

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 завода цветных металлов

Обучающийся

М.О. Дружков

(И. О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.п.н., доцент, М.Н. Третьякова

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

Тольятти 2025

## Аннотация

Актуальность проекта обусловлена высокой степенью электрификации современных производств. Практически все технологические процессы на промышленных предприятиях осуществляются с использованием разнообразного электрооборудования.

В работе проведен анализ характеристик объекта электроснабжения, расчет силовой и осветительной нагрузки, определение оптимального распределения нагрузок и построение картограммы, выбор компенсирующих устройств для снижения потерь электроэнергии, выбор цеховых трансформаторных подстанций (ТП) и силовых трансформаторов, расчет параметров распределительной сети и выбор кабельной продукции, расчет токов короткого замыкания, выбор основного электрооборудования для главной понизительной подстанции (ГПП). Разработаны мероприятия по охране труда и технике безопасности при эксплуатации электрооборудования. Проведено экономическое обоснование проекта, оценка затрат и потенциальной экономии.

Данная ВКР содержит пояснительную записку объемом 73 страницы, дополняемой 22 таблицами, 9 рисунками, а также 6 чертежами формата А1.

## Содержание

Введение.....	5
1 Анализ объекта проектирования .....	7
1.1 Энергообеспечение и электрические нагрузки предприятия.....	7
1.2 Особенности электроснабжения и оборудования прокатного цеха ....	9
2 Расчет электрических нагрузок .....	12
2.1 Определение расчетных нагрузок предприятия .....	12
2.2 Расчет электрических нагрузок прокатного цеха.....	14
2.3 Расчет осветительной нагрузки .....	17
2.4 Расчет суммарных электрических нагрузок завода.....	20
3 Выбор силовых трансформаторов с учетом компенсации реактивной мощности.....	22
3.1 Выбор количества и мощности цеховых силовых трансформаторов	22
3.2 Определение нагрузки завода с учетом потерь .....	28
3.3 Определение количества и мощности трансформаторов ГПП .....	32
3.4 Компенсация реактивной мощности и выбор КУ .....	33
4 Разработка внешнего электроснабжения завода.....	38
4.1 Выбор схемы электроснабжения электрической сети .....	38
5. Разработка внутреннего электроснабжения цеха и завода.....	43
5.1 Конструктивное выполнение питающей и распределительной сети	43
5.2 Выбор воздушных линий 110 кВ.....	45
5.3 Выбор марки и сечения кабельных линий 10 кВ.....	47
5.4 Выбор сечения кабельных линий 0,4 кВ прокатного цеха .....	50
6 Расчёт токов короткого замыкания и выбор электрооборудования .....	52
6.1 Расчёт токов короткого замыкания .....	52
6.2 Выбор аппаратуры на подстанции напряжением 110/10 кВ .....	60
6.3 Выбор оборудования ГПП 10кВ на отходящие линии .....	62
7 Релейная защита системы электроснабжения прокатного цеха.....	65
7.1 Выбор аппаратов защиты электроустановок 0,4 кВ.....	65

Заключение .....	67
Список используемой литературы .....	71

## Введение

Эффективность функционирования электроэнергетической отрасли является краеугольным камнем для развития любой современной экономики. В этом контексте особое значение приобретает надежность и функциональность систем электроснабжения (СЭС). На них возлагается ответственность за стимулирование промышленного роста путем внедрения передовых технологий и повышения общей эффективности производства. Не менее важной задачей является минимизация потерь электроэнергии на всех этапах ее транспортировки, от генерации до конечного потребителя, что напрямую влияет на рациональное использование ресурсов и экономическую целесообразность.

Однако существующие вызовы, такие как физический износ основных фондов в энергетике, ограниченные темпы ввода новых генерирующих мощностей и недостаточная пропускная способность электрических сетей, остро ставят вопрос о необходимости глубокой модернизации всей отрасли. Ожидается, что результаты предпринимаемых в этом направлении шагов станут ощутимы в перспективе ближайших десятилетий.

Актуальность данной работы подчеркивается высокой степенью электрификации современных производственных комплексов, где практически все технологические операции осуществляются с применением разнообразного электрооборудования. Успешное и бесперебойное функционирование завода цветных металлов напрямую зависит от обеспечения надежного и качественного электроснабжения всех его сегментов: от основных производственных участков до вспомогательных помещений, административных зданий и прочих объектов инфраструктуры. Результаты проведенного исследования могут найти практическое применение не только при проектировании систем электроснабжения для вновь создаваемых промышленных объектов аналогичного профиля, но и при модернизации уже существующих систем на действующих предприятиях.

Объектом исследования выступает завод цветных металлов как комплексный потребитель электроэнергии. Предметом исследования является непосредственно система электроснабжения этого предприятия. Основная цель исследования заключается в разработке такого проекта СЭС, который обеспечит бесперебойное снабжение электроэнергией всех потребителей и гарантирует безопасную эксплуатацию всего комплекса электрооборудования.

Для достижения поставленной цели был сформулирован ряд последовательных задач. Первоначально необходимо провести всесторонний анализ объекта проектирования, за которым последует точный расчет электрических нагрузок. Следующим шагом является выбор силовых трансформаторов, осуществляемый с обязательным учетом необходимости компенсации реактивной мощности. Далее проектная работа охватывает разработку схем внешнего электроснабжения всего завода и детализированное проектирование систем внутреннего электроснабжения как для отдельных цехов, так и для предприятия в целом. Важными этапами также являются расчет токов короткого замыкания, необходимый для корректного выбора защитного и коммутационного электрооборудования, и разработка системы релейной защиты, призванной обеспечить селективность и быстродействие при возникновении аварийных режимов в цеховой системе электроснабжения.

Ожидается, что комплексное решение перечисленных задач позволит создать высокоэффективную систему электроснабжения для завода цветных металлов и существенно минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций. В ходе выполнения исследования применялся комплекс научных методов, включая аналитический подход к изучению проблемы, методы анализа и синтеза доступной информации, а также детальное изучение релевантной проектной и нормативной документации.

## **1 Анализ объекта проектирования**

### **1.1 Энергообеспечение и электрические нагрузки предприятия**

Энергоснабжение завода цветных металлов может быть организовано по различным схемам, включая радиальную, магистральную или их комбинацию. Выбор конкретной схемы определяется комплексом факторов: пространственным размещением потребителей электроэнергии, их установленной мощностью, требованиями к надежности электропитания и другими специфическими характеристиками предприятия. Прокладка силовых кабелей может осуществляться как открыто, с использованием строительных конструкций, например эстакад, так и подземным способом. Решение о методе прокладки принимается с учетом особенностей окружающей застройки, взаимного расположения цехов и строгих требований к безопасности эксплуатации электроустановок.

Внешнее электропитание предприятия осуществляется от подстанции энергетической системы, работающей на напряжениях 110/35/10 кВ, с общей установленной мощностью трансформаторов 600 МВ·А. Индуктивное сопротивление системы электроснабжения нормируется и составляет 0,9 условных единиц для одного класса напряжения и 0,6 условных единиц для другого. Удаленность завода от точки подключения к энергосистеме составляет 6,5 км. Производственный процесс на предприятии организован в три смены, при этом годовое число часов использования максимальной реактивной мощности ( $T_{\text{мр}}$ ) составляет 3800 часов, а максимальной активной мощности ( $T_{\text{ма}}$ ) – 3600 часов. Важным параметром является коэффициент мощности, где значение  $\text{tg}\phi$  на шинах низкого (НН) и высокого (ВН) напряжения не должно превышать 0,42. Расчеты за потребленную электроэнергию производятся по стандартному двухставочному тарифу, составляющему 3,6 рубля за кВт. [1]

Общее представление о расположении объектов на территории завода дает генеральный план, представленный на Рисунке 1. Детальная информация об электрических нагрузках по каждому подразделению предприятия сведена в Таблицу 1.

Рисунок 1 демонстрирует общий план генерального плана завода. Таблица 1 содержит информацию об электрических нагрузках на заводе.

Таблица 1 – Ведомость электрических нагрузок завода

№ на плане	Наименование цеха	$P_n$ , кВт	$k_c$	$\cos\phi$
1	Цех электролиза цветных металлов	1400	0,70	0,80
2	Цех плавки и литья цветных металлов	800	0,65	0,78
3	Механический цех	680	0,56	0,82
4	Цех подготовки шихты	850	0,60	0,80
5	Цех электрохимической обработки	600	0,70	0,78
6	Ремонтно-механический цех	420	0,55	0,84
7	Цех волочения и проката	540	0,72	0,85
8	Насосная станция	450	0,65	0,84
9	Котельная	600	0,65	0,84
10	Цех контроля качества и испытаний	720	0,70	0,85
11	Литейный цех	800	0,55	0,75
12	Инструментальный цех	450	0,80	0,80
13	Прессовый цех	760	0,68	0,84
14	Цех вторичной переработки	380	0,60	0,84
15	Административный корпус и столовая	320	0,70	0,90
16	Склад готовой продукции	80	0,65	0,85
17	Склад кислот и щелочей	60	0,55	0,85
18	Проходная	20	0,70	0,88
19	Прокатный цех	-	-	-
-	Освещение цехов, фабрики	определить	-	-

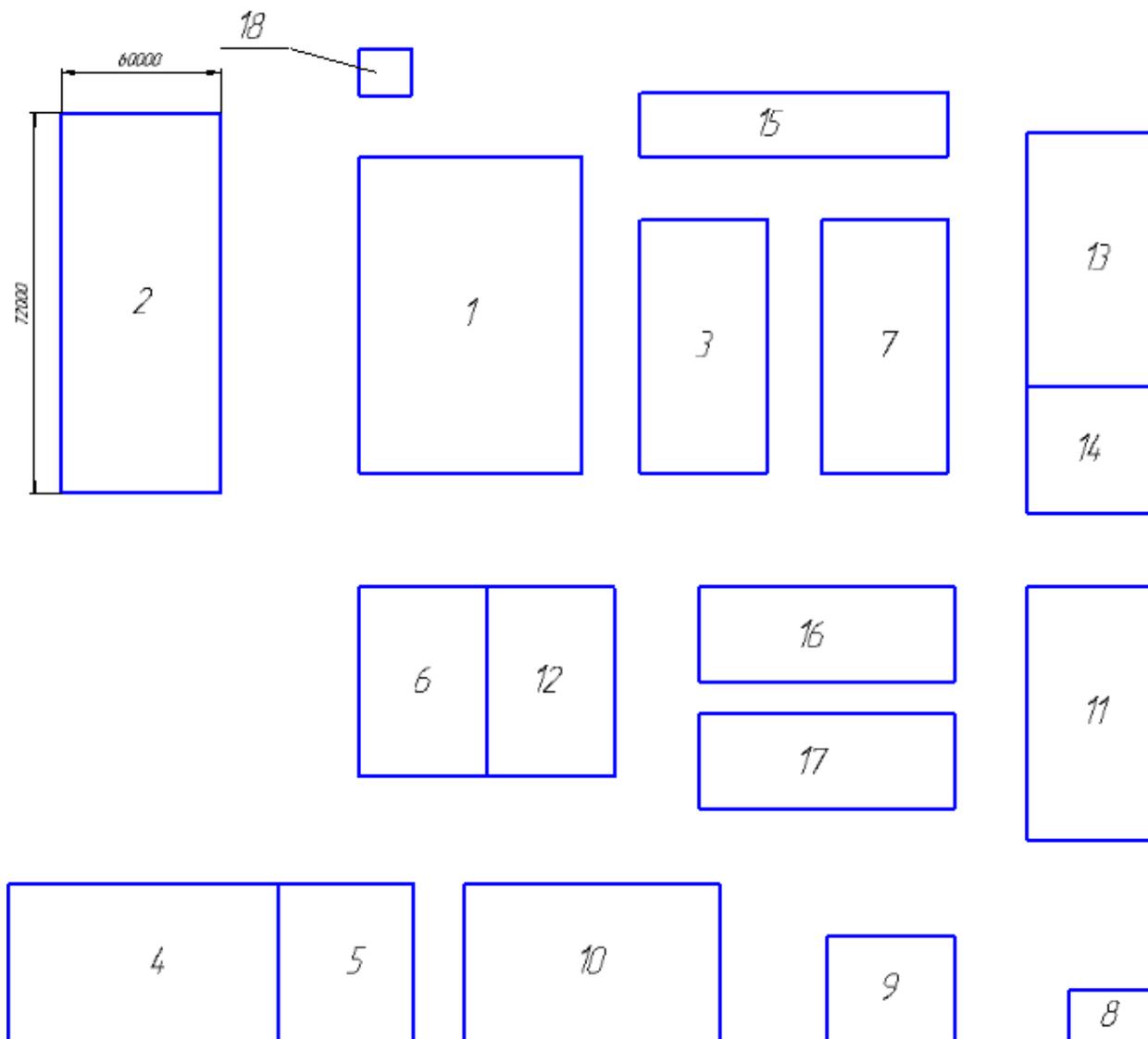


Рисунок 1 – План генеральный предприятия (М 1:500)

Таким образом, дана общая характеристика предприятия, определен состав цехов и мощности, а также представлен генеральный план предприятия.

## 1.2 Особенности электроснабжения и оборудования прокатного цеха

Прокатный цех, являющийся одним из ключевых потребителей электроэнергии на заводе, обеспечивается питанием от собственной цеховой трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ, расположенной непосредственно в его пределах. Конструктивно здание цеха представляет собой сооружение с

тяжелым металлическим каркасом, где пролеты между колоннами составляют 6 метров. Габаритные размеры цеха: длина – 72 м, ширина – 30 м, высота – 8 м. Ограждающие конструкции, включая стены и перекрытия, выполнены из сборного железобетона, а дверные и оконные блоки – из металла. На всех производственных участках цеха размещено металлообрабатывающее оборудование различной мощности. Потребители электроэнергии в данном цехе классифицируются по второй и третьей категориям надежности электроснабжения.

Внутренние электрические сети прокатного цеха функционируют на напряжении 0,4 кВ переменного тока с частотой 50 Гц и используют систему заземления типа TN-C-S с глухозаземленной нейтралью. Прокладка кабельных линий марки ВВГнг осуществляется по стенам с использованием различных монтажных конструкций, таких как стойки, полки и лотки, либо посредством шинопроводов. Система освещения всех помещений цеха рассчитана на напряжение 220 В. Осветительные сети выполнены трехпроводными, с применением силового кабеля ВВГнг-LS, характеризующегося медными жилами, изоляцией и оболочкой из ПВХ с пониженными показателями пожарной опасности, а также низким дымо- и газовыделением при горении. [2]

Завершающим этапом производственного цикла в цехе являются сборочные операции, качество которых оказывает существенное влияние на работоспособность и долговечность выпускаемых установок. Сборка готовых изделий из отдельных деталей и узлов требует высокой точности и аккуратности, поскольку даже при безупречном изготовлении компонентов некачественная сборка может привести к неудовлетворительным эксплуатационным характеристикам конечного продукта. Вспомогательные помещения цеха, имеющие высоту 4 метра на каждом из двух этажей, используются для различных нужд. Перечень основного технологического оборудования, установленного в прокатном цехе, приведен в Таблице 2.

Таблица 2 – Ведомость электроприемников механического цеха

№ по плану	Наименование оборудования	Токоприемники, кВт	$n$	$P_n$ , кВт	$k_c$	$\cos\varphi$	$tg\phi$
1	Сборочный стенд	0,4	4	25	0,65	0,84	0,64
2	Паяльная установка	0,22	8	0,8	0,6	0,85	0,61
3	Шлифовальные машины	0,4	4	8,2	0,55	0,86	0,59
4	Установки и стенды для испытания оборудования	0,4	6	32	0,45	0,88	0,53
5	Механизированные сборочные установки	0,4	4	38	0,75	0,86	0,59
6	Подвесной конвейер	0,4	2	12,2	0,8	0,84	0,64
7	Конвейер сборочный	0,4	2	28	0,8	0,85	0,61
8	Пресс гидравлический	0,4	2	8,8	0,4	0,82	0,69
9	Токарные станки	0,4	4	4,5	0,4	0,84	0,64
10	Сварочное оборудование	0,4	8	10,5	0,55	0,8	0,75
11	Вентиляторы	0,4	6	6	0,7	0,82	0,69
12	Компрессор	0,4	2	32	0,6	0,82	0,69

Нагрузки в механическом цехе будут рассчитаны по методу коэффициента использования электроприемников, поскольку для данного цеха дан подробный перечень электроприемников с их мощностями.

Выводы:

Информация о параметрах электропотребления ( $P_n$ ,  $k_c$ ,  $\cos\varphi$ ) позволяет провести расчет общей нагрузки предприятия и выбрать оптимальную схему электроснабжения (радиальную, магистральную или смешанную). Собранные данные позволяют перейти к этапу расчета электрических нагрузок и проектирования системы электроснабжения с учетом специфики каждого цеха.

## 2 Расчет электрических нагрузок

### 2.1 Определение расчетных нагрузок предприятия

В рамках настоящей работы рассматривается спектр методик выполнения расчетов, опирающихся на использование статистико-вероятностных закономерностей. К числу таких подходов относятся, например, метод упорядоченных диаграмм, позволяющий визуализировать и анализировать распределение нагрузок, методика, основанная на коэффициенте спроса, а также расчеты, использующие удельные показатели потребления энергии. Помимо этого, применяется и комплексный подход, интегрирующий различные аспекты для получения наиболее точных результатов.

Для целей настоящего исследования, при определении расчетных нагрузок электроприемников, был выбран метод, использующий коэффициент спроса. Значения данного коэффициента, дифференцированные для различных категорий электроприемников и отраслей промышленности, аккумулируются на основе практического опыта эксплуатации оборудования. Эти данные, представленные в справочной литературе, служат основой для проектных расчетов. В контексте данного исследования, конкретные значения коэффициента спроса, принятые для каждого цеха предприятия, сведены в таблицу 3.

Применительно к группе электроприемников, характеризующихся однородным режимом работы, расчетная нагрузка определяется посредством применения специализированных формул, которые будут рассмотрены далее.

«Расчетная активная нагрузка:

$$P_p = K_c \cdot P_{\text{НОМ}}, \text{ кВт} \quad (1)$$

где  $K_c$  – коэффициент спроса, принимаемый по таблице 1;

$P_{\text{НОМ}}$  – номинальная мощность цеха, кВт.

Расчетная реактивная нагрузка:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \phi, \text{ квар} \quad (2)$$

где  $\operatorname{tg} \phi$  – коэффициент реактивной мощности (соответствует характерному для данной группы приемника  $\cos \phi$ , определяемому по справочным материалам)

Расчетная полная нагрузка:» [4]

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

Определим расчетную нагрузку методом коэффициента спроса на примере сборочного цеха.

$$P_p = 800 \cdot 0,6 = 480 \text{ кВт}$$

$$Q_p = 480 \cdot 0,75 = 360 \text{ кВАр}$$

$$S_p = \sqrt{480^2 + 360^2} = 600 \text{ кВА}$$

Аналогично рассчитываем нагрузку для остальных цехов. Результаты расчета заносим в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет электрических нагрузок цехов

№ на плане	Наименование цеха	$P_n$ , кВт	кс	$\cos \phi$	$\operatorname{tg} \phi$	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , кВАр	$S_p$ , кВА
Исходные данные						Расчетные данные		
1	Цех электролиза цветных металлов	1400	0,55	0,76	0,85	770,00	654,50	1010,58
2	Цех плавки и литья цветных металлов	800	0,6	0,8	0,75	480,00	360,00	600,00
3	Механический цех	680	0,56	0,82	0,69	380,80	262,75	462,65
4	Цех подготовки шихты	850	0,6	0,8	0,75	510,00	382,50	637,50

Продолжение таблицы 3

№на плане	Наименование цеха	$P_n$ , кВт	$\kappa c$	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , кВАр	$S_p$ , кВА
Исходные данные						Расчетные данные		
5	Цех электрохимической обработки	600	0,7	0,78	0,8	420,00	336,00	537,86
6	Ремонтно-механический цех	420	0,55	0,84	0,64	231,00	147,84	274,26
7	Цех волочения и проката	540	0,72	0,85	0,61	388,80	237,17	455,43
8	Насосная	450	0,65	0,84	0,64	292,50	187,20	347,28
9	Котельная	600	0,65	0,84	0,64	390,00	249,60	463,03
10	Цех контроля качества и испытаний	720	0,7	0,85	0,61	504,00	307,44	590,37
11	Литейный цех	800	0,55	0,75	0,88	440,00	387,20	586,11
12	Инструментальный цех	450	0,8	0,8	0,75	360,00	270,00	450
13	Прессовый цех	760	0,68	0,84	0,64	516,80	330,75	613,58
14	Цех вторичной переработки	380	0,6	0,84	0,64	228,00	145,92	270,70
15	Административный корпус и столовая	320	0,7	0,9	0,48	224,00	107,52	248,47
16	Склад готовой продукции	80	0,65	0,85	0,61	52,00	31,72	60,91
17	Склад кислот	60	0,55	0,85	0,61	33,00	20,13	38,66
18	Проходная	20	0,7	0,88	0,59	14,00	8,26	16,26
Итого		-	-	-	-	6234,9	4426,5	7663,6 3

Таким образом, активная мощность цехов завода составила 6234,9 кВт, реактивная 4426,5 квар, полная мощность равна 7663,63 кВА. Эти данные будут использованы в дальнейших расчетах.

## 2.2 Расчет электрических нагрузок прокатного цеха

«Номинальная активная мощность потребителей:

$$P_n = n \cdot P_{\Pi} \quad (4)$$

где  $n$  - количество потребителей

$P_n$  - паспортная мощность потребителя

Расчетная активная мощность потребителей:

$$P_p = P_n \cdot K_{И} \quad (5)$$

где  $K_{И}$  - коэффициент использования.

Расчетная реактивная мощность:

$$Q_p = P_{cp} \cdot \operatorname{tg}\varphi \quad (6)$$

Расчетная полная мощность:» [4]

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (7)$$

Определим расчетную нагрузку методом коэффициента спроса электрооборудования, расположенного в прокатном цехе на примере:

- Группа сборочные станды:

$$P_n = 4 \cdot 25 = 100 \text{ (кВт)}$$

$$P_p = 100 \cdot 0,65 = 65 \text{ (кВт)}$$

$$Q_p = 65 \cdot 0,64 = 41,6 \text{ (кВАр)}$$

$$S_p = \sqrt{65^2 + 41,6^2} = 77,1 \text{ (кВА)}$$

- Группа шлифовальные машины:

$$P_n = 4 \cdot 8,2 = 32,8 \text{ (кВт)}$$

$$P_p = 32,8 \cdot 0,55 = 18,04 \text{ (кВт)}$$

$$Q_p = 18,04 \cdot 0,59 = 10,64 \text{ (кВАр)}$$

$$S_p = \sqrt{18,04^2 + 10,64^2} = 20,95 \text{ (кВА)}$$

- Группа конвейер сборочный:

$$P_H = 2 \cdot 28 = 56 \text{ (кВт)}$$

$$P_p = 56 \cdot 0,8 = 44,8 \text{ (кВт)}$$

$$Q_p = 44,8 \cdot 0,61 = 27,33 \text{ (кВАр)}$$

$$S_p = \sqrt{44,8^2 + 27,33^2} = 52,48 \text{ (кВА)}$$

Аналогично рассчитываем нагрузку по другим группам электроприемников. Результаты расчета заносим в табл. 4.

Таблица 4 – Расчет нагрузок на стороне 0,4 кВ прокатного цеха

№ на плане	Наименование групп электроприёмников	<i>n</i>	$P_H$ , кВт	<i>кс</i>	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , кВАр	$S_p$ , кВА
1	Сборочный стенд	4	25	0,65	0,84	0,64	65	41,6	77,17
2	Паяльная установка	8	0,8	0,6	0,85	0,61	3,84	2,34	4,50
3	Шлифовальные машины	4	8,2	0,55	0,86	0,59	18,04	10,64	20,95
4	Установки и стенды для испытания оборудования	6	32	0,45	0,88	0,53	86,4	45,79	97,78
5	Механизированные сборочные установки	4	38	0,75	0,86	0,59	114	67,26	132,36
6	Подвесной конвейер	2	12,2	0,8	0,84	0,64	19,52	12,49	23,18
7	Конвейер сборочный	2	28	0,8	0,85	0,61	44,8	27,33	52,48
8	Пресс гидравлический	2	8,8	0,4	0,82	0,69	7,04	4,86	8,55
9	Токарные станки	4	4,5	0,4	0,84	0,64	7,2	4,61	8,55
10	Сварочное оборудование	8	10,5	0,55	0,8	0,75	46,2	34,65	57,75
11	Вентиляторы	6	6	0,7	0,82	0,69	25,2	17,39	30,62
12	Компрессор	2	32	0,6	0,82	0,69	38,4	26,50	46,65
Итого							475,64	295,46	560,54

Таким образом, активная мощность прокатного цеха составила 475,64 кВт, реактивная 295,46 квар, полная мощность равна 560,54 кВА. Эти данные будут использованы в дальнейших расчетах.

### 2.3 Расчет осветительной нагрузки

В качестве источников электрического света на промышленном предприятии используются светодиодные светильники. Подробный выбор светильников указан в пункте расчет освещения сборочного цеха.  $\cos\varphi$  светильников равен 0,9,  $\operatorname{tg}\varphi = 0,48$ .

Осветительная нагрузка цеха определяется по методу коэффициента спроса и удельным нормам мощности на единицу производственной площади [23]. Расчет ведется по выражениям:

$$P_{p.o} = K_{co} \cdot p_o \cdot F; \quad (8)$$

$$Q_{po.} = P_{po.} \cdot \operatorname{tg}\phi_o. \quad (9)$$

где « $K_{co}$  – коэффициентт спроса по активной мощности осветительной нагрузки. Значения коэффициента спроса» принимается согласно [25];

« $\operatorname{tg}\phi_o$  – коэффициент реактивной мощности, определяется по  $\cos\varphi$ ;

$P_{p.o}$  – установленная мощность приемников освещения по цеху, определяется по удельной осветительной нагрузке на  $1\text{ м}^2$  поверхности пола известной производственной площади;

$F$  – площадь производственного помещения, которая определяется по генеральному плану завода,  $\text{ м}^2$ ;

$p_o$  – удельная расчётная мощность,  $\text{ кВт}/\text{ м}^2$ . Значения удельной мощности электрического освещения принимаются согласно» [25].

Определяем площади всех помещений, изображенных на генеральном плане рисунка 1. Удельную нагрузку  $p_{уд.о.н.}$  и значение коэффициента  $K_{с.о.н.}$  осветительной нагрузки находят по справочному материалу [25].

Пример расчета проведем для цеха ремонта и сборки оборудования. Площадь данного цеха  $2160 \text{ м}^2$ , Коэффициент спроса по активной мощности осветительной нагрузки  $K_{сo}=0,85$ . Значение удельной мощности электрического освещения  $p_{o.}=16 \text{ кВт/м}^2$ .

$$P_{p.o.n} = 16 \cdot 0,85 \cdot 2160 = 20,2 \text{ кВт}$$

$$Q_{p.o.n} = 20,2 \cdot 0,48 = 9,69 \text{ кВар}$$

$$S_{p.o.n} = \sqrt{20,2^2 + 9,69^2} = 22,4 \text{ кВА}$$

Аналогично рассчитываем нагрузку для остальных цехов. Результаты расчета заносим в табл. 5.

Таблица 5 – Расчет осветительной нагрузки

№ на плане	Наименование цеха	$K_{с.о.н}$	$\rho$ Вт/м <sup>2</sup>	$F$ , м <sup>2</sup>	$tg\varphi$	$P_{p.o.n}$ , кВт	$Q_{p.o.n}$ , кВар	$S_{p.o.n}$ , кВА
1	Центральная Ремонтно-Механическая Мастерская	0,85	16	2520	0,48	34,27	16,45	38,02
2	Цех ремонта и сборки оборудования	0,85	11	2160	0,48	20,20	9,69	22,40
3	Механический цех	0,85	11	1152	0,48	10,77	5,17	11,95
4	Цех ремонта и обслуживания спецтехники	0,85	14	1440	0,48	17,14	8,23	19,01
5	Цех подготовки технологических жидкостей	0,85	14	720	0,48	8,57	4,11	9,50
6	Ремонтно-механический участок	0,85	11	864	0,48	8,08	3,88	8,96
7	Цех КИПиА и электрооборудования	0,85	14	1152	0,48	13,71	6,58	15,21
8	Насосная станция	0,85	8	160	0,48	1,09	0,52	1,21
9	Котельная	0,85	8	480	0,48	3,26	1,57	3,62
10	Цех испытаний и опрессовки оборудования	0,85	16	1440	0,48	19,58	9,40	21,72
11	Сварочно-заготовительный цех	0,85	10	1152	0,48	9,79	4,70	10,86

Продолжение таблицы 5

№ на плане	Наименование цеха	$K_{с.о.н}$	$\rho$ Вт/м <sup>2</sup>	$F$ , м <sup>2</sup>	$tg\varphi$	$P_{р.о.н}$ , кВт	$Q_{р.о.н}$ , кВАр	$S_{р.о.н}$ , кВА
12	Инструментальный цех	0,85	11	864	0,48	8,08	3,88	8,96
13	Трубный цех	0,85	12	1152	0,48	11,75	5,64	13,03
14	Участок ремонта запорной арматуры и ПВО	0,85	12	576	0,48	5,88	2,82	6,52
15	Административно-бытовой корпус (АБК) и столовая	0,8	15	696	0,48	8,35	4,01	9,26
16	Склад материалов и запасных частей	0,6	6	864	0,48	3,11	1,49	3,45
17	Склад химреагентов	0,6	6	864	0,48	3,11	1,49	3,45
18	Проходная / Контрольно-пропускной пункт (КПП)	0,7	6	60	0,48	0,25	0,12	0,28
Всего						186,9 9	89,75	207,4 1

Нагрузка освещения территории определяется:

$$P_{р.о.н.} = K_{с.о.н} \cdot P_{уд.о.н} \cdot F_{тер} \quad (10)$$

$$Q_{р.о.н.} = P_{р.о.н.} \cdot tg\varphi_{о.н} \quad (11)$$

$$S_{расч.о.} = \sqrt{P_{р.о.н.}^2 + Q_{р.о.н.}^2} \quad (12)$$

где « $K_{с.о.н}$  – коэффициент спроса по активной мощности наружного освещения. Значения коэффициента спроса принимается согласно» [25];

« $tg\varphi_{о.н}$  – коэффициент реактивной мощности, определяется по  $cos\varphi$ ;

$F_{тер}$  – площадь производственного помещения, которая определяется по генеральному плану, м<sup>2</sup>;

$P_{уд.о.н}$  – удельная расчётная мощность для освещения территории, кВт/м<sup>2</sup>. Значения удельной мощности электрического освещения принимаются согласно» [25].

На территории завода установлены уличные светодиодные светильники мощностью 100 Вт для освещения дорог, улиц, парков и дворовых территорий. Площадь территории составляет 42900 м<sup>2</sup>. Коэффициент спроса осветительной нагрузки  $K_{со.н}=1$ ,  $P_{уд.о.н}=0,12$  Вт/м<sup>2</sup>.

$$P_{р.о.н.} = 0,12 \cdot 1 \cdot 42900 = 5,15 \text{ кВт}$$

$$Q_{р.о.н.} = P_{р.о.н.} \cdot \text{tg} \varphi_{о.н} = 5,15 \cdot 0,48 = 2,47 \text{ квар}$$

$$S_{расч.о.} = \sqrt{P_{р.о.н.}^2 + Q_{р.о.н.}^2} = \sqrt{5,15^2 + 2,47^2} = 5,71 \text{ кВА}$$

Чтобы обеспечить уличное освещение, был применен самонесущий изолированный провод типа СИП 4. Для подачи питания на уличное освещение использовалась ячейка 0,4 кВ от КТП 10/0,4 кВ.

## 2.4 Расчет суммарных электрических нагрузок завода

Для определения полной нагрузки цеха необходимо сложить силовую нагрузку и осветительную нагрузку согласно соответствующим формулам.

$$\sum P_p = P_{p.c} + P_{p.o} \quad (13)$$

$$\sum Q_p = Q_{p.c} + Q_{p.o} \quad (14)$$

$$\sum S_p = \sqrt{\sum P_p^2 + \sum Q_p^2} \quad (15)$$

Проведем пример расчета суммарной нагрузки для цеха плавки и литья цветных металлов: [14], [16]

$$\sum P_p = 480 + 20,2 = 500,2 \text{ кВт}$$

$$\sum Q_p = 360 + 9,69 = 369,69 \text{ кВАР}$$

$$\sum S_p = \sqrt{500,2^2 + 369,69^2} = 621,99 \text{ кВА}$$

В расчётах суммарных мощностей цехов проектируемого завода отражены в таблице 6 все вычисления нагрузок.

Таблица 6 – Суммарная нагрузка

№ на плане	Наименование цеха	$\Sigma P_p$ , кВт	$\Sigma Q_p$ , кВАр	$\Sigma S_p$ , кВА
1	Цех электролиза цветных металлов	804,27	670,95	1047,39
2	Цех плавки и литья цветных металлов	500,2	369,69	621,99
3	Механический цех	391,57	267,92	474,46
4	Цех подготовки шихты	527,14	390,73	656,16
5	Цех электрохимической обработки	428,57	340,11	547,13
6	Ремонтно-механический цех	239,08	151,72	283,16
7	Цех волочения и проката	402,51	243,75	470,56
8	Насосная	293,59	187,72	348,47
9	Котельная	393,26	251,17	466,63
10	Цех контроля качества и испытаний	523,58	316,84	611,98
11	Литейный цех	449,79	391,9	596,57
12	Инструментальный цех	368,08	273,88	458,80
13	Прессовый цех	528,55	336,39	626,52
14	Цех вторичной переработки	233,88	148,74	277,17
15	Административный корпус и столовая	232,35	111,53	257,73
16	Склад готовой продукции	55,11	33,21	64,34
17	Склад кислот	36,11	21,62	42,09
18	Проходная	14,25	8,38	16,53
19	Прокатный цех	475,64	295,46	560,54
-	Освещение территории	42,9	20,59	47,58
-	Итого на стороне 10 кВ	6464,79	4536,84	7915,26

Таким образом, был произведен расчет суммарных электрических нагрузок завода.

Выводы:

По итогам расчетов активная мощность предприятия составила 6464,79 кВт, реактивная 4536,84 квар, полная мощность равна 7915,26 кВА. Эти данные будут использованы в дальнейших расчетах.

### **3 Выбор силовых трансформаторов с учетом компенсации реактивной мощности**

#### **3.1 Выбор количества и мощности цеховых силовых трансформаторов**

«Ориентировочный выбор числа и мощности цеховых трансформаторов производят по удельной плотности  $\sigma_n$  нагрузки:

$$\sigma_n = \frac{S_p}{F}, \quad (16)$$

где  $S_p$  – расчетная нагрузка цеха (корпуса, отделения); кВА;  
 $F$  – площадь цеха (корпуса, отделения), м<sup>2</sup>.» [17]

Ключевым аспектом при проектировании системы электроснабжения является корректный подбор номинальной мощности силовых трансформаторов. Этот выбор во многом определяется показателем плотности электрической нагрузки ( $\sigma_n$ ) на обслуживаемой территории. Существуют общие рекомендации, связывающие данный параметр с предпочтительной мощностью устанавливаемых трансформаторов.

Так, при значениях  $\sigma_n$ , не превышающих 0,2 кВА/м<sup>2</sup>, оправдано применение трансформаторного оборудования мощностью до 1000 кВА или 1600 кВА. В диапазоне плотности нагрузки от 0,2 до 0,5 кВА/м<sup>2</sup> наиболее часто останавливают выбор на трансформаторах, номинальная мощность которых составляет 1600 кВА. Для ситуаций, где плотность нагрузки превосходит отметку в 0,5 кВА/м<sup>2</sup>, решение об установке трансформаторов мощностью 1600 кВА или более мощных, например, 2500 кВА, требует тщательного технико-экономического обоснования.

Помимо плотности нагрузки, фундаментальным критерием при определении номинальной мощности трансформаторов служит анализ расчетных мощностей, необходимых для обеспечения потребителей как в

нормальном, так и в аварийном режимах функционирования системы. При этом преследуется цель обеспечения их рациональной загрузки в штатных условиях эксплуатации и поддержания минимально необходимого уровня резервирования на случай возникновения послеаварийных ситуаций. Таким образом, итоговая номинальная мощность каждого трансформатора ( $S_{ном.т}$ ) устанавливается, исходя из расчетной полной мощности того цеха или участка, который он будет обслуживать. [18]

$$S_{тр} = \frac{S_p}{K_3 \cdot n_{тр}}, \quad (17)$$

где  $n_{тр}$  —, число трансформаторов;

$K_3$  — коэффициент загрузки трансформатора.

При эксплуатации силовых трансформаторов критически важно поддерживать их коэффициенты загрузки  $K_3$  в оптимальных диапазонах, которые напрямую зависят от категории надежности обслуживаемых потребителей и конфигурации трансформаторной подстанции (ТП). Существуют четкие рекомендации по этому поводу.

Так, для двухтрансформаторных подстанций, преимущественно питающих нагрузки первой категории надежности, рекомендуемый коэффициент загрузки каждого трансформатора должен находиться в интервале от 0,65 до 0,7 относительных единиц. Если же речь идет об однострансформаторных подстанциях, обслуживающих в основном потребителей второй категории, и при этом предусмотрено взаимное резервирование трансформаторов по стороне вторичного напряжения, то целесообразно поддерживать  $K_3$  на уровне 0,7–0,8 относительных единиц. В свою очередь, для однострансформаторных подстанций, где преобладают нагрузки второй категории, но резервирование осуществляется за счет централизованного (складского) запаса трансформаторов, а также при

питании нагрузок третьей категории, допускается более высокий коэффициент загрузки, находящийся в пределах от 0,8 до 0,9 относительных единиц. [19]

Определение фактического коэффициента загрузки трансформаторов в нормальном режиме работы происходит следующим образом.

$$K_{з.ф} = \frac{S_{р.ц}}{n_{тр} \cdot S_{т. ном}} \quad (18)$$

Для иллюстрации можно упомянуть расчет числа и мощности трансформаторов цеха ремонта и сборки оборудования. Категория вторая по надежности электроснабжения.

$$\sigma_n = \frac{621,99}{2160} = 0,29 \text{ кВА/м}^2$$
$$S_{тр} = \frac{621,99}{0,8 \cdot 2} = 388,74 \text{ кВА}$$

Несмотря на то что первоначальный анализ, основанный на показателе удельной плотности нагрузки, мог бы указывать на целесообразность применения трансформаторов мощностью 1600 кВА, более детальное рассмотрение показало иную картину. Выбор трансформаторного оборудования такой значительной мощности в данных условиях привел бы к его существенной недогрузке. Такое положение дел неминуемо повлекло бы за собой нежелательный рост потерь электроэнергии в распределительной сети.

В связи с этим, для обеспечения более эффективной работы и минимизации потерь, было принято решение в пользу трансформаторов с номинальной мощностью  $S_{т.ном.} = 400$  кВА. Данный выбор позволяет достичь оптимального коэффициента загрузки трансформаторного оборудования, что находится в полном соответствии с нормативными требованиями,

изложенными в Правилах устройства электроустановок [21]. Таким образом, обеспечивается не только надежность электроснабжения, но и его экономическая эффективность.

$$K_{з.ф} = \frac{621,99}{2 \cdot 400} = 0,78 \text{ о. е.}$$

В таблицу 7 сведены результаты расчета числа и мощности цеховых трансформаторных подстанций для всех остальных цехов, производимый аналогично.

Таблица 7 – Расчётное количество и мощность цеховых трансформаторов

№ цеха	Наименование цехов	Катег. потр.	Кз.т	Sp, кВА	Фц, м2	$\sigma_n$ , кВА/м2	Snэ кВА	пт	Кз.ф
1	Центральная Ремонтно-Механическая Мастерская	I	0,65	1047,39	2520	0,42	1000	2	0,52
2	Цех ремонта и сборки оборудования	II	0,8	621,99	2160	0,29	400	2	0,78
3	Механический цех	II	0,8	474,46	1152	0,41	400	2	0,59
4	Цех ремонта и обслуживания спецтехники	II	0,8	656,16	1440	0,46	400	2	0,82
5	Цех подготовки технологических жидкостей	I	0,65	547,13	720	0,76	400	2	0,68
6	Ремонтно-механический участок	II	0,8	283,16	864	0,33	200	2	0,71
7	Цех КИПиА и электрооборудования	II	0,8	470,56	1152	0,41	400	2	0,59
8	Насосная станция	I	0,65	348,47	160	2,18	250	2	0,70
9	Котельная	II	0,8	466,63	480	0,97	400	2	0,58
10	Цех испытаний и опрессовки оборудования	II	0,8	611,98	1440	0,42	400	2	0,76
11	Сварочно-заготовительный цех	I	0,65	596,57	1152	0,52	630	2	0,47
12	Инструментальный цех/участок	II	0,8	458,80	864	0,53	400	2	0,57
13	Трубный цех	II	0,8	626,52	1152	0,54	400	2	0,78
14	Участок ремонта запорной арматуры и ПВО	II	0,8	277,17	576	0,48	200	2	0,69
15	Административно-бытовой корпус (АБК) и столовая	III	0,9	257,73	696	0,37	400	1	0,64
16	Склад материалов и запасных частей	III	0,9	64,34	864	0,07	100	1	0,64
17	Склад химреагентов	III	0,9	42,09	864	0,05	100	1	0,42
18	Проходная	III	0,9	16,53	60	0,28	-	-	-

Для обеспечения электроэнергией объектов вспомогательного назначения, таких как административный корпус, столовая, проходная и

складские помещения, предпочтительным решением является прокладка отдельных кабельных линий. Эти линии целесообразно запитывать от ближайших трансформаторных подстанций (ТП) напряжением 10/0,4 кВ, особенно учитывая, что данные потребители относятся к третьей категории по надежности электроснабжения.

В то же время, принимая во внимание наличие достаточного резерва мощности на трансформаторных подстанциях основных производственных цехов, для электроснабжения указанных зданий с относительно невысокой нагрузкой представляется целесообразным рассмотреть возможность их подключения к шинам 0,4 кВ этих существующих цеховых ТП. Такой подход позволит избежать излишних капитальных вложений, связанных с сооружением отдельных трансформаторных подстанций специально для нужд вспомогательных объектов. Для общей оптимизации распределения нагрузок между различными подразделениями предприятия и для рационального использования трансформаторных мощностей, рекомендуется провести тщательный анализ количества и установленной мощности всех цеховых трансформаторных подстанций, руководствуясь данными, представленными в Таблице 8. [24]

Таблица 8 – Количество и мощность трансформаторов в цехах с учётом перераспределения нагрузки

№ КТП	Распо- -ние	№ цеха	Кате-рия эл.снбж.	Рр.ц, кВт	Qрц, кВАр	Sp.ц, кВА	Ст.ном кВА	пт, шт	Кз.т о.е.	Кз.ф, о.е.
1	2	2,15,18	II, III	746,8	489,6	892,98	630	2	0,8	0,71
2	1	1,освещ. тер.	I, III	847,17	691,54	1093,58	1000	2	0,7	0,55
3	3	3,7	II	794,08	511,67	944,65	630	2	0,8	0,75
4	11	11,13,14	I, II	1212,22	877,03	1496,21	1000	2	0,7	0,75
5	12	6,12,16,17	II, III	698,38	480,43	847,671	630	2	0,8	0,67
6	5	4,5	I, III	955,71	730,84	1203,12	1000	2	0,65	0,60
7	10	8,9,10	I, II	1210,43	755,73	1426,97	1000	2	0,7	0,71

Визуальное представление о размещении трансформаторных подстанций (ТП) и трассировке кабельных линий, работающих под

напряжением 10 кВ и 0,4 кВ, подробно отражено на Чертеже 1. Процесс выбора трансформаторного оборудования для электрических сетей проектируемого промышленного завода основывался на ряде ключевых критериев. В частности, определение необходимого количества и номинальной мощности трансформаторов для каждой подстанции производилось в строгом соответствии с действующими рекомендациями по компенсации реактивной мощности в электросетях промышленных предприятий. Кроме того, при выборе конкретных мощностей трансформаторов учитывались рекомендованные диапазоны коэффициентов их загрузки, а также допустимые уровни аварийных перегрузок.

Для осуществления преобразования электрической энергии непосредственно в сетях конечных потребителей на предприятии предполагается использование сухих трехфазных силовых трансформаторов закрытого исполнения, относящихся к типу ТСЛ (или ТСЗЛ). Подробная информация о выбранных цеховых трансформаторах, включая их основные технические характеристики, систематизирована и приведена в таблице 9. В качестве наглядного примера, на рисунке 2 продемонстрирован внешний вид типового трансформатора модели ТСЛ-630/10/0,4. [11], [12]

Таблица 9 – Технические данные цеховых трансформаторов

Тип трансформатора	S <sub>ном.г.</sub> , кВА	Напряжение, кВ		U <sub>к</sub> , %	Потери, кВт		I <sub>хх</sub> , %	Схема и группа соединения обмоток
		ВН	НН		ΔP <sub>хх</sub>	ΔP <sub>к</sub>		
ТСЛ-630/10/0,4	630	6,10	0,4	6	1,5	6,35	0,8	Д/Ун-11
ТСЛ-1000/10/0,4	1000	6,10	0,4	6	1,95	8,7	0,7	



Рисунок 2 – Внешний вид ТСЛ-630/10/0,4/Д/УН-11

В работе для используется радиальная схема электроснабжения цеховые трансформаторы запитываются непосредственно от ГПП.

### 3.2 Определение нагрузки завода с учетом потерь

Для расчета потерь активной мощности в трансформаторах используем следующую формулу:

$$\Delta P_m = n \cdot (\Delta P_{x.x} + k_{з.ф}^2 \cdot \Delta P_{к.з}), \quad (19)$$

где « $\Delta P_{x.x}$  – потери холостого хода трансформатора, кВт (таблица 9);  
 $\Delta P_{к.з}$  – потери короткого замыкания трансформатора, кВт (таблица 9);  
 $n$  – количество трансформаторов на подстанции, шт.;  
Кз.ф. – фактический коэффициент загрузки трансформатора (таблица 9)» [13].

Произведем пример расчета для КТП-1:

$$\Delta P_m = 2 \cdot (1,5 + 0,84^2 \cdot 6,35) = 8,2 \text{ кВт}$$

Результаты расчёта потерь активных мощности в цеховых трансформаторах 10/0,4 кВ сведены в таблицу 10.

Таблица 10 – Результаты расчёта потерь активных мощности в цеховых трансформаторах 10/0,4 кВ

№ КТП	Тип тр-ра	$S_{т.ном}$ кВА	$\Delta P_{x.x}$ , кВт	$\Delta P_{к.з}$ , кВт	$u_{к}$ , %	$i_0$ , %	$K_{з.ф}$	$\Delta P_{т}$ , кВт
1	ТСЛ-630/10/0,4	630	1,5	6,35	6	0,8	0,64	8,20
2	ТСЛ-1000/10/0,4	1000	1,95	8,7	6	0,7	0,55	9,16
3	ТСЛ-630/10/0,4	630	1,5	6,35	6	0,8	0,68	8,87
4	ТСЛ-1000/10/0,4	1000	1,95	8,7	6	0,7	0,66	11,48
5	ТСЛ-630/10/0,4	630	1,5	6,35	6	0,8	0,67	8,70
6	ТСЛ-1000/10/0,4	1000	1,95	8,7	6	0,7	0,60	10,16
7	ТСЛ-1000/10/0,4	1000	1,95	8,7	6	0,7	0,66	11,48
Итого								68,06

Потери реактивной мощности в трансформаторах вычисляются по формуле:

$$\Delta Q_m = n \cdot \left( \sqrt{\left( \frac{i_0 \cdot S_{т.ном}}{100} \right)^2 - \Delta P_{x.x}^2 + k_{з.ф}^2 \cdot \frac{u_{к} \cdot S_{т.ном}}{100}} \right), \quad (20)$$

где  $i_0$  – ток холостого хода трансформатора, %;

$u_{к}$  – напряжение короткого замыкания трансформатора, %» [13]

Для КТП-1:

$$\Delta Q_m = 2 \cdot \sqrt{\left( \frac{1 \cdot 1000}{100} \right)^2 - 1,9^2 + 0,55^2 \cdot \frac{5,5 \cdot 1000}{100}} = 67,06 \text{ кВАр}$$

Результаты расчёта потерь мощности в цеховых трансформаторах для остальных ТП сводим в таблицу 11.

Таблица 11 – Результаты расчёта реактивных потерь мощности в цеховых трансформаторах 10/0,4 кВ

№ КТП	Тип тр-ра	$S_{т.ном}$ кВА	$\Delta P_{х.х.}$ кВт	$\Delta P_{к.з.}$ кВт	$u_k, \%$	$i_0, \%$	$K_{з.ф}$	$\Delta Q_{т.}$ кВАр
1	ТСЛ-630/10/0,4	630	1,5	6,35	6	0,8	0,64	40,59
2	ТСЛ-1000/10/0,4	1000	1,95	8,7	6	0,7	0,55	49,75
3	ТСЛ-630/10/0,4	630	1,5	6,35	6	0,8	0,68	44,58
4	ТСЛ-1000/10/0,4	1000	1,95	8,7	6	0,7	0,66	65,72
5	ТСЛ-630/10/0,4	630	1,5	6,35	6	0,8	0,67	43,56
6	ТСЛ-1000/10/0,4	1000	1,95	8,7	6	0,7	0,60	56,65
7	ТСЛ-1000/10/0,4	1000	1,95	8,7	6	0,7	0,66	65,72
Итого								366,56

Активная расчетная нагрузка на стороне 10 кВ определяется по формуле:

$$P_p = P_{p,0,4\Sigma} + \Delta P_m, \quad (21)$$

где  $P_{p,0,4\Sigma}$  – суммарная активная расчетная нагрузка низковольтных потребителей, кВт

$\Delta P_{m\Sigma}$  – суммарные потери активной мощности в цеховых трансформаторах, кВт (таблица 10).

$$P_p = 6464,79 + 68,06 = 6532,85 \text{ кВт}$$

Реактивная расчетная нагрузка на стороне 10 кВ определяется по формуле: [18]

$$Q_p = Q_{p,0,4\Sigma} + \Delta Q_{m\Sigma}, \quad (22)$$

где  $Q_{p,0,4\Sigma}$  – суммарная реактивная расчетная нагрузка низковольтных потребителей с учётом КРМ, кВАр;

$\Delta Q_{m\Sigma}$  – суммарные потери реактивной мощности в цеховых

трансформаторах, кВт (таблица 11).

Таким образом,

$$Q_p = 3567,49 + 366,56 = 3934,05 \text{ кВАр}$$

Проверим, есть ли необходимость компенсации реактивной мощности на стороне 10 кВ. Для этого определяем  $tg\varphi$  объекта электроснабжения:

$$tg\varphi_n = \frac{Q_p}{P_p} = \frac{3934,05}{6532,85} = 0,6$$

Это значение больше задаваемого энергосистемой ( $tg\varphi_{\Sigma}=0,42$ ) в период максимума нагрузки, на этот случай в сети 10 кВ должны устанавливаться КРМ 10 кВ.

$$Q_{к.у.10} = P_{р.ц} \cdot (tg\varphi_n - tg\varphi_{\Sigma}) \quad (23)$$

Применяя её, получаем:

$$Q_{к.у.10} = 6532,85 \cdot (0,6 - 0,42) = 1175,913 \text{ кВАр}$$

Для повышения эффективности энергосистемы предлагается внедрить два устройства УК56 6,3 с общей реактивной мощностью 600 кВАр.

Полная расчетная мощность нагрузки на шинах 10 кВ объекта электроснабжения определяется по формуле: [19]

$$S_p = \sqrt{P_{р.10}^2 + (Q_{р.10} - Q_{к.у.10})^2} \quad (24)$$

$$S_{р.ГПП} = \sqrt{6532,85^2 + (3934,05 - 1175,913)^2} = 7091,22 \text{ кВА}$$

Для завода была определена общая мощность, которая достигла 7091,22 кВА на 10 кВ шинах.

### **3.3 Определение количества и мощности трансформаторов ГПП**

Эффективная организация систем электроснабжения на промышленных предприятиях неразрывно связана с грамотным подбором числа и номинальной мощности силовых трансформаторов, как для главных понижающих, так и для цеховых трансформаторных подстанций. Данный выбор должен быть всесторонне обоснован с технической и экономической точек зрения, поскольку он оказывает определяющее влияние на всю архитектуру системы электроснабжения. В процессе принятия решения учитывается комплекс факторов, среди которых ключевыми являются обеспечение требуемой надежности электроснабжения, минимизация расхода цветных металлов на токоведущие части, а также соответствие установленной мощности трансформаторов реальным потребностям. Определение наиболее рационального варианта осуществляется на основе сопоставления объемов капитальных вложений и ежегодных эксплуатационных издержек.

С точки зрения повышения эксплуатационной эффективности и удобства обслуживания систем электроснабжения, рекомендуется ограничиваться использованием не более двух стандартных номиналов мощности для основных трансформаторов, не считая оборудования для вспомогательных нужд. Такой подход позволяет существенно сократить номенклатуру необходимых складских запасов и упрощает процедуры замены трансформаторов в случае их повреждения. Идеальным является стремление к применению трансформаторов идентичной мощности, где это технически и экономически оправдано. Непосредственно номинальная мощность каждого трансформатора устанавливается исходя из расчетной нагрузки предприятия, в данном случае  $S_{\text{нагр.}} = 7091,22$  кВА, а также с обязательным учетом допустимых условий его перегрузки.

В нормальном режиме:

$$S_{\text{ном.т.}} \geq \frac{S_{\text{ГПП}}}{2 \cdot 0,7} = \frac{7091,22}{2 \cdot 0,7} = 5065,15 \text{ кВА}$$

По данным расчёта принимается номинальная мощность трансформатора 6,3 МВА.

В аварийном режиме оставшийся в работе трансформатор должен быть проверен на допустимую перегрузку:

$$K_{3.a} = \frac{7091,22}{6300} = 1,12 = 1,4$$

Рекомендуется выбрать силовой трансформатор типа ТМН-6300/110/10 кВА, данные о котором представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Параметры трансформатора ГПП

Тип	S <sub>т.ном</sub> , МВА	Номинальное напряжение, кВ		Потери, кВт		Напр. кз, %	Ток х.х, %	Схема и группа соединения обмоток
		ВН	НН	P <sub>хх</sub>	P <sub>кз</sub>			
ТМН- 6300/110/10	6,3	115	11	6,5	35	10,5	0,5	УН/Д

На основании проведенных расчет на ГПП принимается к установке трансформатор ТМН-6300/110/10.

### 3.4 Компенсация реактивной мощности и выбор КУ

В рамках настоящей работы для расчета параметров компенсации реактивной мощности используется методика, отличающаяся относительной простотой реализации. Для наглядной демонстрации этого подхода рассмотрим процедуру определения характеристик компенсирующих

устройств, предназначенных для низковольтных электропотребителей. В качестве конкретного примера взята группа потребителей, получающих питание от комплектной трансформаторной подстанции КТП-1, которая обеспечивает электроэнергией цеха №2, №15 и №18.

Применение данного метода расчета является особенно целесообразным для систем электроснабжения, в которых на предприятии эксплуатируется ограниченное количество силовых трансформаторов – один или два. Исходное значение тангенса угла сдвига фаз, характеризующее состояние электрической сети до внедрения компенсирующих мероприятий, вычисляется на основе специализированного математического выражения. Важно отметить, что практическая реализация описанной выше методики сопряжена с возрастающими трудностями при увеличении числа задействованных трансформаторов; ее эффективность снижается, а вычислительная сложность заметно возрастает в системах, включающих более трех трансформаторных единиц.

$$\operatorname{tg} \phi_{p.ц} = \frac{Q_{p.ц}}{P_{p.ц}}, \quad (25)$$

где  $P_{p.ц}$  – расчетная активная мощности группы цехов;

$Q_{p.ц}$  – расчетная реактивная мощности группы цехов.

$$\operatorname{tg} \phi_{p.ц} = \frac{489,6}{746,8} = 0,66$$

Необходимая суммарная мощность компенсирующих устройств  $Q_{к.у}$ , кВАр определяется по выражению:

$$Q_{к.у} = P_{p.ц} \cdot (\operatorname{tg} \phi_{p.ц} - \operatorname{tg} \phi_{\vartheta}), \quad (26)$$

где  $\operatorname{tg} \phi_{\vartheta}$  – коэффициент мощности, задаваемый энергосистемой по заданию на ВКР.  $\operatorname{tg} \phi_{\vartheta}=0,42$ , тогда для КТП 1:

$$Q_{к.у} = 746,8 \cdot (0,66 - 0,42) = 175,94 \text{ кВАр}$$

Для компенсации реактивной мощности на секциях шин РУ-0,4 кВ используются две конденсаторные установки типа АУКРМ 0,4 на 90 кВАр для каждой секции. Аналогично проводим расчёт выбора КРМ для других КТП. Результаты выбора компенсирующих устройств 0,4 кВ сводим в таблицу 13.

Таблица 13 – Результаты расчета КРМ в сети 0,4 кВ

№ КТП	$P_{р.ц}$ , кВт	$Q_{р.ц}$ , кВАр	$tg \varphi_{р.ц}$	$Q_P$ , кВАр	Тип	Кол-во	$Q_{нку}$ , кВАр
1	746,8	489,6	0,66	175,94	АУКРМ 0,4 90 кВАр	2	90
2	847,17	691,54	0,82	335,73	АУКРМ 0,4 175 кВАр	2	175
3	794,08	511,67	0,64	178,16	АУКРМ 0,4 90 кВАр	2	90
4	1212,22	877,03	0,72	367,90	АУКРМ 0,4 200 кВАр	2	200
5	698,38	480,43	0,69	187,11	АУКРМ 0,4 100 кВАр	2	100
6	955,71	730,84	0,76	329,44	АУКРМ 0,4 175 кВАр	2	175
7	1210,43	755,73	0,62	247,35	АУКРМ 0,4 125 кВАр	2	125

Корректировка расчетных нагрузок на последнем этапе производится с учетом установки конденсаторных компенсаторов. Определение расчетных значений реактивной и полной мощностей группы цехов с установкой компенсирующих устройств осуществляется по формулам (27) и (28), которые были сформированы ранее. Трансформаторы КТП и мощности трансформаторов также учитываются в процессе корректировки.

$$Q_{р.ц.к} = Q_{р.ц} - Q_{н.к.у} \quad (27)$$

$$S_{р.ц.к} = \sqrt{P_{р.ц.}^2 + Q_{р.ц.к.}^2} \quad (28)$$

Произведем расчет в качестве примера для КТП 1:

$$Q_{р.ц.к} = 489,6 - 175,94 = 313,66 \text{ кВАр}$$

$$S_{р.ц.к} = \sqrt{746,8^2 + 313,66^2} = 809,99 \text{ кВА}$$

Определяем фактический коэффициент загрузки трансформатора:

$$K_{з.ф} = \frac{809,99}{2 \cdot 630} = 0,64 \text{ о. е.}$$

Аналогично проводим уточнение для остальных групп цехов и сводим результаты в таблицу 14.

Таблица 14 – Количество и мощности цеховых трансформаторов с учётом КРМ

№ КТП	Расположение	Катег.	$P_{р.}$ , кВт	$Q_{р.ц.к.}$ , кВАр	$S_{р.ц.к.}$ , кВА	$n_{ТР}$	Ст.ном., кВА	$K_{зф}$
1	2	II, III	746,8	313,66	809,99	2	630	0,64
2	1	I, III	847,17	355,81	918,86	2	1000	0,46
3	3	II	794,08	333,51	861,27	2	630	0,68
4	11	I, II	1212,22	509,13	1314,80	2	1000	0,66
5	12	II, III	698,38	293,32	757,48	2	630	0,60
6	5	I, III	955,71	401,40	1036,58	2	1000	0,52
7	10	I, II	1210,43	508,38	1312,86	2	1000	0,66

Окончательный результат выбора силовых трансформаторов 10/0,4кВ приведен в таблице 15.

Таблица 15 – Окончательный результат выбора силовых трансформаторов 10/0,4кВ

№ КТП	Катег	№ цеха	$P_{р.}$ , кВт	$Q_{р.ц.к.}$ , кВАр	$S_{р.ц.к.}$ , кВА	$n_{ТР}$	Тип трансформатора	$K_{зф}$
1	II, III	2,15,18	746,8	313,66	809,99	2	ТСЛ-630/10/0,4	0,64
2	I, III	1, освещ. тер.	847,17	691,54	1093,58	2	ТСЛ-1000/10/0,4	0,55
3	II	3,7	794,08	333,51	861,27	2	ТСЛ-630/10/0,4	0,68
4	I, II	11,13,14	1212,22	509,13	1314,80	2	ТСЛ-1000/10/0,4	0,66
5	II, III	6,12,16,17	698,38	480,43	847,671	2	ТСЛ-630/10/0,4	0,67
6	I, III	4,5	955,71	730,84	1203,12	2	ТСЛ-1000/10/0,4	0,60
7	I, II	8,9,10	1210,43	508,38	1312,86	2	ТСЛ-1000/10/0,4	0,66
Итого			6464,79	3567,49	7443,29	14		

Таким образом, для цеховых трансформаторов были выбраны компенсирующие устройства. На основании чего окончательно выбраны

трансформаторы и проверены по загрузке.

Выводы:

Для группы комплектных трансформаторных подстанций, включающей КТП-1, КТП-3, КТП-4 и КТП-7, было зафиксировано существенное снижение коэффициентов загрузки трансформаторов. После установки КРМ эти коэффициенты достигли уровней, которые полностью соответствуют нормативным требованиям, предписанным Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) для соответствующих категорий надежности электроснабжения потребителей. Данное обстоятельство однозначно указывает на необходимость применения компенсирующих устройств для этих подстанций, поскольку подключенные к ним потребители характеризуются изначально низким коэффициентом мощности, что и приводило к перегрузке трансформаторов или их неэффективной работе.

В то же время, для другой группы подстанций, а именно КТП-2, КТП-5 и КТП-6, анализ показал, что их коэффициенты загрузки изначально находятся в пределах, установленных ПУЭ. Следовательно, для данных трансформаторных подстанций установка дополнительных компенсирующих устройств не является необходимой, так как их текущие параметры работы уже соответствуют нормативным требованиям.

## 4 Разработка внешнего электроснабжения завода

### 4.1 Выбор схемы электроснабжения электрической сети

Ключевым элементом системы электроснабжения предприятия является главная понизительная подстанция (ГПП), расположенная на границе его территории в точке ввода воздушных линий электропередачи. Энергоснабжение ГПП организовано по двухцепной схеме, что обеспечивает повышенную надежность питания. При проектировании архитектуры электроподстанции особое внимание уделяется выбору ее структурной схемы. Для рассматриваемого случая тупиковой подстанции, работающей на напряжении 110 кВ, в качестве оптимального варианта принята схема №110-4н. Данная конфигурация, как показано на Рисунке 3, предусматривает установку двух выключателей, по одному с каждой стороны линии, и неавтоматической перемычки между секциями шин. [20]

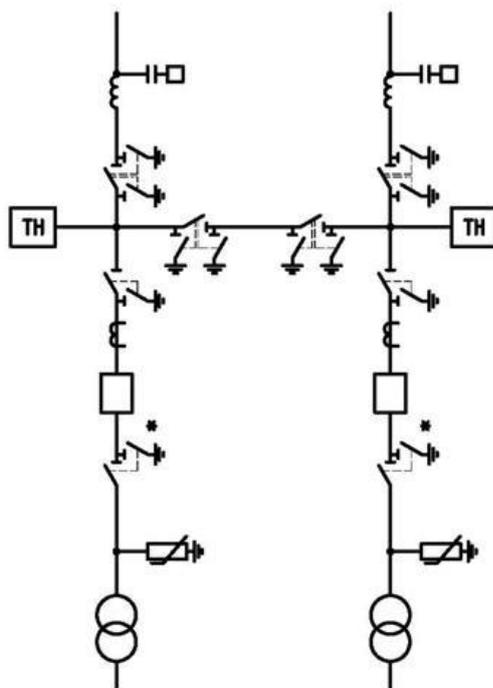


Рисунок 3 – Главная схема электрических соединений подстанции [20]

Определение рационального уровня напряжения для питания предприятия требует учета ряда исходных параметров. К ним относятся полная активная расчетная мощность ( $P_p$ ), потребляемая объектом, и протяженность питающей линии ( $l$ , км) от подстанции энергосистемы до потребителя.

В данном проекте длина питающей линии составляет 6,5 км. Согласно выполненным расчетам, которые будут подробно представлены в последующих разделах, активная нагрузка завода оценивается в 6552,85 кВт, а реактивная составляющая достигает 2758,13 кВар. Исходя из этих значений, полная расчетная нагрузка предприятия составляет 7091,22 кВА. Эти расчетные показатели являются основополагающими для дальнейшего проектирования системы электроснабжения.

Рациональное напряжение определяем по следующей формуле [16]:

$$U = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{l} + \frac{2500}{P_{\text{р.цепи}}}}} \quad (29)$$

где  $l$  – длина линии, км;

$P$  – мощность максимального режима, МВт.

Подставляя известные данные в формулу (29), определяем:

$$U_{\text{ном}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{6,5} + \frac{2500}{6,552}}} = 46,72 \text{ кВ}$$

Выбор оптимального напряжения для электроснабжения предприятия является фундаментальной задачей. В данном случае, для внешнего питания принято напряжение 110 кВ, что обусловлено стремлением к минимизации потерь электроэнергии при ее передаче от энергосистемы до границ объекта. На территории самого предприятия для распределения электроэнергии от

главной понизительной подстанции (ГПП) до цеховых трансформаторных подстанций (ТП) используется кабельная сеть, рассчитанная на напряжение 10 кВ. Такой уровень напряжения часто применяется на крупных промышленных объектах для питания мощных электродвигателей и другого оборудования, а также в случаях, когда на предприятии имеется собственная генерация соответствующего напряжения. Это решение представляет собой компромисс между эффективностью передачи энергии на значительные расстояния внутризаводской сети и практичностью подключения крупных потребителей. Для непосредственного питания подавляющего большинства технологического оборудования и вспомогательных систем на заводе используется стандартное напряжение 0,4 кВ, что соответствует общепринятой практике для промышленных электроустановок.

Бесперебойность производственных процессов на предприятии цветной металлургии напрямую зависит от надежности электроснабжения. В связи с этим все электроприемники классифицируются по категориям надежности, исходя из тяжести последствий, которые может вызвать прекращение подачи электроэнергии.

К первой категории надежности относятся те электроприемники, перерыв в электроснабжении которых способен привести к возникновению прямой угрозы для жизни и здоровья людей, вызвать значительный экономический ущерб, необратимое повреждение дорогостоящего оборудования, выпуск массового брака продукции или полное нарушение сложных, непрерывных технологических циклов. Сюда же относятся системы, отказ которых нарушает функционирование критически важных элементов инфраструктуры предприятия. Для завода цветной металлургии это, прежде всего, установки непрерывного цикла, такие как цеха электролиза, где остановка грозит застыванием электролита и выходом из строя электролизеров. Аналогично, основные плавильные и литейные агрегаты, где внезапное прекращение нагрева и остывание расплавленного металла может привести к серьезным поломкам печей и созданию аварийных ситуаций, также

требуют электроснабжения по первой категории. Важнейшие вспомогательные системы, например, насосные станции, обеспечивающие подачу охлаждающей воды для высокотемпературных процессов, также относятся к этой группе, поскольку их отказ неминуемо влечет за собой остановку и возможное повреждение основного оборудования. Для таких потребителей предусматривается питание от двух независимых источников с автоматическим вводом резерва (АВР).

Вторая категория надежности присваивается электроприемникам, прекращение питания которых не создает непосредственной угрозы безопасности или необратимых повреждений, однако приводит к существенным нарушениям производственного ритма, простоям оборудования и значительным потерям продукции. К этой категории на металлургическом предприятии могут быть отнесены цеха подготовки шихты, остановка которых нарушает снабжение сырьем основных переделов. Установки для механической обработки металлов давлением, такие как прокатные станы, волочильное и прессовое оборудование, где внезапная остановка может вызвать застревание обрабатываемого материала и потребовать длительного времени на восстановление работоспособности, также обычно относят ко второй категории. Котельные, обеспечивающие предприятие теплом и паром для технологических нужд и отопления, особенно в холодное время года, являются важными потребителями этой категории, так как их длительная остановка может привести к системным сбоям. Для потребителей второй категории допускается перерыв в электроснабжении на время, необходимое для ручного переключения на резервный источник питания.

К третьей категории надежности относятся все остальные электроприемники, перерыв в электроснабжении которых вызывает лишь снижение объемов производства или временные неудобства, но не влечет за собой серьезных последствий для безопасности, экономики или основных технологических процессов. В эту группу обычно входят механические цеха,

выполняющие вспомогательные операции по обработке деталей, участки электрохимической обработки, где процессы могут быть безопасно прерваны и возобновлены. Ремонтно-механические и инструментальные цеха, лаборатории контроля качества, цеха вторичной переработки отходов также, как правило, относятся к третьей категории. Административные здания, столовые, склады готовой продукции и вспомогательных материалов, проходные – все эти объекты обычно имеют электроснабжение по третьей категории, где перерыв в подаче электроэнергии допустим на время, необходимое для проведения ремонта или замены поврежденного оборудования.

Завод цветных металлов, специализирующийся на крупносерийном выпуске продукции, характеризуется обширными производственными площадями и работает преимущественно в две смены. Однако некоторые ключевые подразделения, такие как литейное производство (например, цех №11 согласно внутренней нумерации) и насосные станции, функционируют в непрерывном круглосуточном режиме. В связи с этим на предприятии присутствуют потребители всех трех упомянутых категорий надежности электроснабжения.

**Выводы:**

Организация освещения на предприятии также подчиняется принципам категоричности. Уровень надежности систем освещения в производственных цехах должен соответствовать категории надежности технологического оборудования, расположенного в них. Для цехов и участков, отнесенных к первой и второй категориям, обязательно предусматривается система аварийного освещения, обеспечивающая безопасную эвакуацию персонала и возможность завершения неотложных операций при пропадании основного электропитания. Освещение общезаводской территории и помещений, относящихся к третьей категории, обычно выполняется по третьей категории надежности.

## **5. Разработка внутреннего электроснабжения цеха и завода**

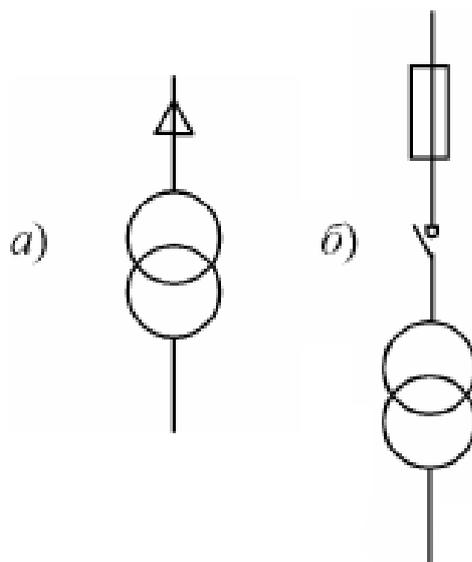
### **5.1 Конструктивное выполнение питающей и распределительной сети**

При разработке систем электроснабжения для трансформаторных и распределительных подстанций первостепенное значение имеют компетентный выбор оборудования и продуманная схема его подключения. В рамках данного проекта основной упор сделан на использование комплектных трансформаторных подстанций промышленного типа (КТПП). Такой выбор обусловлен их способностью обеспечивать повышенную надежность электроснабжения и существенно сокращать сроки строительно-монтажных работ. Цеховые трансформаторные подстанции (ЦТП) реализуются в двух вариантах: они могут быть интегрированы непосредственно в объем производственных зданий (встроенные ТП) или же примыкать к ним, имея одну общую стену с цехом, но располагаясь при этом снаружи (пристроенные ТП). [5]

Особое внимание в схемах магистрального питания подстанций уделяется комбинации выключателя нагрузки с предохранителем. Такое решение обеспечивает эффективную защиту отходящих линий от токов перегрузки и короткого замыкания. Выключатель нагрузки предназначен для коммутации цепи под номинальной нагрузкой, в то время как предохранитель осуществляет автоматическое отключение линии при возникновении аварийных режимов. Такая конфигурация, где защитный элемент страхует коммутационный аппарат и линию, способствует локализации повреждений, повышает общую надежность системы и обеспечивает безопасность обслуживающего персонала. [6]

Типовые схемы подключения трансформаторов, иллюстрирующие различные подходы, представлены на Рисунке 4. Схема 'а' демонстрирует вариант с глухим вводом, тогда как схема 'б' показывает применение

выключателя нагрузки. Эти примеры отражают оптимальные способы интеграции коммутационного и защитного оборудования, а также их взаимодействие с другими элементами электроустановки. При проектировании и эксплуатации энергетических систем строгое следование отраслевым рекомендациям является залогом безопасной и эффективной работы. [10]



а – глухой ввод; б – применение выключателя нагрузки

Рисунок 4 – Схемы подключения трансформаторов

Для электроснабжения силовых нагрузок, включая электродвигатели переменного тока невысокой мощности, и систем освещения на предприятии принято стандартное напряжение 380/220 В с промышленной частотой 50 Гц. Такое решение продиктовано стремлением к оптимизации, поскольку оно позволяет сократить расход цветных металлов в кабельных сетях, минимизировать потери электроэнергии и избежать необходимости создания отдельных цепей для питания силового оборудования и осветительных приборов. Этот выбор также соответствует рекомендациям производителей оборудования.

Для распределения электроэнергии от главной понизительной

подстанции (ГПП) к цеховым трансформаторным подстанциям (ЦТП) напряжением 10 кВ применяются как радиальные, так и магистральные схемы. Выбор конкретной схемы обусловлен территориальным размещением и величиной нагрузок. Установленная мощность трансформаторов на ЦТП, как правило, значительно ниже, чем на ГПП, что соответствует их задаче по питанию локальных групп потребителей. Радиальные схемы на напряжении 10 кВ предпочтительны для электроснабжения нагрузок, рассредоточенных по различным направлениям от питающего центра. Центральнораспределительные пункты (ЦРП) также играют важную роль в структуре внутризаводских электросетей, концентрируя распределительные функции.

Питание трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ осуществляется посредством кабельных линий, реализуемых как по радиальным, так и по магистральным принципам. Аналогичные схемы прокладки кабельных линий (радиальные и магистральные) находят применение и при построении внецеховых силовых сетей напряжением до 1 кВ. [21]

## 5.2 Выбор воздушных линий 110 кВ

Для обеспечения нормального функционирования ЛЭП необходимо подобрать такое сечение проводов, чтобы они не перегревались при любой нагрузке, соблюдать предельные значения потерь напряжения и соблюдать экономическую эффективность за счет соответствия плотности тока. Кроме того, провода напряжением 110 кВ и выше должны соответствовать требованиям коронирования, что предполагает минимальное сечение провода 70 мм<sup>2</sup> для 110 кВ.

Первое из этих условий записывается в виде (по длительно-допустимому току):

$$I_{\text{р.ав.}} \leq I_{\text{доп}}; I_{\text{р.ав.}} = \frac{S_{\text{р}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot n_{\text{ц}}}; \quad (30)$$

Второе условие по потере напряжения в линии:

$$\Delta U = \frac{(P \cdot R + Q \cdot X)}{U_n} \quad (31)$$

где:  $P, Q$  – активная и реактивная мощности в линии;

$R, X$  - активное и реактивное сопротивление линии, Ом.

Участки электросети имеют следующие допустимые потери напряжения:

- 5% на линиях 6-10 кВ внутри предприятия;

- 10% на линиях 10-220 кВ, которые питают ГПП предприятия.

Третье условие выбора сечения по экономической плотности тока:

$$F_{\text{ЭК}} = \frac{I_p}{j_{\text{ЭК}}}, \quad (32)$$

где  $F_{\text{ЭК}}$  - экономическая плотность сечения провода, мм<sup>2</sup>;

$I_p$  - расчетная сила тока в линии, А;

$j_{\text{ЭК}}$  - нормированное значение экономической плотности тока, А/мм<sup>2</sup>

Согласно заданию на выпускную квалификационную работу, продолжительность использования максимальной нагрузки в ГПП составляет 3800 часов в год. Это соответствует значению  $j_{\text{ЭК}}$ , равному 1,2 ампер на квадратный миллиметр.

$$I_p = \frac{7091,22}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 2} = 18,6 \text{ А}$$

$$F_{\text{ЭК}} = \frac{18,6}{1,2} = 15,5 \text{ мм}^2$$

$$I_{p.\text{ав.}} = 18,6 \cdot 2 = 37,2 \text{ А.}$$

Исходя из двух условий, выбираем провод марки АС-70/16 с сечением 70 мм<sup>2</sup>; I<sub>доп.</sub>=270 А; r<sub>0</sub>=0,306 Ом/км; x<sub>0</sub>=0,434 Ом/км. [22]

Проверяем провод по потере напряжения:

Так как ГПП питается от подстанции энергосистемы (6,5 км):

$$\Delta U = \frac{(6552,85 \cdot 0,306 \cdot 6,5) + (2758,13 \cdot 0,434 \cdot 6,5)}{110} = 237 \text{ В} \approx 0,03\%$$

Выбранные провода, удовлетворяют условиям нагрева токами, потерь напряжения и коронирования.

### 5.3 Выбор марки и сечения кабельных линий 10 кВ

Определим максимальный расчётный ток, протекающий по кабельной линии в аварийном режиме по выражению.

$$I_p = \frac{S_p}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_H} \quad (33)$$

$$I_{\max} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H} \quad (34)$$

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\max}}{1,3 \cdot K_{\text{сн}}} \quad (35)$$

где  $S_p$  – полная расчетная мощность, кВА;

$U_H$  – номинальное напряжение, кВ;

$K_{\text{сн}}$  – коэффициент снижения нагрузки равный 0,9 для двух кабелей и 1 при одном кабеле.

Проведем пример расчета выбора сечения питающих кабельных линий КТП-1:

$$I_{p\text{КТП-1}} = \frac{809,99}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 23,41 \text{ А}$$

$$I_{\text{max.КТП-1}} = \frac{809,99}{\sqrt{3} \cdot 10} = 46,82 \text{ А}$$

$$I_{\text{допКТП-1}} = \frac{46,82}{1,3 \cdot 0,9} = 40,02 \text{ А}$$

Проверка КЛ по экономической плотности тока:

$$F = \frac{I_p}{J_{\text{эК}}} \quad (36)$$

$$F_{\text{ТП-1}} = \frac{23,41}{1,2} = 19,51 \text{ мм}^2$$

Результаты расчетов и марки выбранных кабелей сводим в таблицу 16.

Таблица 16 – выбор марки и сечения кабелей 10 кВ

№ КТП	$S_p$ , кВА	$I_p$ , А	$I_{\text{доп}}$ , А	$F$ , мм <sup>2</sup>	Марка кабеля	Сп-б прокл.	Длина, км
ГПП-КТП-1	809,99	23,41	40,02	19,51	АСБГ-10 3х25	траншея	0,035
ГПП-КТП-2	1093,58	31,61	54,03	26,34	АСБГ-10 3х35	траншея	0,06
ГПП-КТП-3	861,27	24,89	42,55	20,74	АСБГ-10 3х25	траншея	0,14
ГПП-КТП-4	1314,8	38,00	64,96	31,67	АСБГ-10 3х35	траншея	0,24
ГПП-КТП-5	847,671	24,50	41,88	20,42	АСБГ-10 3х25	траншея	0,1
ГПП-КТП-6	1203,12	34,77	59,44	28,98	АСБГ-10 3х35	траншея	0,04
ГПП-КТП-7	1312,86	37,94	64,86	31,62	АСБГ-10 3х35	траншея	0,2

Выбор кабеля по короне и механической прочности не производится.

Проверим выбранный кабель по термической стойкости к  $I_{\text{кз}}$ , найдем минимальное сечение кабеля по  $I_{\text{кз}}$ :

$$F_{\text{э}} = \alpha \cdot I_{\text{кз}} \cdot \sqrt{t_{\text{привед}}} \quad (37)$$

$$F_3 = 12 \cdot 1,57 \cdot \sqrt{0,2} = 8,42 \text{ мм}^2$$

Условия удовлетворяют, минимальное сечение по термической стойкости  $16 \text{ мм}^2$ . В конечном итоге на КТП-1 принимаем кабель марки АСБГ-10 3х25,  $I_{\text{доп}}=100 \text{ А}$ . [7]

#### 5.4 Выбор шинопроводов сборочного цеха

Шинопроводы выбираются по номинальному напряжению и номинальному току  $I_{\text{ном.ш}}$ , причем:

$$I_{\text{ном.ш}} \geq I_{\text{р.ф}} \geq I_{\text{р.мах}}, \quad (38)$$

где  $I_{\text{р.мах}}$  – рабочий максимальный ток;

$I_{\text{р.ф}}$  – расчетный ток форсированного (послеаварийного) режима.

Определяются расчетные токи:

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (39)$$

где  $n$  – количество шинопроводов.

$$I_{\text{р1.}} = \frac{201,87}{1 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,4} = 291,71 \text{ А}$$

$$I_{\text{р2.}} = \frac{303,53}{1 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,4} = 438,62 \text{ А}$$

Для ШМА 1 выбираются прямоугольные алюминиевые шины E-Line CR с допустимым током  $I_{\text{ном.}} = 630 \text{ А}$ .

Данные по выбору сечений шин питания потребителей сборочного цеха сведены в таблицу 17.

Таблица 17 - Выбор шиноросоводов прокатного цеха

№ ШМА	Шины	$S_p$ , кВА	$I_p$ , А	Размеры проводников	$I_{доп}$ , А
		ШМА			
1	E-Line CR	201,87	291,71	6x40	630
2	E-Line CR	303,53	438,62	6x40	630

Таким образом, былт выбраны два шинопровода на ток 630 А для распределения электроэнергии для электроснабжения приемников прокатного цеха.

#### 5.4 Выбор сечения кабельных линий 0,4 кВ прокатного цеха

Сечение кабельной линии выбирается по длительному допустимому току. Расчетный ток в кабеле должен быть меньше длительного допустимого тока, с учетом поправочных коэффициентов. Расчетный ток определяем по формуле:

Для передачи электроэнергии используется кабель типа ВВГнг 4х(Х)– силовой медный кабель.

Таблица 18 - Выбор типа и сечения кабельных линий ЭП-0,4 кВ цеха

№ электро-приемника	Наименование групп электроприёмников	$P_n$ , кВт	$I_p$ , А	Тип кабеля
1	Сборочный стенд	25	43,01	ВВГнг 4x10
2	Паяльная установка	0,8	4,28	ВВГнг 3x2,5
3	Шлифовальные машины	8,2	13,78	ВВГнг 4x4
4	Установки и стенды для испытания оборудования	32	52,55	ВВГнг 4x16
5	Механизированные сборочные установки	38	63,85	ВВГнг 4x16
6	Подвесной конвейер	12,2	20,99	ВВГнг 4x4
7	Конвейер сборочный	28	47,60	ВВГнг 4x10

Продолжение таблицы 18

№ электро-приемника	Наименование групп электроприёмников	$P_n$ , кВт	$I_p$ , А	Тип кабеля
8	Пресс гидравлический	8,8	15,51	ВВГнг 4х4
9	Токарные станки	4,5	7,74	ВВГнг 4х2,5
10	Сварочное оборудование	10,5	18,97	ВВГнг 4х4
11	Вентиляторы	6	10,57	ВВГнг 4х4
12	Компрессор	32	56,39	ВВГнг 4х16

Таким образом, был произведен выбор сечения кабельных линий 0,4 кВ прокатного цеха.

**Выводы:**

Для электроснабжения силовых нагрузок принято стандартное напряжение 380/220 В с промышленной частотой 50 Гц. Для распределения электроэнергии от главной понизительной подстанции к цеховым трансформаторным подстанциям напряжением 10 кВ применяются как радиальные, так и магистральные схемы. Выбор конкретной схемы обусловлен территориальным размещением и величиной нагрузок. Установленная мощность трансформаторов на ЦТП, как правило, значительно ниже, чем на ГПП, что соответствует их задаче по питанию локальных групп потребителей. Радиальные схемы на напряжении 10 кВ предпочтительны для электроснабжения нагрузок, рассредоточенных по различным направлениям от питающего центра. Центральные-распределительные пункты также играют важную роль в структуре внутризаводских электросетей, концентрируя распределительные функции.

## 6 Расчёт токов короткого замыкания и выбор электрооборудования

### 6.1 Расчёт токов короткого замыкания

В данной выпускной квалификационной работе трехфазное короткое замыкание является основным типом расчета для выбора электрооборудования. Не учитывается следующее при определении значений токов короткого замыкания в данной работе: расчетная схема токов короткого замыкания для системы электроснабжения радиозавода представлена на рисунке 5, а схема замещения для расчета трехфазных коротких замыканий - на рисунке 6.

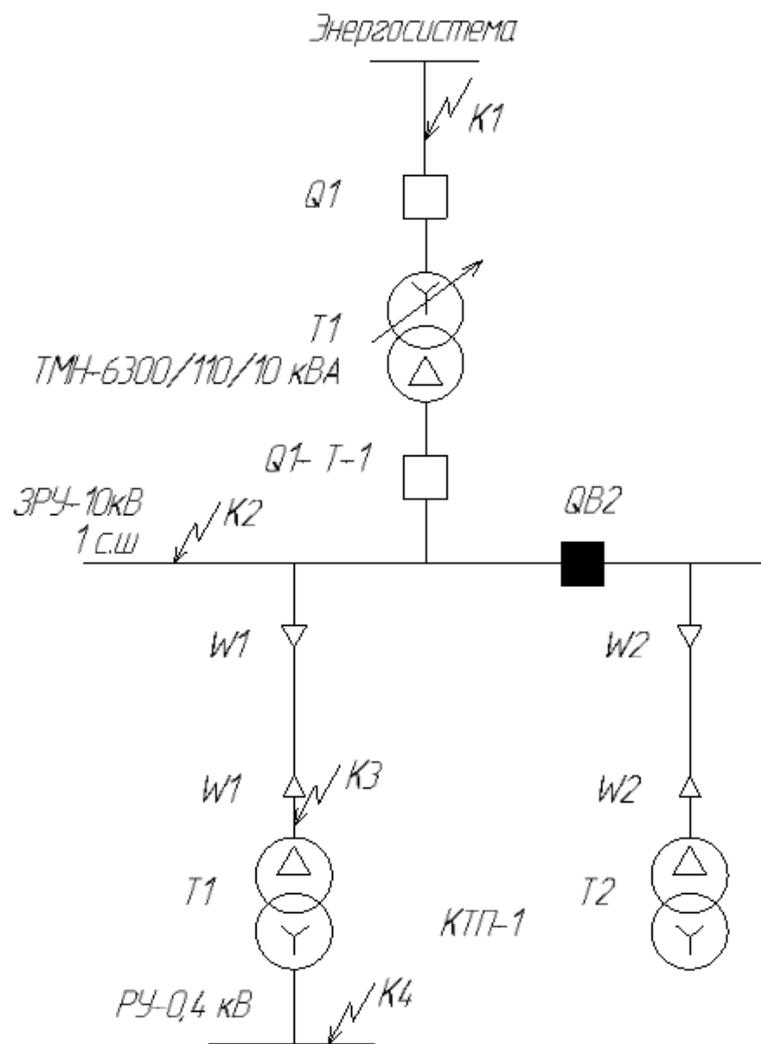


Рисунок 5 - Расчетная схема для токов к.з.

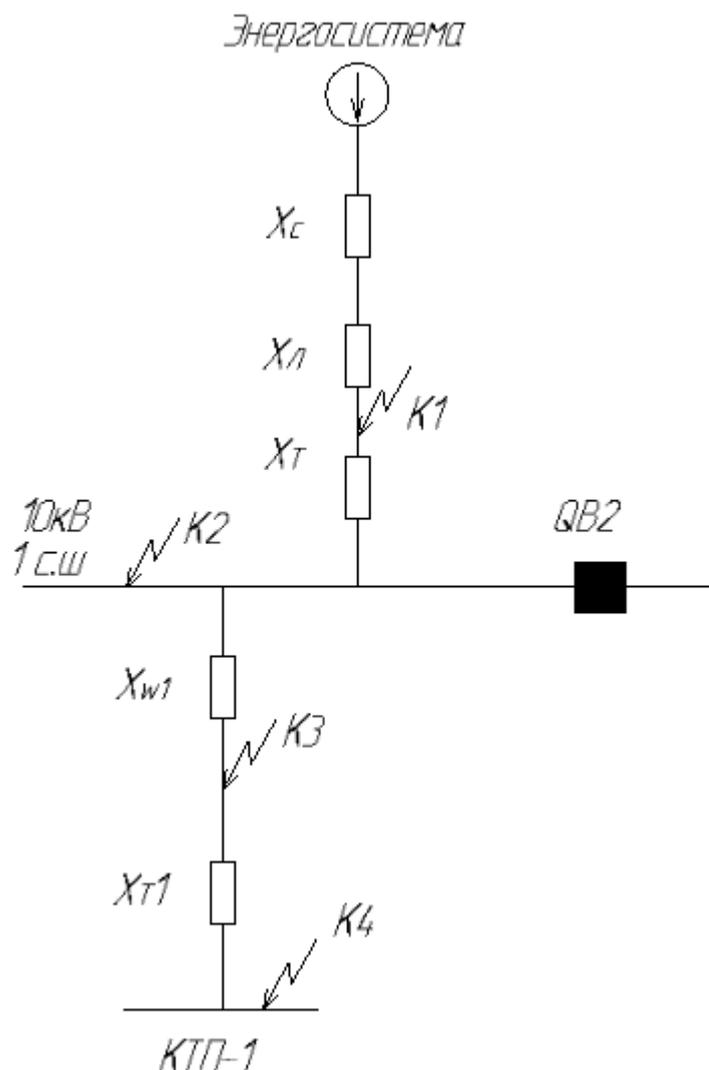


Рисунок 6 - Схема замещения для расчёта токов к.з.

Расчёт токов к.з. в сетях системы электроснабжения радиозавода будем проводить в относительных единицах с использованием шкалы средних значений напряжений в соответствии с методикой, изложенной в руководящих указаниях. Предварительно принимаем базисную мощность  $S_б=S_k=600$  МВА.

За базисное напряжение принимаем среднее эксплуатационное напряжение той ступени, на которой предполагается КЗ:  $U_{б1}=115$ кВ – напряжение ВН трансформатора;  $U_{б2}=11$ кВ – напряжение НН трансформатора. [9]

Последовательность расчёта токов к.з. следующая. Во-первых,

вычисляются значения базисных токов по формуле:

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}}. \quad (40)$$

В рассматриваемом случае для точек К1 и К2 получаем:

$$I_{\delta 1} = \frac{600}{\sqrt{3} \cdot 115} = 3,01 \text{ кА};$$

$$I_{\delta 2} = \frac{600}{\sqrt{3} \cdot 11} = 31,49 \text{ кА}.$$

Далее в относительных единицах рассчитываются сопротивления элементов системы. В рассматриваемом примере в соответствии со схемой замещения вычисляются следующие сопротивления.

1. Сопротивление системы по заданию 0,6 о.е.

$$x_c = 0,6. \text{ о.е.}$$

2. Сопротивление питающей воздушной линии:

$$x_l = x_0 \cdot L \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{cp}^2}, \quad (41)$$

где  $L$  – длина линии, км;

$x_0$  – удельное сопротивление линии, Ом/км.

$$X_l = 0,43 \cdot 6,5 \cdot \frac{600}{115^2} = 0,128 \text{ о.е.}$$

3. Сопротивление обмотки высокого напряжения трансформатора:

$$x_{т.в} = 0,125 \cdot \frac{u_{k(b-n)} \cdot S_{\delta}}{100 \cdot S_{т.ном}}, \quad (42)$$

где  $u_k$  – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

$S_{T.НОМ}$  – номинальная мощность трансформатора, МВА.

$$X_{T.B} = 0,125 \cdot \frac{10,5 \cdot 600}{100 \cdot 6,3} = 1,25 \text{ о. е.}$$

4. Сопротивление обмотки низкого напряжения трансформатора:

$$x_{m.H} = 1,75 \cdot \frac{u_{k(\beta-H)} \cdot S_{\beta}}{100 \cdot S_{m.НОМ}};$$

$$X_{T.H} = 1,75 \cdot \frac{10,5 \cdot 600}{100 \cdot 6,3} = 17,5 \text{ о. е.}$$

5. Общее сопротивление трансформатора:

$$x_m = x_{m.B} + x_{m.H}; \quad (43)$$

$$X_T = 1,25 + 17,5 = 18,75 \text{ о. е.}$$

6. Сопротивления кабельных линий от ГПП до КТП-1 в относительных единицах по формуле (41):

$$X_{кл1} = X_0 \cdot L \cdot \frac{S_B}{U_{B2}^2}$$

$$X_{W 1,2} = 0,08 \cdot 0,035 \cdot \frac{600}{11^2} = 0,013 \text{ о. е.}$$

7. На следующем этапе вычисляются начальные значения периодической составляющей токов к.з. по формуле:

$$I_{п.01} = K_i \cdot I_{\beta} \quad (44)$$

где  $K_i$  – кратность тока к.з., определяющая по расчетным кривым [9] для момента  $t = 0$   $K_i = 1,12$ , при  $t = \infty$   $K_i = 1,29$

$$I_{\text{по1}} = 1,29 \cdot 3,01 = 3,88 \text{ кА}$$

Расчет токов короткого замыкания в точке К2:

Для точки К2:

$$X_{\Sigma 2} = X_{\Sigma 1} + X_T; \quad (45)$$

$$X_{\Sigma 1} = X_c + X_L; \quad (46)$$

$$I_{\text{поi}} = \frac{I_{\Sigma}}{X_{\Sigma}} \quad (47)$$

$$X_{\Sigma 2} = 1,25 + 18,75 = 20 \text{ о.е.}$$

$$I_{\text{по2}} = \frac{31,49}{20} = 1,57 \text{ кА}$$

Для точки К3:

$$X_{\Sigma 3} = X_{\Sigma 2} + X_{w1,2};$$

$$X_{\Sigma 3} = 20 + 0,013 = 20,013 \text{ о.е.}$$

$$I_{\text{по3}} = \frac{31,49}{20,013} = 1,57 \text{ кА}$$

Ударный ток к.з. определяется по формуле:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{\text{но}} \cdot k_y. \quad (48)$$

Значения ударного коэффициента  $k_y$  приводятся в справочниках в [9].

Для рассматриваемого примера расчёт даёт следующие результаты:

- для точки К1:

$$i_{y1} = \sqrt{2} \cdot 3,88 \cdot 1,8 = 9,84 \text{ кА};$$

- для точки К2:

$$i_{y2} = \sqrt{2} \cdot 1,57 \cdot 1,7 = 3,76 \text{ кА};$$

- для точки К3:

$$i_{y3} = \sqrt{2} \cdot 1,57 \cdot 1,65 = 3,65 \text{ кА};$$

Для определения значения апериодической составляющей тока КЗ при разрыве дугогасительных контактов высоковольтных выключателей необходимо использовать специальную формулу.

$$i_{at} = \sqrt{2} \cdot I_{no} \cdot e^{\frac{-t_0}{T_a}}, \quad (49)$$

где  $T_a$  – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока к.з., значения которой приводятся в справочниках [9];

$t_0$  – усредненное значение собственного времени отключения выключателя (для современных выключателей около 0,01 с).

В рассматриваемом примере получены следующие результаты:

- для точки К1:

$$i_{at1} = \sqrt{2} \cdot 3,88 \cdot e^{\frac{-0,01}{0,05}} = 4,49 \text{ кА}$$

- для точки К2:

$$i_{at2} = \sqrt{2} \cdot 1,57 \cdot e^{\frac{-0,01}{0,12}} = 2,02 \text{ кА}$$

- для точки К3:

$$i_{at3} = \sqrt{2} \cdot 1,57 \cdot e^{\frac{-0,01}{0,05}} = 1,82 \text{ кА}$$

Тепловой импульс тока к.з. оказывает воздействие на проводники и электрические аппараты, степень этого воздействия определяется при помощи интеграла Джоуля.

$$B_k = \int_0^{t_{откл}} i_{кз}^2 dt,$$

где  $i_{кз}$  – ток короткого замыкания;

$t_{откл}$  – расчётная продолжительность к.з.

Оценить значение этого интеграла можно, воспользовавшись формулой

$$B_k = I_{но}^2 \cdot (t_{откл} + T_a). \quad (50)$$

Расчёт по ней даёт следующие приблизительные значения интеграла Джоуля:

- для точки К1:

$$B_{K1} = 3,88^2 \cdot (0,2 + 0,05) = 3,8 \text{ кА}^2\text{с}$$

- для точки К2:

$$B_{K2} = 1,57^2 \cdot (1,6 + 0,15) = 4,31 \text{ кА}^2\text{с}$$

- для точки К3:

$$B_{K3} = 1,57^2 \cdot (0,6 + 0,05) = 1,6 \text{ кА}^2\text{с};$$

Расчет токов КЗ в точке К4. Составим схему замещения (рисунок 7):

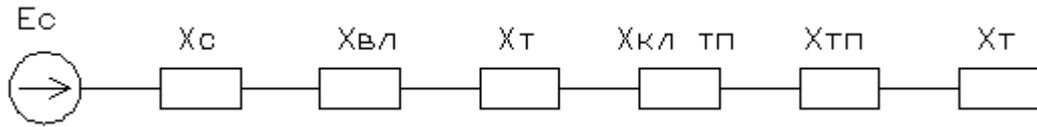


Рисунок 7 - Схема замещения для точки К3

КТП-1: 2х630 (ТСЛ-630/10):  $U_{ВН}=10$  кВ,  $U_{НН}=0,4$  кВ,  $S_{НОМ}=630$  кВ·А,  
 $U_K=6$  %;  $\Delta P_{КЗ}=6,35$  кВт;  $\Delta P_{ХХ}=1,5$  кВт;  $I_{ХХ}=0,8$  % .

Сопротивление цехового трансформатора:

$$X_{T^*} = \frac{U_K}{100} \frac{S_{\sigma}}{S_{HT}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{600}{1} = 36 .$$

Сопротивление кабельной линии КТП-1:  $X_{КЛ^*} = 1,13$ .

Результирующее сопротивление:

$$X_{\Sigma} = X_C + X_{ВЛ} + X_{T^*} + X_{КЛПП^*} + X_{КТП-1^*} = 20,013 + 36 = 56,013;$$

Периодическая составляющая тока КЗ в точке К4:

$$I_{K4}^{//} = \frac{E_c'' \cdot I_{\sigma II}}{X_{рез}} = \frac{1 \cdot 31,49}{56,013} = 0,562 \text{ кА}$$

Двухфазный ток КЗ:

$$I_{K4}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 0,562 = 0,483 \text{ кА};$$

Полученные значения сводим в табл. 19.

Таблица 19 – Результаты расчета токов короткого замыкания

Расчетная точка К.З.	$I_{н.о.}$ , кА	$i_y$ , кА	$i_{a.t}$ , кА	$B_k$ , кА <sup>2</sup> ·с
К1	3,88	9,84	4,49	3,8
К2	1,57	3,76	2,02	4,31
К3	1,57	3,65	1,82	1,6
К4	0,562	1,348	-	-

В данном подразделе был произведен расчет токов короткого замыкания в различных точках схемы. Данные значения будут использованы для выбора электрооборудования. [8]

## 6.2 Выбор аппаратуры на подстанции напряжением 110/10 кВ

Обеспечение безотказной работы электрических систем немислимо без скрупулезного подхода к выбору коммутационной и защитной аппаратуры. Этот выбор должен основываться на способности оборудования корректно функционировать как в режиме длительной эксплуатации при нормальных условиях, так и при кратковременных, но интенсивных воздействиях, характерных для аварийных ситуаций, например, при возникновении коротких замыканий. Принципиально важно, чтобы все устройства, последовательно включенные в электрическую цепь, демонстрировали не только надежность в штатных режимах, но и высокую устойчивость к электродинамическим и термическим эффектам токов короткого замыкания.

Таким образом, электрические аппараты и токоведущие части должны соответствовать комплексу строгих требований. К ним относятся способность к продолжительной работе под номинальной нагрузкой без недопустимого износа, способность выдерживать кратковременные перенапряжения и токовые перегрузки, а также поддержание температуры нагрева изоляции в допустимых пределах даже при протекании значительных токов. Кроме того, вся электроустановка должна обладать достаточной механической прочностью, гарантирующей ее целостность и работоспособность в режиме

короткого замыкания. Выбор оборудования также должен учитывать соответствие условиям окружающей среды и основываться на принципах технико-экономической целесообразности. Итоговый перечень выбранных аппаратов защиты, отвечающих данным критериям, систематизирован и представлен в Таблице 20.

Таблица 20 – Выбор аппаратов защиты ГПП 110/10 кВ

Наименование оборудования	Тип	Параметры		
Элегазовый выключатель	ВГТ-110Ш-40/2000	$U_H=110\text{кВ}$		
Разъединитель	РНД(З)-110/2000 – У1	$U_H=110\text{кВ}$		
Трансформатор напряжения 110 кВ	НАМИ-110	$U_{вн.}=110\text{кВ}$		
Трансформатор тока 110 кВ	ТОЛ-110 Ш	$U_H=110\text{кВ}$		
Ограничитель Перенапряжения Нелинейный 110 кВ	ОПНп-110/550/(56-88)-10	$U_H=110\text{кВ}$	$U_{\text{наиб. доп}} = 56-88 \text{ кВ}$	$I_{\text{пропуск.}} = 550 \text{ А}$
Ограничитель перенапряжения нелинейный 10 кВ	ОПНп-10/550/(10,5-12,7)-10	$U_H=10\text{кВ}$	$U_{\text{наиб. доп}} = 10,5-12,7 \text{ кВ}$	$I_{\text{пропуск.}} = 550 \text{ А}$
Выключатель элегазовый серии HD4	ВВЭ-20/1250	$U_H=10\text{кВ}$	$I_H=630-1250 \text{ А}$	$I_{\text{откл.}}=20 \text{ кА}$
Трансформатор тока	ТОЛ-10	$U_H=10\text{кВ}$	$I_{н.п.}=600 \text{ А}$	$I_{н.в.}=5 \text{ А}$
Трансформатор напряжения	НАМИ-10	$U_{вн.}=10\text{кВ}$	$U_{нн.}=200 \text{ ВА}$	
Разъединитель	РЛНД-10/630	$U_H=10\text{кВ}$	$I_H=630 \text{ А}$	

Таким образом, было выбрано основное электрооборудование на ГПП на стороне 110 и 10 кВ, а именно: Элегазовый выключатель ВГТ-110Ш-40/2000, Разъединитель РНД(З)-110/2000 – У1, Трансформатор напряжения 110 кВ НАМИ-110, Трансформатор тока 110 кВ ТОЛ-110 Ш, Ограничитель Перенапряжения Нелинейный 110 кВ ОПНп-110/550/(56-88)-10, Ограничитель Перенапряжения Нелинейный 10 кВ ОПНп-10/550/(10,5-12,7)-10, Выключатель элегазовый серии HD4 ВВЭ-20/1250, Трансформатор тока ТОЛ-10, Трансформатор напряжения НАМИ-10, Разъединитель РЛНД-10/630. [22]

### 6.3 Выбор оборудования ГПП 10кВ на отходящие линии

Для выполнения функций защиты и коммутации в распределительном устройстве закрытого типа на напряжение 10 кВ (ЗРУ-10 кВ) предусматривается применение выключателей среднего напряжения серии HD4. Эти аппараты оснащены боковым приводом, а в качестве среды для гашения электрической дуги и обеспечения надежной изоляции между подвижными и неподвижными контактами в них используется гексафторид серы (SF<sub>6</sub>). Конструктивной особенностью данных выключателей является применение техники отдельных полюсов при их изготовлении.

Ключевым элементом системы распределения электрической энергии на напряжении 10 кВ в пределах предприятия является закрытое распределительное устройство (ЗРУ-10 кВ). Для комплектации данного ЗРУ предлагается использовать современные элегазовые выключатели серии HD4/R, производимые компанией АВВ. Применение таких комплектных решений позволяет существенно оптимизировать сроки, затрачиваемые на проектирование, монтажные и наладочные работы. Исходными данными для выбора оборудования на напряжение 10 кВ служат номинальное напряжение сети  $U_{\text{сети}} = 10$  кВ и расчетное значение периодической составляющей тока короткого замыкания  $I_{\text{по}} = 1,57$  кА (согласно данным Таблицы 20).

Помимо этого, для корректного подбора всего комплекса электрооборудования необходим расчет максимальных токов, характеризующих продолжительный послеаварийный режим работы. Ключевыми параметрами в этом контексте выступают ударный ток короткого замыкания  $i_y = 3,76$  кА и тепловой импульс тока короткого замыкания  $B_K = 4,31$  кА<sup>2</sup>·с (значения взяты из таблицы 19). Для определения параметров оборудования, устанавливаемого, например, в ячейке отходящей линии, питающей КТП-1, производится расчет соответствующего тока с использованием утвержденной методики и расчетных выражений.

$$I_{1 \max} = \frac{1,4 \cdot S_{т.ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} \quad (51)$$

где  $S_{т.ном}$  – номинальная мощность трансформатора КТП, кВА;

$U_{ном}$  – номинальное напряжение сети на стороне ВН, кВ.

Результат расчёта следующий:

$$I_{1max} = \frac{1,4 \cdot 630}{\sqrt{3} \cdot 10} = 51 \text{ A}$$

Ток для вводных ячеек ЗРУ 10 кВ:

$$I_{max} = \frac{1,4 \cdot \left(\frac{6300}{2}\right)}{\sqrt{3} \cdot 10} = 254,91 \text{ A}$$

Секционная ячейка рассчитывается на 50% тока вводной ячейки:

$$I_{max} = \frac{254,91}{2} = 127,455 \text{ A}$$

Условия и результаты выбора аппаратов ЗРУ 10 кВ для рассматриваемого примера представлены в таблице 21. [22]

Таблица 21 – Сводная таблица аппаратов защиты ГПП-10кВ

Тип оборудования	Условие выбора	Расчётные величины	Каталожные данные	Проверка условия
Вводной выключатель HD4/R 12 – 1250	$U_{ном} \geq U_{сети}$ $I_{ном} \geq I_{макс}$ $I_{отк.} \geq I_{по}$ $i_{дин} \geq i_y$ $I_{тс} \cdot t_{тс} \geq B_k$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$ $I_{макс} = 647,39 \text{ A}$ $I_{по} = 2,43 \text{ кА}$ $i_y = 6,59 \text{ кА}$ $B_k = 10,53 \text{ кА}^2\text{с}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 12500 \text{ A}$ $I_{отк.} = 31,5 \text{ кА}$ $i_{дин} = 81 \text{ кА}$ $I_{тс}^2 \cdot t_{тс} = 1200 \text{ кА}^2\text{с}$	$10 \text{ кВ} = 10 \text{ кВ}$ $1250 \text{ A} > 647,39 \text{ A}$ $20 \text{ кА} > 2,43 \text{ кА}$ $51 \text{ кА} > 6,59 \text{ кА}$ $1200 \text{ кА}^2\text{с} > 10,53 \text{ кА}^2\text{с}$

Продолжение таблицы 21

Тип оборудования	Условие выбора	Расчётные величины	Каталожные данные	Проверка условия
Секционный выключатель HD4/R 12 - 800	$U_{ном} \geq U_{сети}$ $I_{ном} \geq I_{макс}$ $I_{отк.} \geq I_{по}$ $i_{дин} \geq i_y$ $I_{тс} \cdot t_{тс} \geq B_k$	$U_{сети} = 10$ кВ $I_{макс} = 323,69$ А $I_{по} = 2,43$ кА $i_y = 6,59$ кА $B_k = 10,53$ кА <sup>2</sup> с	$U_{ном} = 10$ кВ $I_{ном} = 630$ А $I_{отк.} = 31,5$ кА $i_{дин} = 81$ кА $I_{тс}^2 \cdot t_{тс} = 1200$ кА <sup>2</sup> с	$10$ кВ = $10$ кВ $630$ А > $323,69$ А $20$ кА > $2,43$ кА $81$ кА > $6,59$ кА $1200$ кА <sup>2</sup> с > $10,53$ кА <sup>2</sup> с
Выключатель HD4/R 12 – 630 отходящих линий к КТП-1	$U_{ном} \geq U_{сети}$ $I_{ном} \geq I_{макс}$ $I_{отк.} \geq I_{по}$ $i_{дин} \geq i_y$ $I_{тс} \cdot t_{тс} \geq B_k$	$U_{сети} = 10$ кВ $I_{макс} = 80,92$ А $I_{по} = 2,43$ кА $i_y = 6,59$ кА $B_k = 10,53$ кА <sup>2</sup> с	$U_{ном} = 10$ кВ $I_{ном} = 630$ А $I_{отк.в} = 31,5$ кА $i_{дин} = 81$ кА $I_{тс}^2 \cdot t_{тс} = 20^2 \cdot 3 = 1200$ кА <sup>2</sup> с	$10$ кВ = $10$ кВ $630$ А > $80,92$ А $31,5$ кА > $2,43$ кА $81$ кА > $6,59$ кА $1200$ кА <sup>2</sup> с > $10,53$ кА <sup>2</sup> с
Ограничитель перенапряжения ОПН-КР/TEL-10УХЛ1	$U_{ном} \geq U_{сет}$ и	$U_{сети} = 10$ кВ	$U_{ном} = 10$ кВ	$кВ = 10$ кВ

Таким образом, было выбрано основное электрооборудование на ГПП на отходящих линиях 10 кВ, а именно: вводной выключатель элегазовый серии HD4 ВВЭ-20/1250, секционный выключатель HD4 ВВЭ-20/800, выключатель отходящих линий HD4 ВВЭ-20/630, трансформатор тока ТОЛ-10. [22]

Выводы:

Выполнен расчет токов КЗ для выбора аппаратов защиты и проверки термической стойкости оборудования. Рассчитаны периодические и ударные токи КЗ, апериодические составляющие и тепловые импульсы для различных точек сети.

Выбрано основное электрооборудование ГПП и цеховых ТП: выключатели, разъединители, трансформаторы тока и напряжения, ограничители перенапряжений. Выбранное оборудование соответствует требованиям ПУЭ и обеспечивает безопасную эксплуатацию системы электроснабжения. В качестве основного коммутационного оборудования на стороне 10кВ выбраны элегазовые выключатели серии HD4/R, обеспечивающие надежность и компактность.

## 7 Релейная защита системы электроснабжения прокатного цеха

### 7.1 Выбор аппаратов защиты электроустановок 0,4 кВ

В качестве аппаратов защиты электроустановок 0,4 кВ выбраны выключатели автоматические типа АВВ S203 автоматический выключатель 3Р ХХА (D) 6кА от производителя АВВ, которые предназначены для защиты цепей переменного (250/440 В) тока от короткого замыкания и перегрузки. Автомат устанавливается на DIN-рейку. [3]

$$I_p = \frac{P_H}{U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi} \quad (52)$$

где  $P_H$  – полная мощность электроустановки;

$U$  - напряжение в сети;

$\cos\varphi$  – коэффициент мощности.

В качестве примера произведем выбор автоматического выключателя для сборочного станда:

$$I_p = \frac{25}{0,4 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,84} = 43,01 \text{ А}$$

Выбираем автоматический выключатель типа АВВ S203 3Р 63А (D) 6кА х-ка D 6 кА. Все расчеты сведены в таблицу 22. [15]

Таблица 22 – Выбор автоматических выключателей

№ на плане	Наименование ЭП	$P_H$ , кВт	$I_p$ , А	Токоприемник, кВ	Тип авт. выкл
1	Сборочный станд	25	43,01	0,4	АВВ S203 3Р 63А (D) 6кА
2	Паяльная установка	0,8	4,28	0,22	АВВ S201 1Р 16А (D) 6кА
3	Шлифовальные машины	8,2	13,78	0,4	АВВ S203 3Р 20А (D) 6кА

Продолжение таблицы 22

№ на плане	Наименование ЭП	$P_n$ , кВт	$I_p$ , А	Токоприемник, кВ	Тип авт. выкл
4	Установки и стенды для испытания оборудования	32	52,55	0,4	ABB S203 3P 63A (D) 6kA
5	Механизированные сборочные установки	38	63,85	0,4	ABB S203 3P 80A (D) 6kA
6	Подвесной конвейер	12,2	20,99	0,4	ABB S203 3P 32A (D) 6kA
7	Конвейер сборочный	28	47,60	0,4	ABB S203 3P 63A (D) 6kA
8	Пресс гидравлический	8,8	15,51	0,4	ABB S203 3P 25A (D) 6kA
9	Токарные станки	4,5	7,74	0,4	ABB S203 3P 16A (D) 6kA
10	Сварочное оборудование	10,5	18,97	0,4	ABB S203 3P 25A (D) 6kA
11	Вентиляторы	6	10,57	0,4	ABB S203 3P 16A (D) 6kA
12	Компрессор	32	56,39	0,4	ABB S203 3P 80A (D) 6kA

Таким образом, был произведен выбор аппаратов защиты электроустановок 0,4 кВ.

Выводы:

Для данного раздела были выбраны аппараты защиты для электроснабжения приемников прокатного цеха. В качестве аппаратов защиты были выбраны автоматические выключатели марки АВВ S203 3P 32А (D) 6кА. Выбранные выключатели обеспечивают необходимую защиты электрической цепи.

## Заключение

Промышленное предприятие цветной металлургии, рассматриваемое в данном проекте, характеризуется как производственный комплекс с замкнутым технологическим циклом. Этот цикл охватывает все стадии, начиная от добычи и подготовки сырьевых материалов, в частности, шихты в специализированном подразделении, и заканчивая выпуском готовой продукции из цветных металлов и их сплавов. Сложная структура предприятия и многообразие реализуемых технологических операций обуславливают широкий спектр применяемых электроприемников с различными требованиями к электроснабжению. Особое внимание уделено вопросам безопасности, особенно в цехах с повышенным уровнем производственных рисков, например, в штамповочном. Завершающие производственный цикл сборочные операции, оказывающие существенное влияние на качество конечной продукции, также учтены при проектировании системы электроснабжения, несмотря на сложности их нормирования и механизации.

Основным источником энергоснабжения для предприятия служит главная понизительная подстанция (ГПП), получающая питание по двум независимым высоковольтным линиям напряжением 110 кВ. Технико-экономическое обоснование подтвердило целесообразность выбора именно этого уровня напряжения для внешнего электроснабжения. Внутризаводская распределительная сеть спроектирована на напряжение 10 кВ, тогда как для непосредственного питания потребителей в цехах используется стандартное напряжение 0,4 кВ.

Классификация всех электроприемников по трем категориям надежности легла в основу требований к организации резервного питания и выбору общей схемы электроснабжения. В результате была принята схема, предусматривающая двухступенчатую трансформацию (110/10/0,4 кВ), которая обеспечивает требуемый уровень надежности и соответствует

специфике производственных процессов предприятия.

В проекте широко использованы комплектные трансформаторные подстанции (КТПП), при этом цеховые подстанции реализованы как во встроенном, так и в пристроенном исполнении. Защита отходящих линий в распределительных сетях обеспечивается комбинацией выключателей нагрузки и предохранителей. Для питания силового оборудования, включая электродвигатели, и осветительных сетей принято напряжение 380/220 В, что соответствует рекомендациям производителей оборудования и способствует сокращению расхода цветных металлов. Распределение электроэнергии по территории предприятия и внутри цехов осуществляется с использованием радиальных и магистральных схем. Выбранные конструктивные решения для сети гарантируют высокий уровень надежности и безопасности эксплуатации системы электроснабжения.

Определение электрических нагрузок производилось с использованием метода коэффициента спроса, на основе данных об установленной мощности оборудования, коэффициентах спроса и мощности для каждого производственного подразделения. Были рассчитаны как силовые, так и осветительные нагрузки, а также их суммарные значения для каждого цеха. Итоговая расчетная нагрузка на шинах 10 кВ ГПП составила: активная мощность  $P_p = 6464,79$  кВт, реактивная мощность  $Q_p = 4536,84$  кВАр, и полная мощность  $S_p = 7915,26$  кВА. Для иллюстрации, расчетная нагрузка такого подразделения, как сборочный цех, на напряжении 0,4 кВ определена в следующих значениях:  $P_p = 475,64$  кВт,  $Q_p = 295,46$  кВАр,  $S_p = 560,54$  кВА. Полученные расчетные величины нагрузок послужили основой для выбора номинальной мощности трансформаторов и определения сечений кабельной продукции.

На главной понизительной подстанции установлены два силовых трансформатора типа ТМН-6300/110/10 кВА, которые обеспечивают покрытие всей расчетной нагрузки предприятия и необходимое резервирование. С учетом потерь, расчетная нагрузка на шинах 10 кВ ГПП

составила 7091,22 кВА. Цеховые трансформаторные подстанции укомплектованы сухими трансформаторами типа ТСЛ мощностью 400, 630 и 1000 кВА, обеспечивающими питание всех производственных участков с учетом их категории надежности. Электроснабжение потребителей третьей категории надежности осуществляется от ближайших ТП, что позволило снизить капитальные затраты на сооружение избыточных подстанций.

С целью снижения нагрузки на трансформаторы и уменьшения потерь электроэнергии в сети были реализованы мероприятия по компенсации реактивной мощности. Были определены требуемые мощности автоматических установок компенсации реактивной мощности (АУКРМ) на напряжении 0,4 кВ для каждой КТП. Общая установленная мощность компенсирующих устройств на стороне 0,4 кВ достигла 905 кВАр. Внедрение КРМ позволило оптимизировать режим работы сети и снизить коэффициент загрузки трансформаторов до нормативных значений, при этом полная расчетная мощность предприятия с учетом эффекта компенсации составила 7443,29 кВА.

Для воздушной линии электропередачи напряжением 110 кВ был выбран провод марки АС-70/16. Внутривоздушные кабельные линии напряжением 10 кВ выполнены кабелями марки АСБГ-10 с сечениями жил 25 мм<sup>2</sup> и 35 мм<sup>2</sup>. Выбранные сечения проводников и кабелей обеспечивают передачу электроэнергии с допустимыми потерями напряжения и в пределах нормативных температурных режимов, что соответствует требованиям ПУЭ.

Расчет токов короткого замыкания (КЗ) был произведен для корректного выбора защитной аппаратуры и проверки всего электрооборудования на термическую и электродинамическую стойкость. В ходе расчетов были определены значения периодической и ударной составляющих токов КЗ, апериодической компоненты и соответствующих тепловых импульсов для различных характерных точек электрической сети.

На основании проведенных расчетов и анализа было подобрано основное электрооборудование для ГПП и цеховых трансформаторных

подстанций. Этот перечень включает высоковольтные выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы тока и напряжения, а также ограничители перенапряжений. Все выбранное оборудование в полной мере соответствует требованиям ПУЭ и гарантирует безопасную и надежную эксплуатацию проектируемой системы электроснабжения. В качестве главных коммутационных аппаратов на стороне 10 кВ были применены современные элегазовые выключатели серии HD4/R, которые отличаются высокой эксплуатационной надежностью и компактными габаритными размерами.

В качестве аппаратов защиты прокатного цеха были выбраны автоматические выключатели марки ABB S203 3P 32A (D) 6кА. Выбранные выключатели обеспечивают необходимую защиты электрической цепи.

Таким образом, разработанная система электроснабжения отвечает всем требованиям надежности электроснабжения и может быть реализована на практике.

## Список используемой литературы

1. Александров А. А., Некрасов В. М. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 252 с. – ISBN 978-5-8114-6848-6.
2. Алиев И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: учебное пособие. – 12-е изд., стер. – Москва: ИНФРА-М, 2022. – 255 с. – ISBN 978-5-16-017407-1.
3. Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебник. – 6-е изд., стер. – Москва: Высшая школа, 2009. – 639 с. – ISBN 978-5-06-005320-3.
4. Буторин В. А. Электрические нагрузки и электропотребление промышленных предприятий: учебное пособие. – Москва: ИНФРА-М, 2021. – 240 с. – ISBN 978-5-16-015840-8.
5. Веников В. А., Глазунов А. А., Жуков Л. А. Электрические системы. Т. 1. Электрические сети: учебник. – Москва: Высш. шк., 1998. – 511 с. – ISBN 5-06-003485-8.
6. ГОСТ 12.1.030-81. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление: дата введения 1982-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 27 с.
7. ГОСТ 31996-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия: дата введения 2014-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 75 с.
8. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: дата введения 2014-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
9. ГОСТ IEC 60909-3-2016. Короткие замыкания в электроустановках переменного тока. Часть 3. Расчет токов двухфазного короткого замыкания на землю в трехфазных сетях переменного тока и

однофазного короткого замыкания на землю в трехфазных и однофазных сетях: дата введения 2017-10-01. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 56 с.

10. ГОСТ Р 50571. Электроустановки низковольтные: комплекс стандартов. – Введ. в действие с разл. дат. – Москва: Стандартинформ.

11. ГОСТ Р 52719-2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия: дата введения 2008-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 81 с.

12. ГОСТ Р 58622-2019. Трансформаторы силовые. Руководство по эксплуатации: дата введения 2020-06-01. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 74 с.

13. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. – Москва: ЭНАС, 2009. – 456 с. – ISBN 978-5-93196-945-8.

14. Зюзев А. М. Системы электроснабжения: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 344 с. – ISBN 978-5-507-46195-0.

15. Карантиров В. И. Релейная защита и автоматизация систем электроснабжения: учебник. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 372 с. – ISBN 978-5-8114-9035-7.

16. Киреева Э. А., Аракелян В. Д. Электроснабжение объектов: учебник. – Москва: ИНФРА-М, 2020. – 304 с. – ISBN 978-5-16-014280-3.

17. Конюхова Е. А. Электроснабжение объектов: учебник. – 10-е изд., стер. – Москва: Академия, 2014. – 320 с. – ISBN 978-5-4468-0670-5.

18. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: ИНФРА-М, 2022. – 398 с. – ISBN 978-5-16-016607-6.

19. Макаров Е. Ф. Расчет и проектирование систем электроснабжения: учебное пособие. – Москва: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2021. – 287 с. – ISBN 978-5-00091-734-7, ISBN 978-5-16-016610-6.

20. Неклепаев Б. Н., Крючков И. П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и

дипломного проектирования: учебное пособие. – 6-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 664 с. – ISBN 978-5-8114-7607-8.

21. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – Москва: [б. и.], 2003–2023. – (Актуальная редакция глав по состоянию на 01.01.2024).

22. Рожкова Л. Д., Карнеева Л. К., Чиркова Т. В. Электрооборудование электрических станций и подстанций: учебник. – 8-е изд., стер. – Москва: Академия, 2013. – 448 с. – ISBN 978-5-7695-9709-9.

23. СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа: дата введения 2017-06-25: утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 29 августа 2016 г. № 602/пр с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5. – Текст: электронный // КонсультантПлюс: справочно-правовая система (дата обращения: 02.05.2025).

24. Ушаков В. Я. Режимы энергосистем: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 248 с.

25. Федоров А. А., Каменева В. В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.