

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 завода металлоконструкций

Обучающийся

Ш.Э. Тавакалов  
(Инициалы Фамилия)

---

(личная подпись)

Руководитель

д.т.н., профессор, П.А. Николаев  
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

---

Консультант

к.п.н., доцент, А.В. Егорова  
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

---

Тольятти 2024

## Аннотация

В выпускной квалификационной работе проведена разработка проекта реконструкции системы электроснабжения завода металлоконструкций.

Ключевым вопросом выпускной работы является разработка надежной и энергоэффективной системы электроснабжения завода, с оптимизированными параметрами элементов схемы электроснабжения за счет правильного выбора их выбора, применения современного силового, распределительного и защитного оборудования.

Целью бакалаврской работы является повышение надежности системы электроснабжения завода металлоконструкций.

Работа выполнена в несколько этапов. На первом этапе рассчитывалась электрическая нагрузка завода металлоконструкций с учетом нового введенного в эксплуатацию оборудования. Для определения цеховых трансформаторов была определена плотность нагрузки и определен центр электрических нагрузок. Далее был произведен расчет нагрузки на шинах низшего напряжения главной понизительной подстанции (ГПП), вследствие чего, были выбраны трансформаторы на ГПП. Затем, в соответствии с требованиями надежности для потребителей I и II категорий, выбрана схема построения электрической сети. Произведен расчет и выбор основного электротехнического оборудование.

Данная ВКР содержит пояснительную записку объемом 61 страница, дополняемую 12 таблицами, 1 рисунком, а также 6 чертежами формата А1.

## **Abstract**

The final qualification work develops a project for the reconstruction of the power supply system of a metalworking plant.

The key issue of the final work is the development of a reliable and energy-efficient power supply system for the plant, with optimized parameters of the elements of the power supply circuit due to the correct choice of their selection, the use of modern power, distribution and protective equipment.

The purpose of the bachelor's thesis is the reconstruction of the power supply system of a metalworking plant.

The work was completed in several stages. At the first stage, the electrical load of the metalworking plant was calculated taking into account the new equipment put into operation. To determine the shop transformers, the load density was determined and the center of electrical loads was determined. Next, the load on the low-voltage buses of the main step-down substation (GPP) was calculated, as a result of which transformers were selected for the GPP. Then, in accordance with the reliability requirements for consumers of categories I and II, a scheme for constructing an electrical network was selected. The calculation and selection of the main electrical equipment was made.

This final qualifying work contains an explanatory note of 57 pages, supplemented by 2 tables, 6 figures, and 6 A1 format drawings.

## Содержание

Введение.....	6
1 Анализ технического состояния завода металлоконструкций.....	8
1.1 Краткие сведения о заводе .....	8
1.2 Электрические нагрузки цехов предприятия .....	9
1.3 Характеристика потребителей по категории надежности и среды производственных помещений .....	10
2 Реконструкция системы электроснабжения.....	12
2.1 Расчет электрических нагрузок .....	12
2.2 Расчет электрических нагрузок системы освещения .....	18
2.3 Картограмма и определение центра электрических нагрузок.....	20
2.4 Выбор числа и мощности силовых трансформаторов цеховых подстанций.....	24
2.4.1 Выбор мощности цеховых трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ	24
2.4.2 Выбор оптимального числа трансформаторов ТП 10/0,4 и 10/6 кВ ....	28
2.4.3 Компенсация реактивной мощности на шинах 0,4 кВ цеховых ТП и уточнение их нагрузки.....	30
2.5 Расчет токов короткого замыкания и выбор основного оборудования .....	33
2.5.1 Расчет токов короткого замыкания .....	33
2.5.2 Выбор автоматических выключателей .....	39
2.5.3 Выбор силовых пунктов.....	42
2.5.4 Выбор кабельных линий 0,4 кВ вне корпусов .....	43
3 Расчет и выбор силового электрооборудования главной понизительной подстанции.....	50
3.1 Выбор мощности трансформатора на ГПП.....	50
3.2 Приближенное экономически целесообразное напряжение внешнего электроснабжения .....	53

3.3 Выбор трансформатора ГПП по техническим условиям.....	54
Заключение .....	56
Список используемых источников.....	57

## Введение

«Электроэнергетические системы (ЭЭС) характеризуются рядом специфических черт, которые отличают их от других инженерных систем. Эти черты включают огромное количество компонентов, достигающее до нескольких тысяч, что делает системы чрезвычайно сложными и многообразными» [22]. Номинальные параметры этих компонентов имеют дискретный характер, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации систем. Вдобавок, многие элементы обладают многофункциональностью, что повышает их значение в системе. Электрические нагрузки и внешние воздействия носят случайный характер, что затрудняет предсказание их поведения. Элементы ЭЭС распределены на обширных территориях, что усложняет управление и обслуживание системы. Также необходимо учитывать «многокритериальность управленческих функций и существующие ограничения на управляющие воздействия» [22].

«Современные ЭЭС должны удовлетворять множеству критериев, таких как экономичность, которая включает в себя также энергосбережение, надежность, качество электроэнергии, электробезопасность и другие параметры» [22]. Для решения задач оптимизации применяются два основных подхода: аналитический, который основывается на ряде предположений, релевантных для данной области, и статистический, который опирается на накопленный опыт проектирования и эксплуатации систем. Этот опыт «отражается в различных отраслевых инструкциях и нормативных документах, которые иногда содержат противоречивые положения и физические интерпретации явлений» [22].

«С развитием вычислительной техники и математических методов решения линейных и нелинейных, непрерывных и дискретных задач оптимизации, а также с появлением специализированных методик, алгоритмов

и программ, которые позволяют более точно учитывать влияющие на оптимизацию ЭЭС факторы, эти два подхода постепенно интегрируются и дополняют друг друга» [8], что повышает эффективность решения задач.

Цель работы – проектирование системы электроснабжения завода металлоконструкций, выбор оборудования.

Объектом исследования является завод металлоконструкций ООО «МетТерра».

Предмет исследования – система электроснабжения завода металлических конструкций.

В ходе проведенных расчетов были получены все необходимые данные по нагрузкам и их распределению, что позволило разработать схему электроснабжения от источника питания до конечного электроприемника. Были выбраны кабели, провода и коммутационное оборудование с учетом всех требований, а также проведены необходимые проверки выбранного оборудования, что гарантирует его надежную работу и соответствие заданным параметрам.

# **1 Анализ технического состояния завода металлоконструкций**

## **1.1 Краткие сведения о заводе**

«Завод металлоконструкций ООО «МетТерра» производит продукцию для различных предприятий Урала. Завод изготавливает металлоконструкции любой сложности, в том числе нестандартных размеров» [6].

Завод расположен по адресу: 454000, г.Челябинск, ул. Строительная, 3. Генеральный план предприятия представлен в графической части проекта.

В 2023 году на предприятии было проведено техническое перевооружение, закуплено новое металлообрабатывающее оборудование, в результате чего возросло потребление электроэнергии. Приобретенное оборудование позволило предприятию «быстро производить необходимые заготовки для последующих сварки и сборки металлоконструкций. Сварочные работы теперь производятся на современных полуавтоматах, обеспечивающих сварной шов высокого качества» [6]. Новое оборудование позволило расширить номенклатуру выпускаемой продукции за счет привлечения нестандартных металлоконструкций на заказ. Основной товарной продукцией предприятия являются:

- «технологические металлоконструкции: опоры трубопроводов, резервуары, эстакады, затворы гидроузлов и гидротехнических сооружений, площадки обслуживания, контейнеры и бункеры ТБО и многое другое;
- строительные металлоконструкции (несущие стальные строительные элементы сооружения). К ним относят колонны, балки, ограждающие конструкции, фермы. Типовое применение строительных металлоконструкций: металлокаркасы гражданских и промышленных объектов, зданий, металлические ангары» [6].

Существующая система электроснабжения перестала справляться с увеличившейся нагрузкой, чаще стали происходить сбои в ее работе. В связи с чем было принято решение о проведении модернизации заводской системы электроснабжения.

## 1.2 Электрические нагрузки цехов предприятия

Электрические нагрузки цехов представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Электрические нагрузки цехов до 1 кВ

Название и назначение	Характеристика электроприемников		
	$n$	Одного ЭП, $p_n$	Общая, $P_n$
Штамповочный №1	2865	1,3/81,2	16384
Цех электротехнической стали	176	10,6/180,7	6354
Канатный	70	19,8/197,8	4033
Штамповочный №2	1754	2,8/142,6	21619
Метизный	382	6,9/152,6	9076
Ферросплавный №1	1305	1,9/112,5	11158
Ферросплавный №2	558	3,6/177,1	8664
Цех обработки тонколистовой стали	32	20,1/201,3	1854
Центральная лаборатория	10	7,9/31,6	158
Инструментальное производство	64	14,3/171,4	2729
Склад лакокрасочных материалов	19	18,3/91,7	775
Инженерный центр	15	21,6/108,1	688
Котельная	62	9,2/92,2	1554
Сварочный	94	0,6/75	962
Станочный цех №3	13	11,4/57,2	343
Водоподготовительная станция	11	11,4/57,2	132
Насосная станция	8	5,5/22	36
Станочный цех №1	48	2,4/7,2	1442
Химическая лаборатория	7	11/109,6	86
Гальваническое отделение	12	7,2/21,5	218
Центральный склад	11	9,1/36,3	307
Станочный цех №2	16	12,8/51,2	406
Станочный цех №3	10	11,6/58	209
Всего по заводу:	7542	0,6/201,3	89187

Таблица 2 – Электрические нагрузки цехов выше 1 кВ

Название и назначение	Характеристика электроприемников			
	Число			$P_n$ , кВт
	Печи	СД	АД	
Штамповочный №1 (ДПТ 10 кВ)	–	–	3	1800
Канатный (ДСП 6 кВ)	9	–	–	1200
Канатный (АД 6 кВ)	–	–	8	1000
Штамповочный №2 (ДПТ 6 кВ)	–	–	6	1130
Штамповочный №2 (ПВЧ 10 кВ)	4	–	–	1190
Метизный (ДПТ 10 кВ)	–	–	2	865
Ферросплавный №1 (сварка 6кВ)	–	–	13	800
Ферросплавный №1 (прокат 10 кВ)	–	–	3	800
Ферросплавный №2 (сварка 6кВ)	–	–	2	800
Ферросплавный №2 (прокат 10 кВ)	–	–	2	800
Станочный цех №3 (6 кВ)	–	9	–	300
Всего по заводу:	13	9	39	56170

### 1.3 Характеристика потребителей по категории надежности и среды производственных помещений

Характеристика предприятия по категории надежности электроснабжения и среды производственных помещений показана в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристика по категории надежности электроснабжения и среды производственных помещений

Название и назначение	Характеристика производственной среды	Категория надежности электроснабжения
Штамповочный №1	Стандартная	1, 2
Цех электротехнической стали	Стандартная	1, 2
Канатный	С повышенной температурой	1, 2
Штамповочный №2	Стандартная	1, 2
Метизный	Стандартная	1, 2
Ферросплавный №1	Стандартная	1, 2
Ферросплавный №2	Стандартная	1, 2

Продолжение таблицы 3

Название и назначение	Характеристика производственной среды	Категория надежности электроснабжения
Цех обработки тонколистовой стали	Стандартная	1, 2
Центральная лаборатория	Стандартная	2
Инструментальное производство	Стандартная	1, 2
Склад лакокрасочных материалов	С повышенным содержанием пыли	2
Инженерный центр	Стандартная	1, 2
Котельная	Стандартная	1, 2
Сварочный	Стандартная	1, 2
Станочный цех №3	С повышенным содержанием влаги	1, 2
Водоподготовительная станция	С повышенным содержанием влаги	2
Насосная станция	Стандартная	2
Станочный цех №1	Стандартная	1, 2
Станочный цех №3	С повышенным содержанием влаги	2
Гальваническое отделение	Химическиопасная	1, 2
Центральный склад	Пожароопасная	2
Станочный цех №2	Стандартная	1, 2
Станочный цех №3	С повышенной температурой	1, 2

Большая часть цехов завода металлоконструкций относится к 1 и 2 категории по надежности электроснабжения

Выводы по разделу 1.

Существующая система электроснабжения оказалась неспособной эффективно справляться с возросшей нагрузкой, что создало значительные проблемы. Это привело к учащению сбоев в ее работе, негативно влияющих на производственный процесс. В связи с этим было принято решение о необходимости проведения комплексной модернизации. Улучшение системы поможет справиться с увеличившимися нагрузками, обеспечив стабильное функционирование. Модернизация повысит надежность и стабильность работы, что важно для производственных мощностей.

## 2 Реконструкция системы электроснабжения

### 2.1 Расчет электрических нагрузок

«Расчет электрических нагрузок металлоконструкций завода на шинах 0,4 кВ цеховых трансформаторных подстанций выполняется в соответствии с методикой, представленной в источнике» [19]. «Расчетные коэффициенты электропотребления определяются на основании данных, приведенных в справочной литературе» [8].

«Расчет производится с использованием коэффициентов расчетной мощности  $K_p$  и  $K_u$ , которые применяются для цеховых трансформаторов согласно методике» [19]. «Кроме того, в расчет включаются индивидуальные коэффициенты использования силового электрооборудования, определяемые за наиболее загруженную смену по данным» [8]. Все результаты расчетов заносятся в таблицу 4 для дальнейшего анализа.

«Для цеха штамповки №1 по справочным данным определяется коэффициент использования  $k_u=0,4$ » [19]. Значение коэффициента мощности  $\cos\varphi=0,85$ , также берется из справочных данных и используется для расчетов. Эти параметры затем заносятся в графы 5 и 6 таблицы 4 для соответствующего учета. Общее количество электрооборудования, которое составляет  $n=2865$ , записывается в графу 2 для дальнейшего расчета. В графу 3 вносятся как «минимальное, так и максимальное значения мощности  $P_{ном}$  группы электропотребителей для обеспечения точности данных. Номинальная мощность электрооборудования рассчитывается по формуле, которая учитывает как полную мощность, так и заданную продолжительность включения ПВ. Эта формула позволяет определить номинальную мощность с высокой точностью, учитывая все необходимые исходные данные» [19]:

$$P_n = S_{ном} \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{100}}, \quad (1)$$

где «ПВ – продолжительность включения, %;

$S_{ном}$  – полная номинальная мощность ЭП, кВА» [19].

«В столбец 7 заносится расчет средней активной мощности» [19]:

$$P_{cp} = k_u \cdot P_{ном}, \quad (2)$$

где « $k_u$  – коэффициент использования;

$P_{ном}$  – номинальная мощность группы ЭП, кВт» [19]

$$P_{cp} = 0,4 \cdot 16384 = 6553,6 \text{ кВт.}$$

«В столбец 8 заносится расчет средней реактивной мощности» [19]:

$$Q_{cp} = P_{cp} \cdot tg \varphi, \quad (3)$$

где « $tg \varphi$  – коэффициент реактивной мощности соответствующий  $\cos \varphi = 0,65$ ;

$P_{cp}$  – средняя за наиболее загруженную смену активная мощность, кВт» [19]

$$Q_{cp} = 0,62 \cdot 16384 = 4063,23 \text{ кВт.}$$

«Средний коэффициент использования по заводу в целом составляет» [8]:

$$k_u = \frac{\sum_1^N P_{cp}}{\sum_1^N P_{ном}}, \quad (4)$$

где « $N$  – число характерных категорий ЭП, входящих в данную группу» [8].

$$k_u = \frac{33593}{89187} = 0,4$$

«Полученное значение заносится в итоговую строку графы 5» [10].

«Эффективное число электроприёмников  $n_э$  в целом по заводу определяется по формуле» [10]:

$$n_э = \frac{2 \cdot \sum P_{ном}}{P_{н.макс}}, \quad (5)$$

где « $P_{н.макс}$  – номинальная мощность наибольшего электроприёмника входящего в состав группы ЭП, кВт» [8].

$$n_э = \frac{2 \cdot 16384}{81,2} = 404.$$

Если обнаруженное значение  $n_э$  окажется больше  $n$ , то будет принято решение установить  $n_э=n$ , чтобы обеспечить соответствие требованиям точности. Дополнительно, если отношение  $P_{ном.макс}/P_{ном.мин} \leq 3$ , где  $P_{ном.мин}$  представляет собой номинальную мощность наименее мощного электроприемника в группе, то также будет сделан выбор в пользу  $n_э=n$ . «Полученное значение эффективного числа электроприемников  $n_э$  округляется до ближайшего меньшего целого значения, что приводит к окончательному результату  $n_э=404$ . Согласно установленным в источнике параметрам, при  $ki=0$  и  $n_э=404$  вычисляется коэффициент расчетной нагрузки  $K_p$  на шинах 0,4 кВ, который составляет 1» [8].

«В соответствии с указаниями, осуществляется расчет нагрузок на шинах 0,4 кВ, учитывая все представленные параметры и условия» [19]:

$$P_p = K_p \cdot P_{cp}, \quad (6)$$

$$Q_p = K_p \cdot Q_{cp}, \quad (7)$$

где « $K_p$  – коэффициент расчетной нагрузки;

$P_{cp}$ ,  $Q_{cp}$  – суммарное расчётное значение на шинах 0,4 кВ, кВт и квар, соответственно» [8].

$$P_p = 0,7 \cdot 6553,6 = 4587,52 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 0,7 \cdot 4063,232 = 2844,262 \text{ квар}.$$

Результаты расчета по формулам (6) и (7) заносим в столбцы 11 и 13 таблицы 4.

«Полная мощность без учёта компенсации реактивной мощности» [8]:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \quad (8)$$

$$S_p = \sqrt{4587,52^2 + 2844,262^2} = 5397,7 \text{ кВА}.$$

«Результаты расчётов по формуле (8) заносим в столбец 13 таблицы 4» [8].

Токовая расчетная нагрузка:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (9)$$

$$I_p = \frac{29428.61}{\sqrt{3} \cdot 0.38} = 42476,54 \text{ А}$$

Аналогично заполняем строки таблицы 4 для других групп электрических приемников.

Таблица 4 – Расчет электрических нагрузок по цехам завода на шинах 0,4 кВ цеховых ТП

Исходные данные				Справочные данные		Расчётные величины		$n_{эф}$	$K_p$	Расчётные нагрузки			Ток I <sub>p</sub> , А
По заданию технологов			$k_u$							$\cos\varphi/\text{tg}\varphi$	$P_{ср}$ , кВт	$Q_{ср}$ , квар	
Группа ЭП	$n$	$P_{ном}$ , кВт											
		Одного	Общая										
Штамповочный №1	2865	1,3/81,2	16384	0,4	0,85/0,62	6622,1	3975,11	398	0,85	4461,33	2931,71	5337,722	7790,909
Цех электротехнической стали	176	10,6/180,7	6354	0,4	0,7/1,02	2357,2	2481,56	69	0,85	1808,35	1736,90	2506,503	3668,109
Канатный	70	19,8/197,8	4033	0,4	0,85/0,62	1745,9	997,17	39	0,85	1343,7	699,44	1514,018	2054,753
Штамповочный №2	1754	2,8/142,6	21619	0,4	0,85/0,62	9012,5	4978,43	297	0,85	5891,11	4122,28	7189,907	10280,25
Метизный	382	6,9/152,6	9076	0,16	0,5/1,73	1387,9	2409,44	122	0,85	987,14	1890,77	2132,198	2931,812
Ферросплавный №1	1305	1,9/112,5	11158	0,4	0,85/0,62	5015,7	2822,14	204	0,85	2978,57	2081,14	3631,904	5305,845
Ферросплавный №1	558	3,6/177,1	8664	0,4	0,85/0,62	4017,88	1939,32	102	0,85	2631,88	1608,22	3083,476	4119,9
Цех обработки тонколистовой стали	32	20,1/201,3	1854	0,8	0,75/0,88	1591,55	1474,08	21	0,70	979,66	997,56	1397,301	2423,951
Центральная лаборатория	10	7,9/31,6	158	0,3	0,5/1,73	50,12	79,11	9	0,70	51,37	70,85	86,608	116,2039
Инструментальное производство	64	14,3/171,4	2729	0,2	0,7/1,02	607,7	488,22	27	0,80	388,14	399,82	556,547	843,9794
Склад лакокрасочных материалов	19	18,3/91,7	775	0,3	0,5/1,73	240,48	399,11	20	0,70	208,30	297,25	362,592	569,9877
Инженерный центр	15	21,6/108,1	688	0,4	0,75/0,88	280,11	250,88	9	0,70	188,17	199,73	273,761	449,7514
Котельная	62	9,2/92,2	1554	0,56	0,8/0,75	911,35	713,07	28	0,80	707,71	504,06	868,254	1177,578
Сварочный	94	0,6/75	962	0,16	0,5/1,73	160,74	270,57	31	0,80	99,39	205,04	227,653	332,9507
Станочный цех №3	13	11,4/57,2	343	0,7	0,8/0,75	239,78	179,64	9	0,70	199,71	160,71	255,345	368,2142
Водоподготовительная станция	11	11,4/57,2	132	0,7	0,8/0,75	89,33	70,15	9	0,70	92,36	60,74	110,675	141,7034
Насосная станция	8	5,5/22	36	0,3	0,5/1,73	9,77	20,13	8	0,70	10,23	14,72	17,204	26,47685
Станочный цех №1	48	2,4/7,2	1442	0,16	0,5/1,73	229,61	400,78	30	0,80	185,26	307,07	358,433	499,0799
Станочный цех №3	7	11/109,6	86	0,7	0,8/0,75	59,13	39,37	9	0,92	71,63	39,78	81,006	102,0972
Гальваническое отделение	12	7,2/21,5	218	0,7	0,8/0,75	147,83	120,62	4	1,40	204,99	139,88	246,855	338,6484
Центральный склад	11	9,1/36,3	307	0,3	0,5/0,73	100,07	160,21	9	0,70	91,39	129,55	157,876	225,7887
Станочный цех №2	16	12,8/51,2	406	0,55	0,7/1,02	219,45	318,82	20	0,70	207,43	207,52	292,742	391,3314
Станочный цех №3	10	11,6/58	209	0,7	0,8/0,75	150,18	112,83	9	0,70	132,67	104,36	168,047	224,3637
Всего по 0,4 кВ	7542	0,6/201,3	89187	0,4	–	35246,38	24700,76	1483	–	23920,49	18909,1	30856,62	42476,54

Продолжение таблицы 4

Исходные данные				Справочные данные		Расчётные величины		$n_{эф}$	$K_p$	Расчётные нагрузки			Ток I <sub>p</sub> , А
По заданию технологов			$k_u$							$\cos\varphi/\operatorname{tg}\varphi$	$P_{cp}$ , кВт	$Q_{cp}$ , квар	
Группа ЭП	$n$	$P_{ном}$ , кВт											
		Одного	Общая										
Штамповочный №1	3	1800	5400	0,7	0,85/0,62	4175	2557,88	5	0,86	3581,89	1944,38	3887,04	236,238
Канатный	9	1200	3600	0,75	0,95/0,33	3114	1022,21	5	0,86	2591,17	788,61	2479,90	251,7016
Канатный	8	1000	3000	0,65	0,8/0,75	2247	1577,69	5	0,86	1882,09	1266,89	2367,79	215,7847
Штамповочный №2	6	1130	3390	0,7	0,85/0,62	2485	1387,86	5	0,86	1977,09	901,23	2877,04	247,175
Штамповочный №2	4	1190	3570	0,8	0,95/0,33	3179	1159,07	5	0,86	2811,33	997,44	2551,19	159,7466
Метизный	2	865	2595	0,7	0,85/0,62	2207,9	997,14	5	0,86	2008,07	4611,32	2088,86	113,5255
Ферросплавный №1	13	800	10400	0,5	0,7/1,02	4988,83	5512,12	25	0,86	4519,91	612,24	5772,03	607,5304
Ферросплавный №1	3	800	2400	0,4	0,85/0,62	1123,87	613,39	5	0,75	907,87	799,19	996,22	59,99696
Ферросплавный №2	2	800	1600	0,5	0,7/1,02	797,17	791,97	6	0,95	799,08	407,72	808,15	109,9603
Ферросплавный №2	2	800	1600	0,4	0,85/0,62	722,93	408,09	6	0,95	638,58	998,55	1988,33	43,41606
Станочный цех №3 (6 кВ)	9	300	2700	0,7	0,85/0,62	2243,09	997,79	22	0,75	1608,98	1109,87	1288,07	192,5853
Всего по 6 кВ	47	–	24690	0,63	–	27283,79	17025,21	94	–	23326,06	14437,44	27104,62	1610,843
Всего по 10 кВ	14	–	15565	0,6	–	11302,5	5404,31	42	–	10172,25	4863,879	11275,28	650,9787

## 2.2 Расчет электрических нагрузок системы освещения

В зависимости от характеристик среды помещений определяется тип источников освещения, причем предпочтение отдается светодиодным «лампам и светильникам в помещениях с нормальными условиями, а в помещениях с жаркой, взрывоопасной или химически активной средой применяются лампы накаливания; на территории завода освещение осуществляется исключительно светодиодными светильниками. Электрические нагрузки осветительных установок оцениваются на основе удельной установленной мощности светильников на квадратный метр освещаемой поверхности и коэффициента спроса на освещение» [15], что позволяет упростить расчет процесса.

Площадь всех цехов определяется в соответствии с генпланом завода, что обеспечивает точное определение пространственных параметров для последующего расчета освещения.

Примером может служить цех штамповки №1 с общей площадью  $S = 34391,5 \text{ м}^2$ , что является основным параметром для дальнейшего расчета. Согласно данным из источника [15], «удельная нагрузка освещения находится в диапазоне от 11 до 13 Вт/м<sup>2</sup>, а среднее значение  $P_{уд} = 12 \text{ Вт/м}^2$  используется в качестве базового показателя. Коэффициент спроса на осветительные установки, как указано в, составляет  $k_{с.о.} = 0,95$ , что учитывается при выборе и установке светодиодных светильников для соответствия требованиям эффективности и экономичности» [15]:

$$P_{уст} = p_{у.о.} \cdot S, \quad (10)$$

где « $S$  – площадь цеха, м<sup>2</sup>;

$p_{у.о.}$  – удельная нагрузка освещения, Вт/м<sup>2</sup>» [15].

$$P_{уст} = 12 \cdot 34391,5 = 412698 \text{ кВт.}$$

«Расчётные активные нагрузки освещения» [15]:

$$P_{рас.освиц} = k_{с.о.} \cdot P_{уст.}, \quad (11)$$

где « $k_{с.о.}$  – коэффициент спроса осветительных установок;

$P_{уст}$  – активная установленная мощность освещения, кВт» [15].

$$P_{рас.освиц} = 0,95 \cdot 412698 = 392063,1 \text{ кВт.}$$

«Расчётные активные нагрузки освещения» [15]:

$$Q_{рас.освиц} = P_{рас.освиц} \cdot tg\varphi, \quad (12)$$

где « $tg\varphi$  – коэффициент реактивной мощности соответствующий  $cos\varphi$ » [15].

$$Q_{рас.освиц} = 392063,1 \cdot 0,33 = 129380,823 \text{ квар.}$$

Остальные расчеты в таблице 5.

Таблица 5 – Осветительные нагрузки

Наименование цеха	Площадь, S, м <sup>2</sup>	Источник света	к.с.о.	cosφ	Нагрузки			
					ру.о, Вт/м <sup>2</sup>	Р <sub>уст</sub> , кВт	Р <sub>расч.осв</sub> , кВт	Q <sub>расч.осв</sub> ,квар
Штамповочный №1	34391,5	Led	0,88	0,88	12	412698	392063,1	129380,8
Цех электротехнической стали	16055	Led	0,88	0,9	12	192660	183027	87852,96
Канатный	15210	Лампы накаливания	0,88	0,88	13	197730	187844	61988,36
Штамповочный №2	28518,75	Led	0,88	0,88	12	34225	325114	107287,54
Метизный	32110	Led	0,88	0,9	12	385320	366054	175706

## Продолжение таблицы 5

Наименование цеха	Площадь, S, м <sup>2</sup>	Источник света	к.с.о.	cosφ	Нагрузки			
					р <sub>у.о.</sub> , Вт/м <sup>2</sup>	Р <sub>уст.</sub> , кВт	Р <sub>расч.осв.</sub> , кВт	Q <sub>расч.осв.</sub> , квар
Ферросплавный №1	43940	Led	0,88	0,88	14	606760	576422	190219,3
Ферросплавный №2	61516	Led	0,88	0,88	14	861224	818163	269993,7
Цех обработки тонколистовой стали	6337,5	Led	0,85	0,86	17	107738	91577	43956,9
Центральная лаборатория	6084	Led	0,6	0,86	11	66924	40154	19274,112
Инструментальное производство	12675	Led	0,85	0,86	17	215475	183153	87913,8
Склад лакокрасочных материалов	2112,5	Led	0,85	0,86	17	35913	30526	14652,3
Инженерный центр	6760	Led	0,8	0,86	20	135200	108160	51916,8
Котельная	9549	Led	0,85	0,86	17	60333	51283	24615,9
Сварочный	1795,625	Led	0,85	0,86	17	30526	25947	12454,46
Станочный цех №3	3549	Led	1	0,86	17	39117	39117	18776,16
Водоподготовительная станция	76,5376	Led	0,6	0,97	17	1301	781	257,63
Насосная станция	7224,75	Led	0,6	0,86	11	79472	47683	22888,01
Станочный цех №1	3168,75	Led	0,85	0,86	13	41194	35015	16807,05
Станочный цех №3	1521	Led	1	0,86	17	25857	25857	12411,36
Гальваническое отделение	2746,25	Лампы накаливания	0,8	0,96	14	38448	30758	10150,14
Центральный склад	507	Лампы накаливания	0,6	0,86	11	5577	3346,2	1606,176
Станочный цех №2	4056	Светодиодный	0,85	0,86	17	68952	58609,2	28132,416
Станочный цех №3	4056	Лампы накаливания	0,8	0,86	10	40560	32448	15575,04
Территория завода	319134,3	Led	1	0,75	0,16	51062	51061,5	38296,121
Всего по заводу	615246,5	–	–	–	–	–	3704162,3	1442112,91

### 2.3 Картограмма и определение центра электрических нагрузок

Радиусы каждой окружности на картограмме определяются на основе расчетной нагрузки для соответствующего цеха, что обеспечивает точное представление распределения электрических нагрузок на территории завода.

Для определения расположения главных распределительных пунктов (ГПП) и цеховых трансформаторных подстанций (ТП) на генплане завода применяется методика «создания картограммы электрических нагрузок цехов, которая визуализирует нагрузки в виде окружностей. Размеры этих окружностей пропорциональны расчетным нагрузкам в выбранном масштабе» [10], что позволяет точно отображать их величину на плане.

«Геометрические центры электрических нагрузок для цехов с равномерным распределением рассчитываются на основе площади каждого цеха, представленной на генеральном плане предприятия. Этот подход обеспечивает высокую точность соответствия между центром электрической нагрузки и центром цеха, указанным на генеральном плане» [10].

Силовые и осветительные нагрузки цехов определяются с использованием данных, полученных из таблиц 4 и 5, что позволяет достичь высокой точности расчетов. Эти значения затем аккуратно вносятся в таблицу 6 для дальнейшего детального анализа и планирования. В таблице 6 данные четко отображаются в столбцах 3 и 4, что способствует повышению удобства и доступности информации для последующего проектирования и эксплуатации электрических систем завода.

Этот методический подход гарантирует, что все расчеты выполнены с максимальной точностью, что является критически важным для эффективной работы производственных процессов:

$$r_i = \sqrt{\frac{(P_{pi} + P_{p.o.i})}{\pi \cdot m}}, \quad (13)$$

где « $P_{pi} + P_{p.o.i}$  – расчётная силовая и осветительная нагрузка цехов, кВт;  
 $m$  – выбранный масштаб, принимаем  $m=10$  кВт/мм<sup>2</sup>» [10].

«Осветительная нагрузка изображается в виде сектора круга. Угол сектора  $\alpha_i$  определяют из отношения осветительной нагрузки  $P_{p.o.i}$  к суммарной нагрузке  $(P_{pi} + P_{p.o.i})$  цеха» [10]:

$$\alpha_i = \frac{360 \cdot P_{p.o.i}}{(P_{pi} + P_{p.o.i})}, \quad (14)$$

Например, для цеха штамповки №1 по формулам (13) и (14) получим:

$$r_1 = \sqrt{\frac{(4587,52 + 392,063)}{\pi \cdot 10}} = 12,59 \text{ мм},$$

$$\alpha_1 = \frac{360 \cdot 392,063}{(4587,52 + 392,063)} = 28,34 \text{ град.}$$

«Результаты расчетов заносятся в таблицу 6, где они соответственно распределяются по соответствующим ячейкам столбцов 5 и 6. Центры электрических нагрузок для каждого цеха сконцентрированы в определенных точках, являющихся центрами нагрузок. Эти координаты точек приведены в таблице 6 и размещены в столбцах 7 и 8» [10].

«Координаты центра» [10]:

$$x_0 = \frac{\sum(x_i \cdot (P_{pi} + P_{p.o.i}))}{\sum(P_{pi} + P_{p.o.i})}, \quad (15)$$

$$y_0 = \frac{\sum(y_i \cdot (P_{pi} + P_{p.o.i}))}{\sum(P_{pi} + P_{p.o.i})}, \quad (16)$$

где « $x_i, y_i$  – координаты центров цехов, мм» [10].

«Аналогично по формулам (13...16) рассчитываются остальные электроприемники, а результаты заносятся в таблицу 6» [10].

Таблица 6 – Картограмма и определение центра электрических нагрузок

Наименование цеха	$P_{расч}$ кВт	$P_{р.о.}$ , кВт	$r$ , мм	$\alpha$ , град.	$x$ , мм	$y$ , мм	$(P_p+P_{p.o.}) \cdot x$	$(P_p+P_{p.o.}) \cdot y$
Штамповочный №1	4587,52	392,06	12,59	28,34	76,375	195	380315,65	971018,68
Цех электротехнической стали	1779,12	183,02	7,9	33,58	78	123,5	153047,47	242325,15
Канатный	1209,9	187,84	6,67	48,38	89,375	86,125	124,923,37	120380,7
Штамповочный №2	6053,32	325,11	14,25	18,35	89,375	40,625	570072,54	259123,88
Метизный	1016,51	366,05	6,64	95,32	87,75	320,12	121319,99	442593,3
Ферросплавный №1	3124,24	576,42	10,86	56,07	269,75	204,75	998253,58	757710,55
Ферросплавный №2	2425,92	818,16	10,16	90,79	370,5	204,75	1201932,8	664225,99
Цех обработки тонколистовой стали	1260,72	91,57	6,56	24,38	180,37	175,5	243920,57	237328,12
Центральная лаборатория	40,29	40,15	1,6	179,7	107,25	266,5	8627,619	21438,33
Инструментальное производство	409,35	183,15	4,344	111,3	269,75	79,65	159827,68	47192,864
Склад лакокрасочных материалов	197,62	30,52	2,7	48,17	188,5	29,25	43006,46	6673,417
Инженерный центр	233,92	108,16	3,3	113,8	269,75	29,25	92276,08	10005,84
Котельная	652,68	51,28	4,735	26,23	39	264,87	27454,56	186462,2
Сварочный	115,44	25,94	2,12	66,07	402,18	95,87	56864,08	13555,48
Станочный цех №3	204,08	39,11	2,78	57,9	406,25	69,87	98800,81	1699,74
Водоподготовительная станция	78,54	0,781	1,59	3,55	406,25	338,28	32224,15	26832,87
Насосная станция	9,12	476,83	3,93	353,2	190,12	320,12	92391,24	155564,74
Станочный цех №1	173,04	35,01	2,574	60,59	349,37	95,875	72689,22	19947,27
Станочный цех №3	56,58	25,85	1,62	112,9	251,87	344,5	20765,83	28402,3
Гальваническое отделение	187,69	30,75	2,64	50,69	177,12	261,62	38694,02	57153,55
Центральный склад	78,28	3,34	1,61	14,76	199,87	144,62	16316,03	11805,91
Станочный цех №2	189,80	58,61	2,81	84,94	354,25	69,87	88000,66	17357,93
Станочный цех №3	12,35	32,44	2,235	74,5	354,25	29,25	55547,46	4586,48

Продолжение таблицы 6

Наименование цеха	$P_{расч}$ кВт	$P_{р.о.}$ , кВт	$r$ , мм	$\alpha$ , град.	$x$ , мм	$y$ , мм	$(P_p+P_{р.о.}):x$	$(P_p+P_{р.о.}):y$
Территория завода	0	51,06	1,275	360	–	–	–	–
Итого 0,4 кВ	24208,07	4133,31	30,04	52,5	–	–	4697271,8	4318679,3
Штамповочный №1	3477,6	–	10,53	–	76,37	195	265601,7	678132
Канатный	2484	–	8,89	–	89,37	86,12	222007,5	213934,5
Канатный	1794	–	7,56	–	89,37	86,12	160338,8	154508,25
Штамповочный №2	2183,16	–	8,34	–	89,37	40,62	195119,9	88690,87
Штамповочный №2	2627,52	–	9,15	–	89,37	40,62	234834,6	106743
Метизный	1671,18	–	7,3	–	87,75	320,12	146646,05	534986,5
Ферросплавный №1	4420	–	11,86	–	269,75	204,75	1192295	904995
Ферросплавный №1	883,2	–	5,3	–	269,75	204,75	238243,2	180835,2
Ферросплавный №2	800	–	5,05	–	370,5	204,75	296400	163800
Ферросплавный №2	640	–	4,52	–	370,5	204,75	237120	131040
Станочный цех №3	1701	–	7,36	–	354,25	29,25	602579,25	49754,25
Итого 6 кВ	13382,16	–	–	–	–	–	2668740,4	1575682,9
Итого 10 кВ	9299,5	–	–	–	–	–	1122445,6	1631736,7

Координаты центра электрических нагрузок завода:  $x_0=165,739$  мм;  
 $y_0=152,381$  мм

## 2.4 Выбор числа и мощности силовых трансформаторов цеховых подстанций

### 2.4.1 Выбор мощности цеховых трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ

Из-за большого количества электроприёмников, отнесенных к 1 и 2 категориям по надёжности электроснабжения на заводе, предпочтительным является использование схем электроснабжения с полным резервированием расчётной нагрузки.

В условиях эксплуатации завода, обусловленных значительным количеством электроприемников, отнесенных к 1 и 2 категориям по показателям надежности электроснабжения, предпочтительным вариантом является применение схем электроснабжения, обеспечивающих полное резервирование расчетной нагрузки. Для всех цеховых трансформаторных подстанций (ТП), функционирующих на шинах с номинальным напряжением 0,4 кВ, предусматривается установка двух рабочих трансформаторов, оснащенных системами автоматического ввода резерва (АВР), которые работают независимо друг от друга, обеспечивая высокую степень надежности. «Результаты выполненных расчетов электрических нагрузок на шинах с номинальным напряжением 0,4 кВ представлены в таблице 7. Суммарная нагрузка силовых потребителей завода, подключенных к шинам 0,4 кВ, составляет величину, равную  $\sum P_{\text{расч}} = 23515,62$  кВт. Суммарная нагрузка системы освещения, с учетом общей площади территории завода, составляет величину, равную  $\sum P_{\text{р.о}} = 3704,16$  кВт, что отражает общие потребности в освещении. Для цехов, в которых нагрузка распределена равномерно, а электропотребители имеют сравнительно малую мощность, при выборе единичной мощности трансформаторов для трансформаторных подстанций ТП 10/0,4 кВ можно применять следующие критерии, учитывая номинальное напряжение питающей сети 0,4 кВ» [16]:

$$S_{\text{шт}} = \begin{cases} 1000,1600 \text{ кВА}, \sigma \leq 0,2 \text{ кВА/м}^2 \\ 1600 \text{ кВА}, 0,2 < \sigma \leq 0,5 \text{ кВА/м}^2, \\ 2500 \text{ кВА}, \sigma > 0,5 \text{ кВА/м}^2 \end{cases} \quad (17)$$

«Плотность нагрузки 0,4 кВ» [16]:

$$\sigma = \frac{S_{расч}}{S}, \text{ кВА/м}^2, \quad (18)$$

$$S_{расч} = \sqrt{(P_{расч} + P_{р.о})^2 + (Q_{расч} + Q_{р.о})^2}, \quad (19)$$

где « $S_{расч}$  – полная расчетная мощность цеха, кВА;

$S$  – площадь цеха, м<sup>2</sup>.

$P_{расч}, Q_{расч}$  – активная и реактивная силовые нагрузки цеха, кВт, квар;

$P_{р.о}, Q_{р.о}$  – активная и реактивная осветительные нагрузки» [16].

Например, для цеха штамповки №1 получаем:

$$S_{расч} = \sqrt{(4587,5 + 392,0631)^2 + (2844,3 + 129,381)^2} = 5799,9 \text{ кВА.}$$

$$\sigma = \frac{5799,9}{34391,5} = 0,169 \text{ кВА/м}^2.$$

Результаты расчета в таблице 7.

Таблица 7 – Плотность нагрузки 0,4 кВт

Наименование цеха	$P_{расч}$ , кВт	$P_{р.о}$ , кВт	$Q_{расч}$ , квар	$Q_{р.о}$ , квар	$S_{расч}$ , кВА	$S$ , м <sup>2</sup>	$\sigma$ , кВА/м <sup>2</sup>
Штамповочный №1	4587,5	392,06	2844,3	129,381	5799,9	34391,5	0,169
Цех электротехнической стали	1779,1	183,02	1814,7	878,53	2733,1	16055	0,170
Канатный	1209,9	187,84	750,14	61,98836	1616,55	15210	0,106
Штамповочный №2	6053,3	325,11	3753,1	107,28	7455,65	28518,75	0,261
Метизный	1016,5	366,05	1758,6	175,706	2377,58	32110	0,074
Ферросплавный №1	3124,2	576,42	1937,1	190,2193	4268,5	43940	0,098
Ферросплавный №2	2425,9	818,16	1504,1	269,99	3659,876	61516	0,059
Цех обработки тонколистовой стали	1260,7	91,57	1109,4	43,95	1931,71	6337,5	0,305
Центральная лаборатория	40,29	40,15	69,7	19,27	139,24	6084	0,023

Продолжение таблицы 7

Наименование цеха	$P_{расч},$ кВт	$P_{р.о.},$ кВт	$Q_{расч},$ квар	$Q_{р.о.},$ квар	$S_{расч},$ кВА	S, м <sup>2</sup>	$\sigma, \text{кВА/м}^2$
Инструментальное производство	409,35	183,15	417,54	87,91	736,11	12675	0,058
Склад лакокрасочных материалов	197,63	30,52	341,89	14,66	486,60	2112,5	0,230
Инженерный центр	233,92	108,16	205,85	51,91	428,32	6760	0,063
Котельная	652,68	51,283	489,51	24,61	871,71	9549	0,246
Сварочный	115,44	25,947	199,7	12,46	254,95	1795,65	0,142
Станочный цех №3	204,1	39,117	153,06	18,77	297,78	3549	0,129
Водоподготовительная станция	78,54	0,781	58,905	0,25	98,95	76,53	1,293
Насосная станция	9,12	47,683	15,88	22,88	487,49	7224,75	0,067
Станочный цех №1	173,04	35,015	299,36	16,95	378,48	3168,75	0,119
Станочный цех №3	56,59	25,857	42,441	12,41	99,02	1521	0,065
Гальваническое отделение	187,7	30,758	140,74	10,15	265,49	2746,25	0,097
Центральный склад	78,285	3,3462	135,43	1,606	159,51	507	0,315
Станочный цех №2	189,81	58,609	193,6	28,13	332,98	4056	0,082
Станочный цех №3	124,36	32,448	93,266	15,575	190,87	4056	0,047
Территория завода		51,06		38,29	63,82	319134,3	0,0002
Всего по 0,4 кВ	24208	4133,31	18328	1617,68	34656,45	615246,5	0,056
Канатный	2484		819,72		2615,76	15210	
Канатный	1794		1345,5		2242,5	15210	
Штамповочный №2	2183,2		1353,6		2568,72	28518,75	
Ферросплавный №1	4420		4508,4		6313,64	43340	
Ферросплавный №2	800		816		1142,74	61516	
Станочный цех №3	1701		1054,6		2001,41	4056	
Итого 6 кВ	13382		9897,8		16644,78	167850,7	

Используя данные таблицы 7, среднезаводская плотность нагрузки:

$$\sigma = \frac{\sum S_{расч}}{\sum S}, \quad (20)$$

$$\sigma = \frac{34656,45}{615246,5} = 0,056 \text{ кВА/м}^2.$$

«Основываясь на средней плотности электрической нагрузки завода, которая составляет 0,06 кВА/м<sup>2</sup>, можно определить, что единичная мощность трансформаторов для трансформаторных подстанций (ТП) должна быть равна

$S_{н.т} = 1600$  кВА» [18]. «В соответствии с этой принятой единичной мощностью трансформатора, а также с учетом полной компенсации реактивной мощности на шинах напряжением 0,4 кВ, будет определено минимально необходимое количество трансформаторов для обеспечения завода электроэнергией.

Для тех цехов, которые оснащены электрическими устройствами, работающими при напряжении 6 кВ, предусмотрено использование каскадных трансформаторов. Эти каскадные трансформаторы должны обладать номинальными параметрами 10/6 кВ. Они выбираются с номинальной мощностью, равной  $S_{н.т} = 2500$  кВА, что обеспечивает их полное соответствие энергетическим потребностям завода и гарантирует стабильную работу всей системы электроснабжения. Минимальное количество трансформаторов» [18]:

$$N_{\min} = \frac{\sum P_{расч} + \sum P_{р.о.}}{k_3 \cdot S_{н.т.}} + \Delta N, \quad (21)$$

где « $\Delta N$  – добавка до целого числа трансформаторов;

$k_3$  – коэффициент загрузки в нормальном режиме,  $k_3 = 0,7$ » [18].

$$N_{\min} = \frac{24208 + 4133,31}{0,7 \cdot 1600} + 0,695 = 26.$$

#### 2.4.2 Выбор оптимального числа трансформаторов ТП 10/0,4 и 10/6 кВ

Из рисунка 4.7 [22] для  $k_3 = 0,7$ ,  $N_{\min} = 26$  и  $\Delta N = 0,695$  находим рекомендуемое число дополнительных трансформаторов  $m$  для обеспечения требуемой надежности ( $m=0$ ). Тогда, окончательно:

$$N_{\text{онт}} = N_{\min} + m, \quad (22)$$

$$N_{\text{онт}} = 26 + 0 = 26$$

Для нагрузки на уровне 6 кВ требуется выбрать два трансформатора, так как это соответствует требованиям первой категории надежности электроснабжения, что предполагает высокую степень надежности [29]. По результатам проведенных расчетов необходимо установить тринадцать двухтрансформаторных подстанций, каждая из которых имеет мощность  $2 \times 1600$  кВА, для обеспечения бесперебойного питания завода. «Кроме того, предусмотрены две двухтрансформаторные подстанции каскадного типа, которые оснащены трансформаторами 10/6 кВ и имеют мощность  $2 \times 6300$  кВА, чтобы соответствовать требованиям завода [27].

Каждая из этих подстанций, как рассчитано, может быть загружена до мощности, равной расчетной нагрузке, что обеспечивает необходимую надежность и стабильность электроснабжения завода» [22]:

$$S_{ТП} = n \cdot k_3 \cdot S_{н.т.}, \quad (23)$$

где « $n$  – количество трансформаторов;

$k_3$  – коэффициент загрузки трансформатора,  $k_3 = 0,7$ ;

$S_{н.т.}$  – номинальная мощность трансформаторов ТП, кВА» [22].

«Мощность двухтрансформаторных подстанций» [22]:

$$S_{ТП} = 2 \cdot 0,7 \cdot 1600 = 2240 \text{ кВА},$$

$$S_{ТП} = 2 \cdot 0,7 \cdot 6300 = 8820 \text{ кВА}.$$

«Трансформаторные подстанции (ТП) размещаются в цехах, где наблюдается наибольшая электрическая нагрузка, что обеспечивает их эффективное использование. Расположение подстанций организовано таким образом, чтобы трансформаторы были загружены максимально близко к своей

номинальной мощности. При этом обязательно учитывается коэффициент загрузки. Для оптимизации энергосистемы протяжённость сетей напряжением 0,4 кВ между цехами должна быть минимальной» [22], что снижает потери энергии. Расположение всех цеховых ТП детально отображено на генеральном плане завода, что позволяет легко определить их местоположение [28]. «Распределение всех потребителей по ТП, а также их точное размещение, подробно представлены в таблице 8 для анализа. В таблице 8 указаны все необходимые данные о размещении и распределении потребителей, что способствует пониманию их распределения по заводу» [22].

### 2.4.3 Компенсация реактивной мощности на шинах 0,4 кВ цеховых ТП и уточнение их нагрузки

Допустимая реактивная мощность:

$$Q_{\max} = \sqrt{(n \cdot k_3 \cdot S_{н.т.})^2 - P_{расч}^2}, \quad (24)$$

где « $n$  – количество трансформаторов на ТП;

$k_3$  – коэффициент загрузки трансформатора,  $k_3 = 0,7$ ;

$S_{н.т.}$  – номинальная мощность трансформаторов ТП, кВА;

$P_{расч}$  – расчётная активная нагрузка ТП на шинах 0,4 кВ, кВт» [7].

$$Q_{\max} = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 1600)^2 - 2141,2108^2} = 657,888 \text{ квар.}$$

Например, для ТП-2:

$$Q_{нк1} = Q_{расч} - Q_{\max}, \quad (25)$$

где « $Q_{расч}$  – расчётная реактивная нагрузка ТП на шинах 0,4 кВ, квар» [7].

$$Q_{HK1} = 1278,68283 - 657,888 = 620,79483 \text{ квар}$$

Для ТП2:

$$Q_{HK2} = Q_{расч} - Q_{HK1} - \gamma \cdot n \cdot S_{н.т.}, \quad (26)$$

где « $\gamma$  – расчётный коэффициент, зависящий от двух  $K_{p1}$  и  $K_{p2}$  расчётных параметров» [12].

$$Q_{HK2} = 1278,68283 - 620,79483 - 0,56 \cdot 2 \cdot 1600 = -1134,11253 \text{ квар.}$$

«Полученное значение отрицательное, значит для ТП-2 компенсация реактивной мощности достаточная. Принимаем для ТП2 две конденсаторные батареи УКРМ–0,4–350–25 У1 по 350 квар каждая» [12].

«Проверяем фактический коэффициент загрузки трансформаторов в нормальном режиме» [12]:

$$k_3 = \frac{\sqrt{P_{расч}^2 + (Q_{расч} - Q_{HK})^2}}{n \cdot S_{н.т.}}, \quad (27)$$

$$k_3 = \frac{\sqrt{2141,2108^2 + (1278,68283 - 2 \times 350)^2}}{2 \cdot 1600} = 0,696 \approx 0,7.$$

Для остальных ТП результаты заносим в таблицу 8.

Таблица 8 – Цеховые нагрузки с учетом КРМ

№ ТП	№ цеха	Наименование	$P_{расч}$ , кВт	$Q_{расч}$ , квар	$Q_{HK1}$ , квар	$Q_{HK2}$ , квар	$Q_{HK1} + Q_{HK2}$ , квар	$n \cdot S_{н.т.}$ , кВА	$k_3$
ТП1	17	Насосная станция	485,9 5	38,769 51	–	–	–	–	–
	13	Центральная котельная	703,9 63	514,12 59	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 8

№ ТП	№ цеха	Наименование	$P_{расч}$ , кВт	$Q_{расч}$ , квар	$Q_{нк1}$ , квар	$Q_{нк2}$ , квар	$Q_{нк1+Q_{нк2}}$ , квар	$n \cdot S_{н.т.}$ , кВА	$k_3$
	20	Гальваническое отделение	218,4 56	150,88 51	–	–	–	–	–
	8	Цех обработки тонколистовой стали	676,1 485	689,71 4	–	–	–	–	–
	–	Итого ТП1	2166, 9625	1393,4 95	826,1 6	0	826,16	3200	0,7
ТП2	1	Штамповочный №1	2141, 2108	1278,6 83	–	–	–	–	–
	–	Итого ТП2	2141, 2108	1278,6 83	624,0 6	0	624,06	3200	0,7
ТП3	1	Штамповочный №1	697,1 384	416,31 53	–	–	–	–	–
	5	Метизный	1382, 564	1934,2 72	–	–	–	–	–
	9	Центральная лаборатория	80,44 4	113,65 86	–	–	–	–	–
	–	Итого ТП3	2154, 1464	2464,2 46	1850	1177, 7	672,246	3200	0,7
ТП4	6	Ферросплавный №1	2220, 3972	1276,3 49	–	–	–	–	–
	–	Итого ТП4	2220, 3972	1276,3 49	980,6 5	0	980,65	3200	0,7
ТП5	6	Ферросплавный №1	1480, 2648	850,89 92	–	–	–	–	–
	10	Инструментальное производство	592,5 03	436,81 11	–	–	–	–	–
	21	Центральный склад	81,63 12	137,03 93	–	–	–	–	–
	–	Итого ТП5	2154, 399	1425,7 49	812,4 3	0	812,43	3200	0,7
ТП6	2	Цех электротехнической стали	1962, 147	1902,5 55	–	–	–	–	–
	12	Инженерный центр	205,2 48	154,65 98	–	–	–	–	–
	18	Станочный цех №1	208,0 55	316,16 63	–	–	–	–	–
	–	Территория завода	51,06 15	38,296 1	–	–	–	–	–
	–	Итого ТП6	2205, 5663	1371,0 36	979,7 8	0	979,784 9	3200	0,7

Продолжение таблицы 8

№ ТП	№ цеха	Наименование	$P_{расч}$ , кВт	$Q_{расч}$ , квар	$Q_{нк1}$ , квар	$Q_{нк2}$ , квар	$Q_{нк1+Q_{нк2}}$ , квар	$n \cdot S_{н.т}$ , кВА	$k_3$
ТП13	7	Ферросплавный №2	1297,6332	677,7156	–	–	–	–	–
	14	Сварочный цех	141,387	212,1657	–	–	–	–	–
	15	Станочный цех №3	243,202	171,84	–	–	–	–	–
	16	Водоподготовка	79,321	221,7335	–	–	–	–	–
	22	Станочный цех №2	248,414	108,8413	–	–	–	–	–
	23	Станочный цех №3	156,803	59,16263	–	–	–	–	–
	–	Итого ТП13	2166,7602	1251,459	683,35	0	683,3476	3200	0,7
ТП14	3	Канатный	2484	819,72	–	–	–	–	–
	3	Канатный	1794	1345,5	–	–	–	–	–
	4	Штамповочный №2	2183,2	1353,6	–	–	–	–	–
	–	Итого ТП14	6461,2	3518,82	–2485	0	0	12600	0,6
ТП15	6	Ферросплавный №1	4420	4508,4	–	–	–	–	–
	7	Ферросплавный №2	800	816	–	–	–	–	–
	23	Станочный цех №3	1701	1054,6	–	–	–	–	–
	–	Итого ТП15	6921	6379	911,6	0	911,63	12600	0,6

## 2.5 Расчет токов короткого замыкания и выбор основного оборудования

### 2.5.1 Расчет токов короткого замыкания

На рисунке 1 представлена расчетная схема короткого замыкания, которая служит основой для анализа электросетей. В данной схеме точка К1 расположена на шинах 220 кВ главной понижающей подстанции (ГПП), что позволяет учитывать высокие уровни напряжения. Эта точка используется для

«выбора выключателей, рассчитанных на напряжение 220 кВ, обеспечивая надежную защиту системы. Точки К2 и К3 находятся на шинах 10 кВ и 0,4 кВ ГПП соответственно, что дает возможность детально анализировать распределение нагрузки. Эти точки служат для определения параметров выключателей распределительного устройства на 10(6) кВ на ГПП, гарантируя соответствие защитных устройств техническим требованиям. Они также используются для выбора автоматических выключателей на секциях питания, что обеспечивает безопасность и стабильность работы электроустановок» [11].

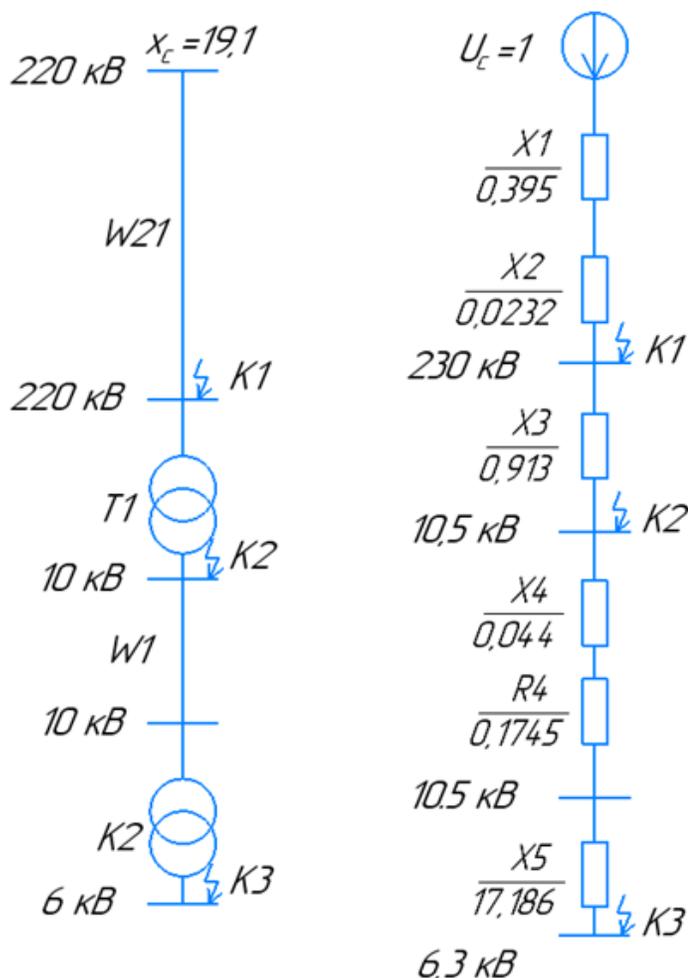


Рисунок 1 – Схемы для расчета токов К3: слева – расчётная схема К3; справа – схема замещения

«Расчёт токов короткого замыкания проводится в относительных единицах, учитывая приведение сопротивлений схемы к базовым условиям при средних значениях напряжения. В качестве базовых значений приняты:  $S_б = 1000$  МВА для энергосистемы,  $U_{б1} = 230$  кВ на шинах 10 кВ,  $U_{б2} = 10,5$  кВ на шинах 0,4 кВ и  $U_{б3} = 0,4$  кВ. Сопротивление энергосистемы на шинах 220 кВ равно 19,1 Ом» [17].

«Определяем базисные токи на каждом уровне напряжений по формуле (28)» [17]:

$$I_б = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_б}, \quad (28)$$

$$I_{б1} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 2,51 \text{ кА},$$

$$I_{б2} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 54,99 \text{ кА},$$

$$I_{б3} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 91,6456 \text{ кА}.$$

«Сопротивление энергосистемы в относительных единицах» [17]:

$$X_1 = X_c \cdot \frac{S_б}{U_{б1}^2}, \quad (29)$$

$$X_1 = 19,1 \cdot \frac{1000}{220^2} = 0,395.$$

«Сопротивление ЛЭП 35 кВ W1 в относительных единицах» [17]:

$$X_2 = \frac{X_0 \cdot S_{\bar{\sigma}} \cdot l_{21}}{n_y \cdot U_{\bar{\sigma}1}^2}, \quad (30)$$

$$X_2 = \frac{0,234 \cdot 1000 \cdot 9,6}{2 \cdot 220^2} = 0,0232.$$

«Сопротивление трансформатора в относительных единицах» [17]:

$$X_3 = \frac{u_K \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{n_m \cdot S_{\text{номТ}}}, \quad (31)$$

$$X_3 = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{1000}{2 \cdot 63} = 0,913.$$

«Сопротивление трансформатора 10/0,4» [17]:

$$X_5 = \frac{u_K \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{n_m \cdot S_{\text{номТ}}}, \quad (32)$$

$$X_5 = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{1000}{2 \cdot 1,6} = 17,186.$$

«Сопротивление КЛ 10 кВ W1 в относительных единицах» [17]:

$$X_4 = \frac{X_0 \cdot S_{\bar{\sigma}} \cdot l_5}{n_y \cdot U_{\bar{\sigma}2}^2}, \quad (33)$$

$$R_4 = \frac{R_0 \cdot S_{\bar{\sigma}} \cdot l_5}{n_y \cdot U_{\bar{\sigma}2}^2}, \quad (34)$$

где « $R_0, X_0$  – погонные активные и реактивные сопротивление кабеля, Ом/км» [17].

$$X_4 = \frac{0,083 \cdot 1000 \cdot 0,118}{2 \cdot 10,5^2} = 0,0444,$$

$$R_4 = \frac{0,326 \cdot 1000 \cdot 0,118}{2 \cdot 10,5^2} = 0,1745.$$

«Суммарное сопротивление до точки K1» [17]:

$$X_{\sum K1} = X_1 + X_2, \quad (35)$$

$$X_{\sum K1} = 0,395 + 0,0232 = 0,4273.$$

«Суммарное сопротивление до точки K2» [20]:

$$X_{\sum K2} = X_1 + X_2 + X_3, \quad (36)$$

$$X_{\sum K2} = 0,395 + 0,0232 + 0,913 = 1,34.$$

«Суммарное сопротивление до точки K3» [20]:

$$Z_{K3} = \sqrt{R_4^2 + (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5)^2}, \quad (37)$$

$$Z_{K3} = \sqrt{0,1745^2 + (10,884 + 0,789 + 0,913 + 0,044 + 17,186)^2} = 18,57.$$

«Токи короткого замыкания рассчитываем для времени  $t=0$ , а для апериодического тока берем время равное  $t=0,1$  с, это необходимо для проверки технологического оборудования на термическую и электродинамическую стойкость.

Периодическая составляющая тока КЗ в точке K1» [20]:

$$I_{п0 K1}^{(3)} = \frac{U^* c}{X_{\sum K1}} \cdot I_{\phi 1}, \quad (38)$$

$$I_{I0K1}^{(3)} = \frac{1}{0,4273} \cdot 2,51 = 5,8741 \text{ кА.}$$

«Ударный ток короткого замыкания в точке  $K1$ » [21]:

$$i_y^{(3)} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{I0K1}^{(3)}, \quad (39)$$

где « $I_{I0K1}^{(3)}$  – начальное значение периодической составляющей;

$K_y$  – ударный коэффициент, зависящий от постоянного времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ» [21].

$$i_y^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 5,8741 = 14,953 \text{ кА.}$$

«Aпериодическую составляющую тока КЗ в точке  $K1$ » [21]:

$$i_a = \sqrt{2} \cdot I_{I0K1}^{(3)} \cdot e^{-\tau/T_a} \quad (40)$$

где « $T_a$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ» [21].

$$i_a = \sqrt{2} \cdot 5,8741 \cdot e^{-0,1/0,02} = 0,056 \text{ кА.}$$

Результаты остальных расчетов в таблице 9.

Таблица 9 – Расчет токов КЗ

Точка КЗ	$I_{I0}^{(3)}$ , кА	$i_y^{(3)}$ , кА	$i_a$ , кА
K1	5,8741	14,953	0,056
K2	41,04	104,464	0,391
K3	4,935	12,563	0,047

## 2.5.2 Выбор автоматических выключателей

Условия выбора автоматических выключателей [3]:

$$U_{ном} \geq U_{н.л.}, \quad (41)$$

$$I_{ном} \geq I_{р.а.}, \quad (42)$$

где « $U_{ном}, I_{ном}$  – номинальные напряжение и ток аппарата;

$U_{н.л.}, I_{р.а.}$  – напряжение и наибольший расчётный ток в линии, в которой установлен данный аппарат» [3].

Для обеспечения корректной работы автоматических выключателей с напряжением 380 В необходимо провести анализ и установить оптимальные значения уставок тепловых расцепителей, а также проверить уровни уставок электромагнитных расцепителей на исключение возможных ложных срабатываний в случае кратковременных перегрузок [25]. Убедившись в соответствии уставок тепловых расцепителей требованиям, обеспечивающим защиту от перегрузок, можно гарантировать безопасную и эффективную эксплуатацию автоматических выключателей с напряжением 380 В в различных условиях эксплуатации [30].

Проверка электромагнитных расцепителей на предмет исключения ложных срабатываний в условиях кратковременных перегрузок играет ключевую роль в обеспечении непрерывной и стабильной работы системы электроснабжения, что важно для безопасности и эффективности электрооборудования:

$$I_{н.расч} \geq I_{расч}, \quad (43)$$

где « $I_{н.расц}$  – номинальный ток теплового расцепителя» [3].

«Для электромагнитного расцепителя должно выполняться условие» [11]:

$$I_{с.о.} \geq k_{п} \cdot I_{расч}, \quad (44)$$

где « $I_{с.о.}$  – ток уставки электромагнитного расцепителя;

$k_{п}$  – кратность пускового тока» [11].

«У выбранного автоматического выключателя необходимо проверить чувствительность, по следующему соотношению» [11]:

$$k_{ч}^{(1)} = \frac{I_{к}^{(1)}}{I_{с.о.}} \geq 1,1 \cdot k_{п}, \quad (45)$$

где « $k_{п}$  – коэффициент разброса выключателя,  $k_{п} = 1,3$ » [11].

Осуществляем проверку выключателя:

$$U_{ном.пп} = 0,4 \geq U_{сети} = 0,4 \text{ кВ},$$

$$I_{н} = 4000 > I_{СПП} = 3918,99,$$

$$I_{н.расц} = 4000 > I_{расч} = 3918,99 \text{ А},$$

$$k_{ч} = \frac{24610}{4000} = 6,15 > 1,43,$$

где  $I_{с.о.} = 4000$  А соответствует уставке  $I_{sd} = 1 \cdot I_{н}$ ,

$$I_{к.мах} = 24,61 < I_{н.откл} = 70 \text{ кА}.$$

«Для СП1 выбираем прибор типа ВА 75–47 4000А» [4]. Результаты выбора остальных приборов в таблице 10.

Таблица 10 – Автоматические выключатели

№ СП	Номинальный ток	Ток однофазного КЗ $I_k$ , кА	Ток трехфазного КЗ $I_k$ , кА	$I_{н.расц.}$ , А	$I_{с.о.}$ , А	$k_c^{(1)}$	Номинальная отключающая способность, кА	Марка
СП1.1	3918,99	24,61	13,603	4000	4000	6,15	70	ВА 75–47
СП1.2	3793,865	14,51	13,603	4000	4000	3,63	70	ВА 75–47
СП1.3	150,6313	0,64	13,603	160	160	4,00	32,5	ВА 55–37
СП2	4157,4	34,83	13,603	630	6300	5,53	47,5	ВА 52–39
СП3	2459,007	18,43	13,603	2500	2500	7,37	60	ВА 75–45
СП4.1	3969,39	33,23	13,603	4000	4000	8,31	70	ВА 75–47
СП4.2	3969,39	17,4	13,603	4000	4000	4,35	70	ВА 75–47
СП4.3	3402,334	10,72	13,603	4000	4000	2,68	70	ВА 75–47
СП5	3616,643	34,02	13,603	4000	4000	8,51	70	ВА 75–47
СП6.1	3895,8	32,79	13,603	4000	4000	8,20	70	ВА 75–47
СП6.2	2597,2	8,53	13,603	4000	3200	2,67	70	ВА 75–47
СП7.1	3340,318	23,92	13,603	4000	4000	5,98	70	ВА 75–47
СП7.2	2226,879	7,14	13,603	2500	2500	2,86	60	ВА 75–45
СП8.1	1469,209	14,51	13,603	1600	1600	9,07	80	ВА 75–42
СП8.2	1469,209	7,9	13,603	1600	1600	4,94	80	ВА 75–42
СП9	211,8136	4,03	13,603	630	250	16,12	50	ВА 52–39
СП10	1119,735	9,34	13,603	1600	1600	5,84	80	ВА 75–42
СП11	740,1976	10,04	13,603	1000	1000	10,04	55	ВА 75–41
СП12.1	390,9263	2,42	13,603	630	400	6,05	50	ВА 52–39
СП12.2	260,62	1,62	13,603	630	320	5,06	50	ВА 52–39
СП13	1326,006	6,27	13,603	1600	1600	3,92	80	ВА 75–42
СП14	387,831	14,19	13,603	630	400	35,48	50	ВА 52–39
СП15	452,975	3,92	13,603	630	500	7,84	50	ВА 52–39
СП16	358,2207	3,12	13,603	630	400	7,80	50	ВА 52–39
СП17	741,5486	4,62	13,603	1000	1000	4,62	55	ВА 52–39
СП18	575,7244	11,42	13,603	630	630	18,13	50	ВА 52–39

## Продолжение таблицы 10

№ СП	Номинальный ток	Ток однофазного КЗ $I_k$ , кА	Ток трехфазного КЗ $I_k$ , кА	$I_{н.расч}$ , А	$I_{с.о.}$ , А	$k_{\sigma}^{(1)}$	Номинальная отключающая способность, кА	Марка
СП19	3793,663	9,79	13,603	4000	4000	2,45	70	ВА 75–47
СП20	406,8611	3,32	13,603	630	500	6,64	50	ВА 52–39
СП21	303,297	2,65	13,603	630	320	8,28	50	ВА 52–39
СП22	412,5525	32,05	13,603	630	500	64,10	50	ВА 52–39
СП23	254,933	8,01	13,603	630	320	25,03	50	ВА 52–39

### 2.5.3 Выбор силовых пунктов

Для проведения анализа выберем силовой распределительный пункт, применяемый в сварочном цехе, в качестве примера для исследования.

Количество электроприемников в цехе составляет 94. «Предполагается, что от силового пункта отходит 11 линий, направленных к распределительным пунктам. Расчетный ток кабельной линии от трансформаторной подстанции к силовому пункту послеаварийного режима оценивается в соответствии с данными из таблицы 10. Для обеспечения электроснабжения выбран силовой пункт ПР8503 2203–3 У2, спроектированный для 16 отходящих линий и с номинальным током до 500 А» [13].

«На входе силового пункта размещен трехполюсный автоматический выключатель серии ВА52–37» [13]. Номинальный ток автомата проверяется в соответствии с условиями эксплуатации:

$$I_{ном.а.} \geq I_{длит}, А \quad (46)$$

$$400 А \geq 387,831 А.$$

Номинальный ток расцепителя:

$$I_{\text{ном. расц. т.}} \geq I_{\text{длит}}, \text{ А} \quad (47)$$

$$400 \text{ А} \geq 387,831 \text{ А}$$

Расчет для других цехов аналогичен.

#### 2.5.4 Выбор кабельных линий 0,4 кВ вне корпусов

«Выбор кабельных линий 0,4 кВ вне корпусов осуществляется аналогично выбору кабелей внутреннего электроснабжения 10 кВ.

Расчётные токи послеаварийного режима находим по формуле (44). Например для W22, на участке от ТП1 до СП8 получаем ток послеаварийного режима W14» [1]:

$$I_{p.a} = \frac{\sqrt{(703,963^2 + 514,126^2)}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 1326,006 \text{ А.}$$

Выбираем два кабеля марки ШМА73 [23]. Проверяем его на нагрев по формуле (47):

$$1600 \cdot 0,9 \cdot 1,3 = 1872 \text{ А} \geq 1326,006 \cdot 1 = 1326,006 \text{ А}$$

«Потери напряжения в линии в нормальном режиме» [13]:

$$\Delta U_{ij} = \frac{P_i \cdot R_{ij} + Q_i \cdot X_{ij}}{U_i^2}, \quad (48)$$

$$\Delta U_{\text{дон}} = 5\% \geq \Delta U = \frac{0,5 \cdot (703,963 \cdot 0,0072 + 514,126 \cdot 0,0041)}{380^2} \cdot 10^3 \cdot 100\% = 2,47\%$$

Данные потери получились меньше допустимого [14]. «Для остальных кабельных линий КЛ 0,4 кВ сечения выбираются аналогично, результаты заносятся в таблицу 11. В результате выбора кабелей, были применены закрытые токопроводы для соединения силовых пунктов и цеховых подстанций, территориально расположенных в разных зданиях, которые будут прокладываться по опорным конструкциям и траншеям» [26].

Выводы по разделу 2.

В данном разделе был выполнен расчет электрических нагрузок, по результатам которого подобрано основное электротехническое оборудование проверенное по критериям выбора, в том числе на электродинамическую стойкость. Расчетная нагрузка 0,4 кВ по всему заводу составила: активная – 23515 кВт, реактивная – 17693 квар, полная – 29428 кВА, расчетный ток – 42476 А. Силовые трансформаторы марки ТМ, конденсаторные установки УКРМ объединены в 15 трансформаторных пунктов. Основным защитным автоматическим выключателем выбраны марки ВА75-47, ВА47-37, ВА52-39 расположенными в силовых пунктах типа ПР8503.

Таблица 11 – Выбор кабелей 0,4 кВ

ЛЭП	Начало	Конец	Длина L, км	$P_{расч}$ , кВт	$Q_{расч}$ , квар	$I_{р.а.}$ , А	Марка	Способ прокладки	$I_{доп}$ , А	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$r$ , Ом	$x$ , Ом	$\Delta U$ , %
W22	ТП1	СП13	0,2387	703,963	514,126	1326,005 966	ШМА73	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	1600	0,03	0,017	0,0071 6	0,004	2,467919
W23		СП20	0,1563	218,456	150,885	403,8610 91	ШРА–6	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	630	0,1	0,13	0,0156	0,0203	2,243872
W24		СП17	0,2559	485,95	38,7695	741,5486 452	ШМАХ–65	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	1000	0,033	0,018	0,0084 5	0,0046	1,482785
W25		СП8.1	0,077	676,1485	689,714	1469,209 414	ШМА73	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	1600	0,03	0,017	0,0023 1	0,0013	0,853441
W26	ТП2	СП1.1	0,0584	2166,962 5	1393,5	3918,991 845	ШМА–59С	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	4000	0,011	0,009	0,0006	0,0005	0,735622
W27	ТП3	СП1.2	0,1704	2141,210 8	1278,68	3793,665 156	ШМА–59С	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	4000	0,011	0,009	0,0018 7	0,0015	2,068724
W28		СП9	0,063	80,444	113,659	211,8135 639	АВВГ–5×120	В траншее и по опорной конструкции	230	0,27	0,0602	0,0170 1	0,0038	0,623066
W29	ТП4	СП6.1	0,0182	2220,3 972	1276,3 5	3895,8 00837	ШМА–59С	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	4000	0,01 1	0,009	0,000 2	0,0001 6	0,2263 12
W30	ТП5	СП10	0,0085	592,50 3	436,81 1	1119,7 35239	ШМА73	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	1600	0,03	0,017	0,000 26	0,0001 4	0,0741 72

Продолжение таблицы 11

ЛЭП	Начало	Конец	Длина L, км	$P_{расч}$ , кВт	$Q_{расч}$ , квар	$I_{р.а.}$ , А	Марка	Способ прокладки	$I_{доп}$ , А	$I_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$r$ , Ом	$x$ , Ом	$\Delta U$ , %
W31		СП6.2	0,1748	1480,2 648	850,89 9	2597,2 00457	ШМА4– 3200	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	3200	0,01	0,005	0,001 75	0,0008 7	1,1534 59
W32		СП21	0,1569	81,631 2	137,03 9	242,63 75799	АВВГ– 5×150	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	245	0,05	0,21	0,007 8	0,033	1,7852 16
W33	ТП6	СП2	0,0111	1962,1 47	1902,5 6	4157,4 10779	2×ШМА –59С	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	4000	0,01 1	0,009	0,000 06	0	0,0414 78
W34		СП12. 1	0,3464	205,24 8	154,66	390,92 62737	ШРА–5	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	400	0,32 6	0,060 2	0,113	0,0208 5328	9,1423 41
W35	ТП7	СП3	0,0562	1397,7 44	812,12 6	2459,0 06902	ШМА68 П	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	2500	0,02	0,02	0,001 12	0,0011 24	0,8600 74
W36		СП8.2	0,1799 86	676,14 85	689,71 4	1469,2 09414	ШМА73	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	1600	0,03	0,017	0,005 4	0,0030 59	1,9949 03
W37		СП12. 2	0,2644	136,83 2	103,10 7	260,61 75768	АВВГ– 5×185	В траншее и по опорной конструкции	285	0,17	0,059 6	0,045	0,0157 58	2,6922 1
W38	ТП8	СП4.1	0,0166	2232,4 519	1351,1 2	3969,3 89797	ШМА– 59С	По опорной конструкции в кабельном канале	4000	0,01 1	0,009	0,000 2	0,0001 49	0,2110 47

Продолжение таблицы 11

ЛЭП	Начало	Конец	Длина L, км	P <sub>расч</sub> , кВт	Q <sub>расч</sub> , квар	I <sub>р.а.</sub> , А	Марка	Способ прокладки	I <sub>доп.</sub> , А	r <sub>0</sub> , Ом/км	x <sub>0</sub> , Ом/км	r, Ом	x, Ом	ΔU, %
W39	ТП9	СП4.2	0,1251	2232,4 519	1351,1 2	3969,3 89797	ШМА– 59С	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	4000	0,01 1	0,009	0,001 4	0,0011 26	1,5904 79
W40	ТП1 0	СП4.3	0,2670 3	1913,5 302	1158,1	3402,3 34336	ШМА– 59С	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	4000	0,01 1	0,009	0,002 9	0,0024 03	2,9099 4
W41		СП11	0,099	228,15 1	429,80 5	740,19 7598	ШМАХ –65	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	1000	0,03 3	0,018	0,003 3	0,0017 82	0,5232 97
W42	ТП1 1	СП19	0,302	2141,2 108	1278,6 8	3793,6 62816	ШМА– 59С	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	4000	0,01 1	0,009	0,003 3	0,0027 18	3,6663 97
W43		СП1.3	0,1153	82,445	54,852 4	150,63 13423	АВВГ– 5×95	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	185	0,34	0,060 2	0,039 2	0,0069 41	1,2509 5
W44	ТП1 2	СП7.1	0,063	1946,4 498	1016,5 7	3340,3 18225	ШМА– 59С	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	4000	0,01 1	0,009	0,000 7	0,0005 67	0,6666 5
W45		СП18	0,0551 4	208,05 5	316,16 6	575,72 43557	ШРА–6	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	630	0,11	0,13	0,006	0,0071 68	1,2217 04
W46	ТП1 3	СП14	0,1767	141,38 7	212,16 6	387,83 07486	ШРА–5	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	400	0,32 6	0,060 2	0,057 6	0,0106 37	3,6015 8
W47		СП15	0,13	243,20 2	171,84	452,97 45826	ШРА–6	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	630	0,11	0,13	0,014 3	0,0169	2,2097 94

Продолжение таблицы 11

ЛЭП	Начало	Конец	Длина L, км	$P_{расч}$ , кВт	$Q_{расч}$ , квар	$I_{р.а.}$ , А	Марка	Способ прокладки	$I_{доп}$ , А	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$r$ , Ом	$x$ , Ом	$\Delta U$ , %
W48		СП16	0,167	79,321	221,73 4	358,22 07203	ШРА-5	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	400	0,32 6	0,060 2	0,054 4	0,0100 53	2,2671 64
W49		СП22	0,003	248,41 4	108,84 1	412,55 24655	ШРА-6	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	630	0,11	0,13	0,000 3	0,0003 9	0,0430 83
W51	ТП1 4	СП4.4	0,016	2183,2	1353,6	235,68 8879	АВВГ- 3×185	По опорной конструкции в кабельном канале	285	0,17	0,059 6	0,002 7	0,0009 53	2,5031 5
W52		СП3.1	0,0337 2	4278	2164,7 2	439,90 3379	ШРА-6	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	630	0,11	0,13	0,003 7	0,0043 83	8,7802 02
W53	ТП1 5	СП7.3	0,0344	4420	4508,4	579,28 63221	ШМАХ -65	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	1000	0,03 3	0,018	0,000 6	0,0003 09	1,3520 06
W54		СП6.3	0,113	800	816	104,84 82031	АВВГ- 3×150	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	245	0,05	0,21	0,005 7	0,0237 3	8,2699 72
W55		СП23. 2	0,233	1701	1054,6	183,63 1072	ШМАХ -65	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	1000	0,03 3	0,018	0,007 7	0,0041 94	6,0602 43
W47		СП15	0,13	243,20 2	171,84	452,97 45826	ШРА-6	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	630	0,11	0,13	0,014 3	0,0169	2,2097 94
W48		СП16	0,167	79,321	221,73 4	358,22 07203	ШРА-5	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	400	0,32 6	0,060 2	0,054 4	0,0100 53	2,2671 64
W49		СП22	0,003	248,41 4	108,84 1	412,55 24655	ШРА-6	По опорной конструкции	630	0,11	0,13	0,000 3	0,0003 9	0,0430 83

Продолжение таблицы 11

ЛЭП	Начало	Конец	Длина L, км	$P_{расч}$ , кВт	$Q_{расч}$ квар	$I_{р.а.}$ , А	Марка	Способ прокладки	$I_{доп}$ , А	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$r$ , Ом	$x$ , Ом	$\Delta U$ , %
W50		СП23.1	0,0442 4	156,80 3	59,162 6	254,93 29968	АВВГ– 5×185	По опорной конструкции в кабельном канале	285	0,17	0,059 6	0,007 5	0,0026 36	0,4623 54
W51	ТП1 4	СП4.4	0,016	2183,2	1353,6	235,68 8879	АВВГ– 3×185	По опорной конструкции в кабельном канале	285	0,17	0,059 6	0,002 7	0,0009 53	2,5031 5
W52		СП3.1	0,0337 2	4278	2164,7 2	439,90 3379	ШРА–6	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	630	0,11	0,13	0,003 7	0,0043 83	8,7802 02
W53	ТП1 5	СП7.3	0,0344	4420	4508,4	579,28 63221	ШМАХ –65	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	1000	0,03 3	0,018	0,000 6	0,0003 09	1,3520 06
W54		СП6.3	0,113	800	816	104,84 82031	АВВГ– 3×150	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	245	0,05	0,21	0,005 7	0,0237 3	8,2699 72
W55		СП23.2	0,233	1701	1054,6	183,63 1072	ШМАХ –65	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	1000	0,03 3	0,018	0,007 7	0,0041 94	6,0602 43
W56	ТП3	СП5	0,0138	1382,5 64	1934,2 7	3616,6 42827	ШМА– 59С	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	4000	0,01 1	0,009	0,000 1	0,0001 24	0,1558 55
W57	ТП1 3	СП7.2	0,2262	1297,6 332	677,71 6	2226,8 79004	ШМА68 П	В ЖБК лотке и по опорной конструкции	2500	0,02	0,02	0,004 5	0,0045 24	3,0943 48

### 3 Расчет и выбор силового электрооборудования главной понизительной подстанции

#### 3.1 Выбор мощности трансформатора на ГПП

Определим «мощность на третьем уровне электроснабжения на шинах ТП запитанных от ГПП» [5]:

$$P_{III} = \lambda \cdot \Sigma P_{ТП}, \quad (49)$$

$$Q_{III} = \lambda \cdot \Sigma Q_{ТП}, \quad (50)$$

где « $\lambda = 1$  корректирующий коэффициент» [5].

$$\begin{aligned} P_{III} &= 1 \cdot (2166,96 + 2141,2108 + 2154,1464 + 2220,3972 + 2154,399 \\ &+ 2167,395 + 2073,8925 + 2232,4519 + 2232,4519 + 2141,4812 \\ &+ 2223,6558 + 2205,5663 + 2166,7602) = 28281,771 \text{ кВт}, \\ Q_{III} &= 1 \cdot (1393,495 + 1278,683 + 2464,246 + 1276,349 + 1425,75 \\ &+ 2057,215 + 1604,947 + 1351,121 + 1351,121 + 1587,909 + 1333,535 \\ &+ 1371,036 + 1251,459) = 19746,86 \text{ квар}. \end{aligned}$$

«Нагрузка на IV уровне определяется следующим образом» [5]:

$$P_{IV} = P_{III} + \Delta P_{mp}, \quad (51)$$

$$Q_{IV} = Q_{III} + \Delta Q_{mp}, \quad (52)$$

где « $\Delta P_{mp}, \Delta Q_{mp}$  – активные и реактивные потери во всех цеховых трансформаторах, кВт и квар» [5].

$$P_{IV} = 28281,771 + 402,585 = 28684,356 \text{ кВт},$$

$$Q_{IV} = 19746,86 + 2590,12 = 22336,98 \text{ квар}.$$

«Полная мощность IV уровня электроснабжения» [5]:

$$S_{IV} = \sqrt{P_{IV}^2 + Q_{IV}^2}, \quad (53)$$

$$S_{IV} = \sqrt{28684,356^2 + 22336,98^2} = 36355,6454 \text{ кВА}$$

«Расчетная нагрузка на V уровне электроснабжения (шины ГПП) определяется по формулам» [5]:

$$P_V = k_o \cdot (\sum P_{IV} + \sum P_{расч.ВН}), \quad (54)$$

$$Q_V = k_o \cdot (\sum Q_{IV} + \sum Q_{расч.ВН}), \quad (55)$$

где « $k_o$  – коэффициент одновременности,  $k_o = 1$ ;

$\sum P_{расч.ВН}$ ,  $\sum Q_{расч.ВН}$  – суммарная расчетная высоковольтная нагрузка: мощность печи, высоковольтных синхронных двигателей подключенных к ГПП через РП, кВт, квар» [5].

$$P_V = 1 \cdot (28684,356 + 6461,2 + 6921 + 10172,25) = 52238,806 \text{ кВт},$$

$$Q_V = 1 \cdot (22336,98 + 3518,82 + 6379 + 4863,879) = 37098,679 \text{ кВт}.$$

«Определяем полную мощность на V уровне» [5]:

$$S_V = \sqrt{P_V^2 + Q_V^2}, \quad (56)$$

$$S_V = \sqrt{52238,806^2 + 37098,679^2} = 64071,87 \text{ кВА}.$$

«Ожидаемые потери активной и реактивной мощности в трансформаторах ГПП составят» [5]:

$$\Delta P_{гпп} \approx \frac{\Delta P\%}{100} \cdot S_v, \quad (57)$$

$$\Delta Q_{гпп} \approx \frac{\Delta Q\%}{100} \cdot S_v, \quad (58)$$

где « $\Delta P\%$ ,  $\Delta Q\%$  – среднее значение ожидаемых активных, реактивных потерь в трансформаторах 35÷220 кВ при коэффициенте загрузки 0,7 по отношению к расчетной мощности нагрузки, представленных в таблице 12» [5].

$$\Delta P_{гпп} \approx \frac{0,66}{100} \cdot 64071,87 \approx 422,874 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{гпп} \approx \frac{8,11}{100} \cdot 64071,87 \approx 5196,23 \text{ квар}.$$

Таблица 12 – Активные и реактивные потери

«Номинальное напряжение трансформатора, кВ» [5]	«Активные потери DP/Sp, % при коэффициенте загрузки» [5]					«Реактивные потери DQ/Sp, % при коэффициенте загрузки» [5]				
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
35	0,92	0,91	0,88	1,12	1,13	6,08	5,58	5,58	6,11	8,81
110	0,85	0,68	0,69	0,82	0,79	8,07	9,41	10,78	9,81	9,73
220	0,27	0,29	0,40	0,27	0,41	7,33	6,42	9,44	7,71	0,33
В среднем	0,62	0,64	0,66	0,70	0,74	6,77	7,39	8,11	8,88	9,70

«Нагрузка на VI уровне определяется следующим образом» [5]:

$$P_{VI} = P_v + \Delta P_{гпп}, \quad (59)$$

$$Q_{VI} = Q_v + \Delta Q_{гпп}, \quad (60)$$

где « $\Delta P_{гпп}$ ,  $\Delta Q_{гпп}$  – активные и реактивные потери в трансформаторе ГПП, кВт и квар» [5].

$$P_{VI} = 52238,806 + 422,874 = 52661,68, \text{ кВт},$$

$$Q_{VI} = 37098,679 + 5196,23 = 42294,91, \text{ квар.}$$

«Определяем полную мощность на VI уровне» [5]:

$$S_{VI} = \sqrt{P_{VI}^2 + Q_{VI}^2}, \quad (61)$$

$$S_{VI} = \sqrt{52661,68^2 + 42294,91^2} = 67543,407 \text{ кВА.}$$

«Проектируем установить на территории завода одну двухтрансформаторную ГПП, и предварительно можно рассчитать мощность трансформатора этой ГПП с учетом перегрузки» [5]:

$$S_{н.м.} \geq \frac{S_{VI}}{n \cdot k_3}, \quad (62)$$

$$S_{н.м.} \geq \frac{67543,407}{2 \cdot 0,7} = 48245,29 \text{ кВА.}$$

В результате расчета нагрузки по уровням электроснабжения решаем установить на заводе одну ГПП мощностью 2x63000 кВА

### **3.2 Приближенное экономически целесообразное напряжение внешнего электроснабжения**

«Согласно формуле, разработанной Илларионовым для определения напряжения внешнего электроснабжения линий, питающих газоперерабатывающие заводы (ГПП), предусматривается использование приближенного решения» [9].

«При проведении расчетов учитывается расчетная мощность, отражающая нагрузку на шинах низкого напряжения ГПП, без учета потерь мощности в трансформаторах, используемых на ГПП» [2]:

$$U_{\text{эк}} = \frac{1000}{\sqrt{500/L + 2500/P_p}}, \quad (63)$$

где « $L$  – длина линии, км;

$P_p$  – передаваемая мощность на одну цепь ЛЭП, МВт» [2].

$$U_{\text{эк}} \approx \frac{1000}{\sqrt{500/9,6 + 2500/(48245,29/2)}} = 138,43$$

«Найденное значение экономически целесообразного напряжения внешнего электроснабжения оказывается ближе к стандартному значению 220 кВ» [2].

### 3.3 Выбор трансформатора ГПП по техническим условиям

Планируется установка газоперерабатывающего завода с напряжением внешнего электроснабжения 220/10 кВ, что обеспечит необходимое энергетическое питание высоковольтных электроприводов в цехах номер 1, 4, 5, 6 и 7 завода посредством установленных на ГПП трансформаторов указанного типа.

В рамках проекта предусматривается установка двух трансформаторов с напряжением 220 кВ, чья мощность должна соответствовать или превышать значение, рассчитанное по формуле (58), для обеспечения требуемого уровня электрической нагрузки.

Для реализации проекта выбраны трансформаторы типа ТДН–63000/220/10 [24], принимаемые к установке на основании их номинальных параметров, представленных в таблице 12.

Таблица 12 – Номинальные параметры трансформаторов ТДН–63000/220/10

Тип трансформатора	$S_{н.т}$ , кВА	Номинальное напряжение, кВ		$\Delta P_x$ , кВт	$\Delta P_\kappa$ , кВт	$U_\kappa\%$	$I_x\%$
		ВН	НН				
ТДН–63000/220/10	63000	230	11	70	265	11,5	0,5

Выводы по разделу 3.

В данном разделе выполнен расчет и выбраны трансформаторы для ГПП завода. В результате расчета нагрузки по уровням электроснабжения решено установить на заводе одну ГПП мощностью 2х63000 кВА. Выбраны трансформаторы типа ТДН–63000/220/10.

## Заключение

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы была проведена модернизация системы электроснабжения завода металлоконструкций. Существующая система не справлялась с увеличившейся нагрузкой, что приводило к частым сбоям, влияющим на производственный процесс.

Это привело к решению провести комплексную модернизацию системы, что позволит эффективно справляться с увеличившимися нагрузками и обеспечить стабильное функционирование.

Модернизация направлена на повышение надежности и стабильности работы производственных мощностей, что является критически важным для успешной деятельности предприятия.

На первом этапе работы был выполнен расчёт силовой и осветительной нагрузок цехов, построены картограммы данных нагрузок на генплане предприятия и выбраны необходимые трансформаторные подстанции.

Также был произведён расчёт и выбор компенсирующих устройств, чтобы обеспечить эффективную работу системы электроснабжения.

На следующем этапе проектирования были выбраны оптимальные трансформаторы для главной понижающей подстанции, соответствующие потребностям завода.

В завершение был проведён тщательный выбор распределительных сетей с напряжением 10 и 0,4 кВ, а также линий напряжением 10 кВ до 6 кВ.

После этого были выполнены детальные расчёты нагрузок и токов короткого замыкания, что послужило основой для выбора оптимальных питающих кабелей и коммутационных аппаратов.

## Список используемых источников

1. Воздушные и кабельные линии электропередач [Электронный ресурс] : URL: <https://tmtrade.ru/anonsy-kategoriya/vozdushnye-i-kabelnye-linii-elektroperedachi> (дата обращения: 13.02.2024 г).
2. Выбор номинального напряжения линии электропередачи по эмпирическим формулам [Электронный ресурс] : Информационный портал «Online Electric» URL: <https://online-electric.ru/theory/unom.php> (дата обращения: 10.05.2024 г).
3. Выбор электрооборудования при проектировании трансформаторных подстанций среднего/низкого напряжения [Электронный ресурс] : URL: <https://library.e.abb.com/public/79283119d0fc452aaf60d933850b7422/QT2%20.pdf> (дата обращения: 13.02.2024 г)
4. Выключатель автоматический ВА77 [Электронный ресурс] : URL: <http://zao-tehnolog.ru/page697431> (дата обращения: 13.02.2024 г).
5. Ершов, А.М. Системы электроснабжения. Часть 4: Электроснабжение промышленных предприятий и городов: курс лекций / А.М. Ершов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2020. – 324 с. [Электронный ресурс] : URL: <https://energynet.susu.ru/wp-content/uploads/2021/09/%D0%95%D1%80%D1%88%D0%BE%D0%B2-%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2-2020.08.17-2.pdf> (дата обращения: 11.05.2024 г).
6. Завод металлоконструкций в Челябинске. Изготовление и производство металлоконструкций [Электронный ресурс] : Официальный сайт завода «МетТерра» URL: <https://metterra.ru/> (дата обращения: 11.01.2024 г).
7. Компенсация реактивной мощности на промышленных предприятиях [Электронный ресурс] : Информационный портал «Миркон» URL: <https://www.mircond.com/blog/kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti-na-promyshlennykh-predpriyatiyakh/> (дата обращения: 10.03.2024 г)

8. Определение годовых эксплуатационных расходов и себестоимости передачи электрической энергии [Электронный ресурс] : Информационный портал «StudFiles» URL: <https://studfile.net/preview/2892370/page:7/> (дата обращения: 22.03.2024 г).

9. Определение приведенных затрат электрической сети [Электронный ресурс] : Информационный портал «Электростанции» URL: <http://elektro-dox.ru/proekt/32.html> (дата обращения: 22.03.2024 г).

10. Определение условного центра электрических нагрузок [Электронный ресурс] : Информационный портал «Websor» URL: [https://websor.ru/oborudovanie-i-materialy/podstanciya/objie\\_polojeniya\\_pp/uslovnei\\_centra\\_pp/](https://websor.ru/oborudovanie-i-materialy/podstanciya/objie_polojeniya_pp/uslovnei_centra_pp/) (дата обращения: 24.03.2024 г).

11. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии. ПТЭЭП с изменениями 2022 г. [Электронный ресурс] : URL: <https://tech-expo.ru/articles/pravila-pteeep/> (дата обращения: 13.02.2024 г).

12. Пример расчета числа и мощности трансформаторов трансформаторных подстанций [Электронный ресурс] : Информационный портал «Online Electric» URL: [https://online-electric.ru/theory/tp\\_sample1.php](https://online-electric.ru/theory/tp_sample1.php) (дата обращения: 20.03.2024 г)

13. Пункты распределительные ПР8503-1203 [Электронный ресурс] : Информационный портал «ЕвразАвтоматика» URL: <https://evraz.pro/catalog/nku/nku-dlya-raspredeleniya-i-ucheta-elektricheskoy-energii/pr-punkty-raspredelitelnye-/pr8503-pr8703/pr8503-1203/> (дата обращения: 20.03.2024 г).

14. Распредустройство низкого напряжения типа РУНН [Электронный ресурс] : Официальный сайт «Websor Group» URL: <https://websor.ru/oborudovanie-i-materialy/elektroshhitovoe-oborudovanie/runn/> (дата обращения: 06.02.2024 г).

15. Расчет освещения помещения [Электронный ресурс] : официальный сайт Подольского завода светотехники «Терраи» URL: <https://terra-led.ru/reviews/detail/raschet-osveshcheniya-pomeshcheniya/> (дата обращения: 21.03.2024 г).

16. Расчет силового трансформатора [Электронный ресурс] : Информационный портал «В помощь радиолюбителю» URL: <https://radioconnect.narod.ru/page10.htm> (дата обращения: 11.02.2024 г)

17. Расчет токов короткого замыкания [Электронный ресурс] : URL: <https://ekfgroup.com/ru/calculators/mastertool/short-circuit> (дата обращения: 21.03.2024 г)

18. Расчет электрической мощности трансформаторной подстанции [Электронный ресурс] : Информационный портал «Studbooks.net» URL: [https://studbooks.net/1831953/matematika\\_himiya\\_fizika/raschet\\_moschnosti\\_transformatornoy\\_podstantsii](https://studbooks.net/1831953/matematika_himiya_fizika/raschet_moschnosti_transformatornoy_podstantsii) (дата обращения: 10.03.2024 г)

19. Расчет электрической нагрузки [Электронный ресурс] : Информационный портал «Школа для электрика» URL: <https://electricalschool.info/main/elsnabg/1162-raschet-jelektricheskikh-nagruzok.html> (дата обращения: 12.01.2024 г)

20. Сайт баталова Р.С., Варламов Н.И. Практические методы расчета токов короткого замыкания [Электронный ресурс] : URL: [https://lib.kgeu.ru/irbis64r\\_15/scan/10%D1%8D%D0%BB.pdf](https://lib.kgeu.ru/irbis64r_15/scan/10%D1%8D%D0%BB.pdf) (дата обращения: 13.02.2024 г).

21. Способы определения ударного коэффициента и соответственно ударного тока короткого замыкания [Электронный ресурс] : Информационный портал «OzLib.com» URL: [https://ozlib.com/855813/tehnika/sposoby\\_opredeleniya\\_udarnogo\\_koeffitsienta\\_sootvetstvenno\\_udarnogo\\_toka\\_korotkogo\\_zamykaniya](https://ozlib.com/855813/tehnika/sposoby_opredeleniya_udarnogo_koeffitsienta_sootvetstvenno_udarnogo_toka_korotkogo_zamykaniya) (дата обращения: 19.03.2024 г).

22. Сумарокова Л.П. Электроснабжение промышленных предприятий [Электронный ресурс] : URL: [https://portal.tpu.ru/SHARED/i/IOM/liter/Tab2/ENIN\\_Sumarokova%20L.P\\_.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/i/IOM/liter/Tab2/ENIN_Sumarokova%20L.P_.pdf) (дата обращения: 10.03.2024 г)

23. Технические данные магистральных шинопроводов ШМА-76, ШМА-73 [Электронный ресурс] : URL: <https://forca.ru/spravka/shiny-i-tokoprovody/tehnicheskie-dannye-magistralnyh-shinoprovodov-shma-76-shma-73-shma-68-n-shmz-1.html> (дата обращения: 11.02.2024 г).

24. Трансформатор ТДЦ-63000/110-6-10 У1 [Электронный ресурс] : Официальный сайт «Элкаб Транс» URL: <https://elkabtrans.ru/catalog/tm/tm-4000-35-6-10-u1/4> (дата обращения: 11.02.2024 г)

25. Элегазовые выключатели: плюсы и минусы эксплуатации [Электронный ресурс] : Информационный портал «Школа для электрика» URL: <https://electricalschool.info/main/visokovoltny/839-jelegazovye-vykljuchateli-pljusy-i.html> (дата обращения: 06.04.2024 г).

26. An Introduction to Electrical Safety: Substations and Switchgears [electronic resource] : URL: <https://www.cedengineering.com/userfiles/An%20Introduction%20to%20Electrical%20Safety%20-%20Substations%20and%20Switgears%20R1.pdf> (дата обращения: 22.04.2024 г).

27. DC Distribution in a Substation: Easy Learning (2024) [electronic resource] : URL: <https://nirvaana.co.in/dc-distribution-in-a-substation/#:~:text=DC%20supply%20system%20in%20a,also%20has%20boost%20charging%20function> (дата обращения: 20.04.2024 г).

28. On issue of reconstruction at central distribution substation by example of one of plants of Chelyabinsk region [electronic resource] : URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/3/032013/pdf> (дата обращения: 07.04.2024 г).

29. Overcurrent Protection of Transformer (NEC 450.3) [electronic resource] :  
URL: <https://electrical-engineering-portal.com/overcurrent-protection-transformer-pec-450-3> (дата обращения: 19.04.2024 г).

30. The Purpose of Transformer Gas Relay [electronic resource] : URL:  
<https://electrical-engineering-portal.com/purpose-of-transformer-gas-relay> (дата обращения: 09.04.2024 г).