <https://www.cheaz.ru/products/csw/kru-cheaz-70-10.html> (дата обращения: 28.08.2022).

10. Конденсаторы для компенсации реактивной мощности [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «ZPUE» URL: <https://zpue.com/ru/konteynernaya-transformatornaya-podstantsiya-podstantsiya-dlya-kompensatsii-reaktivnoy-moshchnosti/primernoeye-resheniye> (дата обращения: 02.02.2022)

11. Красник В.В. Эксплуатация электрических подстанций и распределительных устройств [Электронный ресурс] : произв.-практ. пособие / В. В. Красник. - Москва : ЭНАС, 2018. 319 с.

12. Молодежь. Наука. Общество [Электронный ресурс] : Всерос. науч.-практ. междисциплинар. конференция : Тольятти, 5 дек. 2018 г. : сб. студенческих работ / [отв. за вып. С. Х. Петерайтис]. - ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2018. 893 с.

13. Неклепаев Б. Н. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования : РД 153-34.0-20.527 98/ Введ. 1998–03–23. М. : ЭНАС, 2019. 152 с.

14. Немировский А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Е. Немировский, И. Ю. Сергиевская, Л. Ю. Крепышева. - 2-е изд. - Москва : Инфра-Инженерия, 2018. 148 с.

15. Оборудование трансформаторных подстанций [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Школа для электрика» URL: <http://electricalschool.info/elstipod/1663-oborudovanie-transformatornykh.html> (дата обращения: 02.03.2022)

16. ООО «Электротяжмаш-Привод», двигатели [Электронный ресурс] : официальный сайт завода «Электротяжмаш». URL: <http://privod-lsva.ru/index.php?id=54> (дата обращения: 01.09.2022).



17. Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии : приказ М-ва энергетики РФ от 23.06.2015 № 380 : введ. 2015–07–22. М. : ЭНАС, 2019. 12 с.

18. Потери энергии в электрических сетях и установках [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Г. В. Маслакова [и др.]. - Липецк : Липец. гос. техн. ун-т : ЭБС АСВ, 2018. 79 с.

19. Правила устройства электроустановок : официальные тексты по состоянию на 01.03.2007 г. – 7-е изд. Москва : ЭНАС, 2019. 549 с.

20. Предохранители ПКТ [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Korenevo». URL: <https://nva-korenevo.ru/download/catalog/catalog-pkt.pdf> (дата обращения: 28.08.2022).

21. Расчет электрических нагрузок методом упорядоченных диаграмм [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Energy-systems». URL: <https://energy-systems.ru/main-articles/proektirovanie-elektriki/1836-raschet-jelektricheskikh-nagruzok-metodom-uporjadochennyh-diagramm> (дата обращения 10.09.2022)

22. Руководящие указания по расчету зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Меганорм». URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294817/4294817803.htm> (дата обращения: 20.08.2022).

23. Трансформатор напряжения типа НАЛИ-СЭЩ-10 [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Electroshield». URL: <https://www.electroshield.ru/catalog/transformatory-izmeritelnie/nali-seshch-6-10-35-iv/> (дата обращения: 10.08.2022).

24. Трансформаторы тока ТШЛ-СЭЩ-10 [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Electroshield». URL: <https://www.electroshield.ru/catalog/transformatory-izmeritelnie/tshl-seshch-10-20/> (дата обращения: 21.08.2022).

25. Файбисович Д. Л. Справочник по проектированию электрических сетей/ 4-е изд., перераб. и доп. М. : ЭНАС, 2018. 376 с.

26. Шкаруба М. В. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. Омск: изд-во ОмГТУ, 2020. 125 с.

27. Элегазовые высоковольтные выключатели [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Zeto». URL: [https://zeto.ru/products\\_and\\_services/high\\_voltage\\_equipment/vyklyuchateli-elegazovye-kolonkovye/elegazovye-kolonkovye-vyklyuchateli-tipa-vgt-110/](https://zeto.ru/products_and_services/high_voltage_equipment/vyklyuchateli-elegazovye-kolonkovye/elegazovye-kolonkovye-vyklyuchateli-tipa-vgt-110/) (дата обращения: 03.09.2022).

28. Analysis of a large industrial enterprise power [electronic resource]: URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/69/e3sconf\\_energy-212020\\_06005.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/69/e3sconf_energy-212020_06005.pdf) (date of the application 20.09.2022)

29. Electrical equipment for melting metals [electronic resource]: Internet portal «Dy-Kast» URL: <https://www.dykast.com/products/melting-equipment/2722> (date of the application 02.10.2022)

30. Energy sources selection for industrial enterprise combined power supply system [electronic resource]: 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS) URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8764188> (date of the application 22.08.2022)

31. Optimization model of power supply system of industrial enterprise [electronic resource]: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Т. 450 (№ 7) URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/128987> (date of the application 19.09.2022)

32. Scheme of power supply of industrial enterprises [electronic resource]: Internet portal «ResearchGate» URL: [https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-power-supply-of-industrial-enterprises\\_fig1\\_317901271](https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-power-supply-of-industrial-enterprises_fig1_317901271) (date of the application 02.09.2022)