

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 Разработка системы электроснабжения металлургического завода

Студент

Д.С. Водяницкий  
(И.О. Фамилия)

---

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, И.В. Горохов  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

---

## Аннотация

Металлургия – одна из ведущих отраслей экономики, играющая важную роль в развитии многих других сфер: машиностроения, судостроения, строительства и так далее. Продвижение вперед в области металлургии открывает новые горизонты для индустриализации страны и является важной государственной задачей.

Россия обладает большим потенциалом и перспективами в этой отрасли. Но для их реализации, необходимо создать современную систему электроснабжения с применением новых технологий и оборудования. Это позволит повысить качество продукции, эффективность производства и улучшить условия труда для работников. Также это поможет снизить себестоимость продукции.

Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка системы электроснабжения металлургического завода.

Для реализации данной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. анализ и изучение специализированной литературы, относящейся к теме бакалаврской работы;
2. разработать проект по обеспечению электроэнергией металлургического завода;
3. провести анализ нормативной документации по охране труда и электробезопасности на предприятии.

Данная бакалаврская работа содержит пояснительную записку объемом 78 стр., содержит 21 таблицу, 5 рисунков, а также графическую часть на 6-ти листах в формате А1.

## Содержание

Введение.....	4
1 Общие сведения о предприятии.....	7
1.1 Особенности и характеристика металлургического производства	8
1.2 Требования к проектируемому объекту .....	14
2 Разработка системы электроснабжения завода .....	17
2.1 Подбор электрических схем электроснабжения предприятия.....	17
2.2 Определение расчетных нагрузок .....	26
2.3 Определение оптимального количества и мощности трансформаторов с учетом компенсации реактивной мощности .....	36
2.4 Подбор кабеля и его сечений для системы электроснабжения....	45
2.5 Расчет ТКЗ и подбор коммутационной и защитной аппаратуры	51
3 Разработка системы электроснабжения для цеха холоднокатаной продукции .....	62
4 Молниезащита и заземление электроустановок системы электроснабжения .....	67
5 Требования охраны труда .....	72
5.1 Электробезопасность.....	73
Заключение .....	74
Список используемых источников.....	76

## Введение

Развитие промышленности является одной из важнейших задач экономического роста и технологического прогресса в мире. В данном контексте металлургическая отрасль занимает ключевое место, поскольку продукция металлургических предприятий служит основой для множества других отраслей, таких как машиностроение, строительство, энергетика и транспорт. Эффективность работы металлургического производства во многом определяется надежностью и качеством его энергоснабжения. Ввиду вышеизложенного, разработка системы электроснабжения металлургического завода является актуальной задачей в наше время.

Само по себе предприятие данного типа характеризуется высокой энергоемкостью, поскольку технологические процессы плавки, литья, прокатки и обработки металлов требуют значительных затрат электроэнергии. В связи с этим надежное, бесперебойное и экономически обоснованное электроснабжение является критически важным для обеспечения непрерывности производства и повышения его эффективности. В современном мире, с внедрением автоматизированных систем управления и повышения требований к энергетической безопасности возрастает необходимость разработки оптимальных схем электроснабжения, учитывающих как технические, так и экономические аспекты.

Цель данной работы заключается в разработке системы электроснабжения металлургического завода с учетом современных требований к надежности, энергоэффективности и экономической целесообразности. Для достижения цели работы требуется выполнить следующие задачи:

- привести краткую характеристику проектируемого предприятия;
- разработать схему расположения производственных помещений на территории предприятия;

- разработать схему электроснабжения, которая будет обеспечивать надежность и эффективность энергопотребления;
- произвести расчет нагрузок, необходимый для определения устройств защиты сети;
- подобрать необходимое оборудование с учетом его мощности и других характеристик;
- произвести расчеты токов короткого замыкания;
- разработка предложений по молниезащите и заземлению оборудования;
- определение требований по охране труда и электробезопасности.

Объектом исследования является система электроснабжения металлургического завода, включающая в себя «кабельные линии, трансформаторные подстанции» [14], распределительные устройства, системы управления и защиты.

Предметом исследования выступают принципы построения и функционирования системы электроснабжения, методы повышения ее надежности и эффективности, а также современные технологии в области энергоснабжения промышленных предприятий.

В ходе выполнения бакалаврской работы будут использованы методы научно-технического анализа, математического моделирования и сравнительного анализа для исследования системы электроснабжения.

Актуальность выбранной темы заключается в разработке оптимизированной схемы электроснабжения металлургического завода с учетом современных технологий управления энергопотреблением и интеграции альтернативных источников энергии. В рамках работы будет проведен анализ существующих решений, предложены усовершенствованные методики расчета нагрузок и оптимизации энергопотребления.

Так же, данная работа имеет практическую значимость. Разработанные решения могут быть применимы для проектирования и модернизации систем электроснабжения металлургических предприятий, что позволит повысить их энергетическую эффективность, снизить затраты на электроэнергию и минимизировать потери в электрических сетях.

По структуре, работа состоит из аннотации, введения, основной части, заключения, списка литературы и приложений. В первой главе рассматриваются общие сведения о металлургическом предприятии, его особенности и характеристика, классификация и основные требования. Вторая глава посвящена непосредственно разработке системы электроснабжения с расчетной частью и подбором схем и электрооборудования, исходя из полученных расчетов. В третьей главе представлена разработка системы электроснабжения для отдельного цеха металлургического завода. Четвертая глава включает в себя сведения по молниезащите и заземлению всех имеемых электроустановок. В пятой главе описаны требования по охране труда и электробезопасности. В заключительной части приводятся выводы по данной работе.

Таким образом, в данной работе будет предложено комплексное решение по электроснабжению металлургического завода, учитывающее современные тенденции в области энергетики и обеспечивающее повышение эффективности производства.

## 1 Общие сведения о предприятии

Металлургический завод представляет собой предприятие с полным циклом производства. На таких заводах происходит превращение руды и других материалов в металлы и металлические сплавы.

В зависимости от используемого сырья, металлургическая промышленность делится на чёрную и цветную. Чёрная металлургия охватывает производство металлов, содержащих железо, марганец и хром, а цветная включает все остальные металлы.

Существует несколько типов металлургических предприятий:

– Комбинаты полного цикла. Это объединение производственных мощностей, которые охватывают весь процесс – от добычи руды до изготовления проката. Обычно такие комбинаты строят рядом с месторождениями железной руды или коксующегося угля.

– Предприятия вторичной металлургии. Специализируются на переплавке металлолома. Такие заводы часто располагаются вблизи центров машиностроения.

– Заводы малой металлургии. Занимаются производством металла в литейных цехах, расположенных на территории машиностроительных предприятий.

Металлургия охватывает несколько ключевых этапов, начиная от добычи сырья и заканчивая производством конечной продукции. В основе лежит переработка природных материалов и других продуктов, содержащих металлы, с целью получения различных металлических сплавов. Обработка металлов, будь то горячее или холодное воздействие, позволяет создавать металлопрокат для последующего использования в разных отраслях.

В зависимости от исходного сырья, металлургическая промышленность подразделяется на чёрную и цветную. Чёрная металлургия сосредоточена на обработке металлов, включающих железо,

марганец и хром, в то время как цветная охватывает все остальные виды металлов.

Производственные процессы на металлургических предприятиях могут быть полными или неполными. Заводы полного цикла занимаются производством чугуна, стали и проката, в то время как предприятия с неполным циклом специализируются на выпуске стали и проката или только проката.

Среди характерных особенностей металлургических предприятий следует выделить значительные объёмы производства, обширные территории и тесную взаимосвязь между основными технологическими процессами. Это создаёт сложные взаимосвязи, обеспечивая эффективное функционирование производственной системы.

Продукция металлургических заводов классифицируется на основную (конечный продукт), побочную (образующуюся в процессе производства основных изделий) и попутную (остающуюся после изготовления основной и побочной продукции, пригодную для вторичного использования).

Важность металлургических производств трудно переоценить – они обеспечивают металлом и готовыми металлоизделиями широкий спектр отраслей, включая тяжёлое и точное машиностроение, строительство, оборонную промышленность и другие ключевые сферы деятельности.

## **1.1 Особенности и характеристика металлургического производства**

Металлургическое производство представляет собой сложный комплекс технологических операций, в котором исходные материалы подвергаются химическим и механическим воздействиям для получения продукции с заданными характеристиками. Система электроснабжения для такого предприятия должна обеспечивать бесперебойную работу

оборудования всех цехов, которые отличаются по типу, мощности и требованиям к электроэнергии.

На проектируемом объекте располагаются цеха и помещения различного назначения, каждый из которых имеет свои особенности с точки зрения технологического процесса. Полный перечень помещений с кратким описанием функций и установленной мощностью представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень помещений предприятия

Наименование производственного помещения	Описание	Руст, кВт
Цех холоднокатаной продукции 1	Выполняет холодную прокатку металла в рулоны и листы. Метод холодной прокатки позволяет получить изделия высокой прочности и разнообразной толщины.	4772
Цех трансформаторной стали	Цех производит специальный вид стали, которая применяется при производстве компонентов трансформаторов. Производимый материал обладает высоким уровнем износостойкости.	3312
Цех производства горячекатаного проката	Прокатка металла при высокой температуре. Данная технология прокатки позволяет придавать металлу различные характеристики, необходимые для дальнейшего производства.	2912
Цех холоднокатаной продукции 2	Аналогичен цеху Цех холоднокатаной продукции №1.	10812
Листоотделочный цех	Цех специализируется на первичной обработке металлических изделий (резка, отделка) для дальнейшего производства.	4012
Трубоэлектросварочный цех 1	Производство специальных электросварных труб различных размеров и толщины.	2376
Трубоэлектросварочный цех 2	Аналогичен трубоэлектросварочному цеху 1.	2066
Ремонтный блок	Совокупность помещений, в котором производятся общезаводские ремонтные мероприятия.	3179
Купоросная	Помещение для производства меди из химических веществ.	825
ЦЗЛ и административное здание	ЦЗЛ выполняет контроль производимой продукции, а в административном здании находятся офисные помещения.	428
Механоремонтный цех	Помещение, в котором производится ремонт и обслуживание различных механизмов и оборудования.	498

Продолжение таблицы 1

Наименование производственного помещения	Описание	Руст, кВт
Насосная	Небольшое помещение, с расположенными внутри насосами, для обеспечения охлаждения и циркуляции воды в процессе производства.	470
Гальванический цех	Цех, где проводят процесс гальванизации (покрытие металла слоем другого металла).	660
Склад снабжения	Место для хранения товарно-материальных ценностей (ТМЦ) предприятия.	46
Вальцетокарный цех	Цех, где металл подвергается деформации, для получения нужной формы изделия.	1457
Блок химических установок	Цех, в котором производится анодирование, травление и другие процессы изменения свойств металла в результате химических реакций.	270
Хранилище для мазута	Помещение для хранения мазута или другого жидкого топлива.	400
Электроремонтный цех	Цех, в котором производятся ремонтные работы электрооборудования (генераторы, электродвигатели).	468
Кислородно-компрессорный цех	Помещение, оборудованное компрессорной установкой, которая необходима для подачи сжатого воздуха для производства.	3520

Расположение помещений на территории предприятия представлена на рисунке 1.

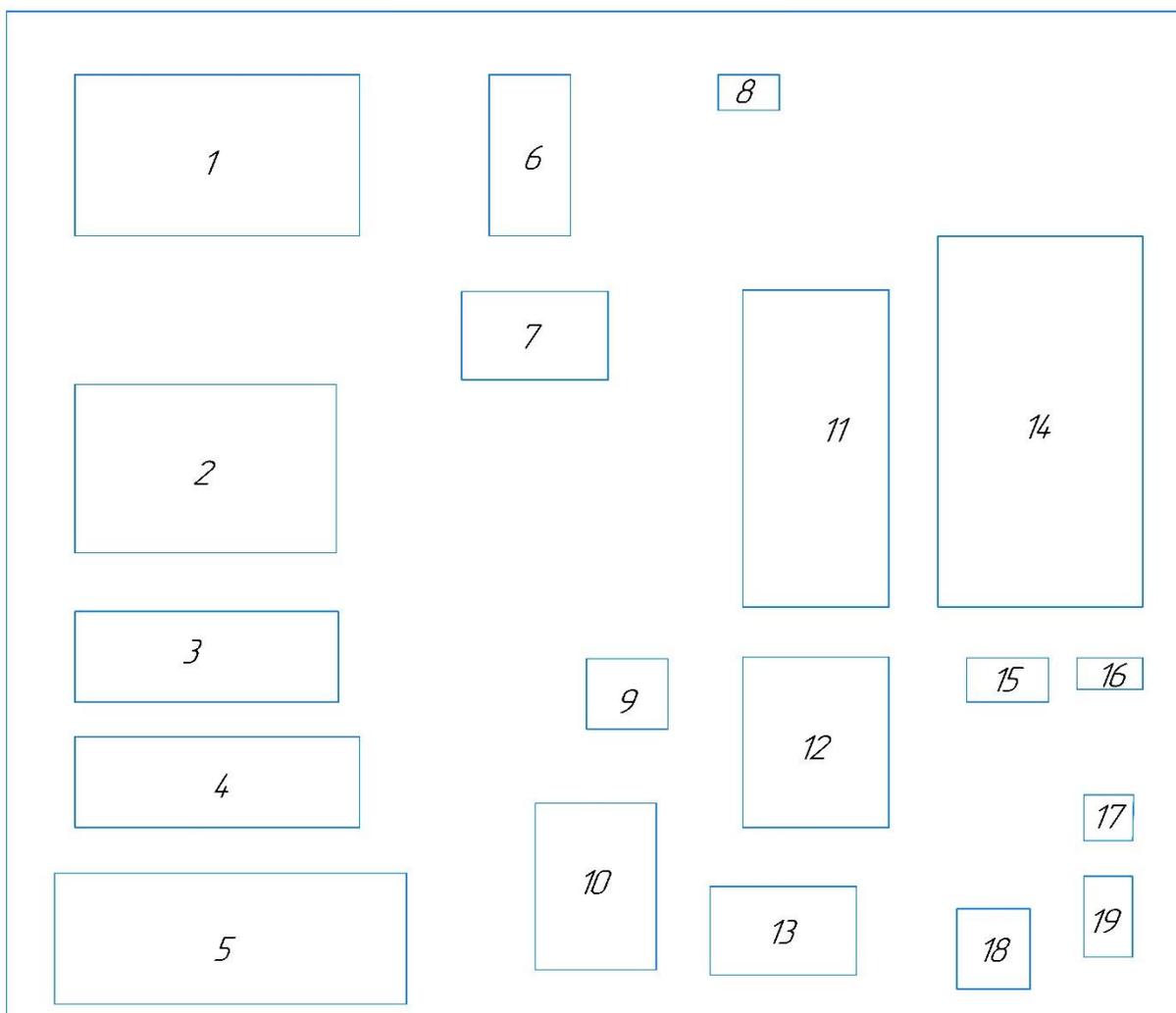


Рисунок 1 – Расположение помещений/цехов на территории металлургического завода

Металлургические процессы являются одними из самых энергоемких в промышленности. Для данного заводского комплекса потребности в электроэнергии будут определяться мощностью оборудования каждого цеха.

Как правило, на данном типе предприятий плавка и горячая прокатка, являются самыми энергоемкими процессами, так как операция требует большого количества энергии для нагрева металла. Холодная прокатка требует меньших затрат энергии.

«Основными потребителями электроэнергии на предприятии являются электродвигатели с напряжением 380 В, которые приводят в

движение компрессоры, насосы, вентиляторы, станочное оборудование. В свою очередь, высоковольтными электропотребителями металлургического цеха являются синхронные двигатели и индукционные печи» [12]. Перечень высоковольтного оборудования представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Перечень высоковольтного оборудования на предприятии

Наименование цеха или помещения	Оборудование
Цех холоднокатаной продукции № 1	ИЧТ-2,5/ 0,4 ИС1
	ИЛТ-10/ 1,6 ИС1
Цех холоднокатаной продукции № 2	СДН32-20-49-20 УХЛ4
Листоотделочный цех	СДМ4-1250К-32 УХЛ4
Трубоэлектросварочный цех 1	СДМ4-1250К-32 УХЛ4
Трубоэлектросварочный цех 2	СДН32-20-49-20 УХЛ4
Кислородно-компрессорный цех	СДН32-20-49-20 УХЛ4

Для питания высоковольтного оборудования электроприемники подключаются к трансформаторным подстанциям, которые находятся в цехах с НВС (High Voltage Consumers – высоковольтный потребитель). Также возможно питание ВН электроприемников от шин главного распределительного пункта (ГРП), если они расположены вблизи. Защита двигателей обеспечена с помощью предохранителей или релейной защиты (РЗ), которая воздействует на отключающие устройства (автоматы, контакторы, выключатели). Для хорошей электрозащиты двигателей комплектующие СД оснащаются релейной защитой от всевозможных разновидностей повреждений, таких как «многофазные КЗ, как в самом двигателе, так и на его вводах, однофазные замыкания на землю, перегрузки, падение напряжения и асинхронный режим работы. Для этого используется максимальная токовая отсечка или продольная дифференциальная защита» [1]. План предприятия с нанесенными кабельными линиями (с разделением по напряжению) и

трансформаторными подстанциями внутри цехов представлена на рисунке 2 и чертеже 1.

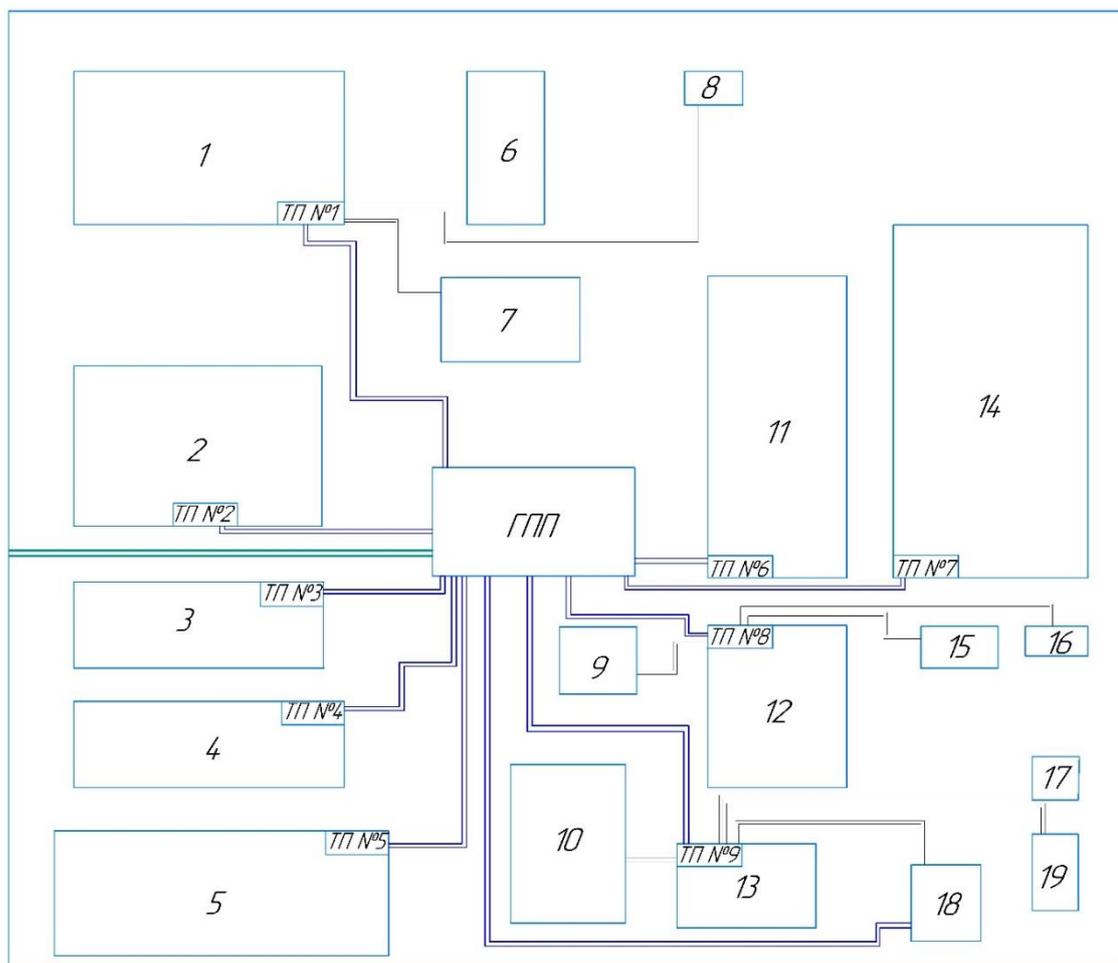


Рисунок 2 – Расположение ГПП и кабельных линий на территории металлургического завода

Основная часть цехов относится к первой категории электроснабжения около 55%, к второй категории – 30%, к третьей – 15%. Распределение цехов по категории надежности представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Распределение цехов по категории надежности

Категория надежности	Название цеха или помещения
Первая	Цех холоднокатаной продукции № 1
	Цех трансформаторной стали

Продолжение таблицы 3

Категория надежности	Название цеха или помещения
Первая	Цех производства горячекатаного проката
	Цех холоднокатаной продукции №2
	Листоотделочный цех
	Трубоэлектросварочный цех №1
	Трубоэлектросварочный цех №2
	Ремонтный блок
	Насосная
	Гальванический цех
Вторая	Купоросная
	ЦЗЛ и административное здание
	Механоремонтный цех
	Вальцетокарный цех
	Блок химических установок
	Электроремонтный цех
	Кислородно-компрессорный цех
Третья	Хранилище для мазута
	Склад снабжения

В данном разделе проанализированы особенности и характеристика металлургического предприятия, определены цеха и категории потребителей.

## 1.2 Требования к проектируемому объекту

Создание системы электроснабжения металлургического завода требует строгого соблюдения норм и стандартов, регулирующих проектирование, эксплуатацию и безопасность энергетических систем на промышленных объектах. Основными документами, определяющими

требования к проектированию, надёжности и безопасности электроснабжения, а также качеству электроэнергии, являются ГОСТы, СНиПы и ПУЭ (Правила устройства электроустановок).

Электроснабжение промышленных предприятий должно соответствовать нормативным требованиям для обеспечения безопасности, эффективности и стабильности работы оборудования. Проектируемая система электроснабжения соответствует следующим стандартам: ГОСТ 21.612-2013 «Система проектной документации для строительства. Электроснабжение. Правила проектирования»; ПУЭ; СНиП 3.05.06-85 «Электрические устройства»; ГОСТ 33.1001-2015 «Системы электроснабжения предприятий. Общие требования»; ГОСТ 32144-2013 - «Электрические установки. Требования к качеству питания электрооборудования».

Эти документы устанавливают параметры системы электроснабжения, такие как выбор сечения проводников, типы и размещение оборудования, защита от коротких замыканий и защита персонала. Важно, чтобы проект электроснабжения соответствовал нормам и требованиям энергоэффективности и безопасности.

Критически важным показателем для нормальной работы металлургического завода является качество электроснабжения. Нарушения данного показателя, а именно качества питания, могут привести к сбоям в работе оборудования, его повышенному износу и риску повреждения дорогостоящих устройств.

Напряжение, которое подается на электроприемники, должно соответствовать номинальному значению. Большинство промышленных объектов потребляет напряжение, равное 380 В (для трехфазных систем) и 220 В (для однофазных). Нормативная документация (ПУЭ и ГОСТ 32144-201) допускает отклонение от номинальных значений напряжения не более 10% от номинала.

Стандартное значение частоты тока в России составляет 50 Гц. Значительные отклонения от этого значения могут нарушить работу электрооборудования, в особенности электродвигателей и высокочастотных устройств. Допустимое отклонение от номинальной частоты составляет не более 1%.

Отклонения от номинальных значений напряжения и частоты в электросети должны быть допустимыми. Крайне необходимо соблюдение предельных значений отклонений, установленных в ГОСТ 32144-2013, дабы исключить риски повреждения электрооборудования. Например, резкие колебания напряжения или частоты могут вызвать перегрев и/или короткие замыкания (далее – КЗ).

Также следует учитывать гармонические искажения в электросети. Они могут вызывать дополнительные потери в электрооборудовании, которые снижают его эффективность. Для металлургического предприятия нормы для гармонических искажений не должны превышать 5% от номинальных значений, они регулируются в рамках ГОСТ 32144-2013.

Чтобы обеспечить высококачественное электроснабжения металлургического завода нужно установить соответствующие фильтры и стабилизаторы напряжения, а также системы мониторинга и контроля для того, чтобы гарантировать стабильность параметров электроснабжения на всех этапах технологического процесса.

В данной главе были рассмотрены особенности производства на металлургических заводах, его характеристики. Помимо этого, было определены основные требования к данному проектируемому объекту, что, в свою очередь, позволит в полной мере произвести точные и корректные расчеты для разрабатываемой системы электроснабжения.

## **2 Разработка системы электроснабжения завода**

Создание системы электроснабжения для металлургического предприятия – задача не из лёгких, но она имеет огромное значение. В её решении требуется проявить как глубокие технические знания, так и способность к новаторскому мышлению.

Эффективность работы промышленного предприятия во многом зависит от качественного электроснабжения. Оно определяется такими важными характеристиками, как надёжность, экономичность и электромагнитная совместимость. Поскольку металлургические заводы России используют более 20% всей производимой электроэнергии, вопросы надёжности и экономичности их электроснабжения становятся особенно актуальными.

Главная цель проекта – разработать стабильную и рентабельную систему энергоснабжения, которая сможет выдерживать высокие нагрузки и обеспечивать бесперебойную работу производственных процессов.

### **2.1 Подбор электрических схем электроснабжения предприятия**

В данном разделе необходимо выбрать схемы электрических соединений проектируемой «системы электроснабжения металлургического завода» [1], основываясь на исходных данных, а также на нормах и стандартах, указанных в предыдущей главе. Одно из требований – надёжность сети системы электроснабжения. Это требование определяется категорией потребителей. В «системе электроснабжения металлургического завода преобладают потребители I и II-й категории по надёжности электроснабжения, следовательно, для обеспечения питания необходимо иметь два независимых ИП» [6].

Выяснив необходимое число источников питания, надо выбрать их тип (ГПП, ЦРП или РП). Снабжение объекта электроэнергией может

осуществляться от ПС.

На данном этапе рассматриваются три типа ИП, а именно:

- «питание от центрального распределительного пункта (далее – ЦРП)» [1];
- «питание от распределительного пункта (далее – РП)» [1];
- «питание от главной понизительной подстанции (далее – ГПП)» [1].

Исходя из требований к данной преддипломной практике, был сделан выбор в пользу ГПП. Такой элемент системы электроснабжения крупного предприятия, в данном случае, металлургического, является ключевым, потому как главная понизительная подстанция – связующее звено между внешними источниками электрических сетей энергосистемы и внутренними распределительными сетями предприятия. Функции, которые выполняет ГПП, такие как:

- преобразование высокого напряжения от 110-220 кВ и выше до среднего, равного 6-35 кВ, для дальнейшего распределения внутри предприятия;
- обеспечение бесперебойности и стабильного электроснабжения всех технологических процессов посредством питания каждой секции по отдельности и секционирования шин ГПП;
- обеспечение надежности электроснабжения, что включает в себя резервирование питания отдельных категорий потребителей за счет двухцепных ЛЭП и установки нескольких силовых трансформаторов;
- коммутация и защита сетей с использованием устройств релейной защиты, выключателей и разъединителей.

Секционирование всех шин системы электроснабжения подразумевает монтаж автоматического ввода резерва (далее – АВР), что делает возможным разделить работу каждого из элементов, тем самым снижая уровень токов КЗ и упрощая релейную защиту.

Другие два типа источников питания (ЦРП и РП) не подходят под

указанные в ТЗ ввиду отсутствия функции понижения напряжения. ЦРП и РП не могут принимать электроэнергию от внешних высоковольтных линий (110 кВ и выше), а после понижать ее до необходимого уровня. Также РП и ЦРП не могут служить первичными ИП, они лишь распределяют уже пониженное напряжение по внутренней сети предприятия. Следующим аргументом против выбора данных типов ИП в качестве основного источника будет отсутствие достаточной мощности и резервирования, что наоборот предусмотрено в ГПП. Центральный распределительный пункт распределяет электроэнергию от главной понизительной подстанции, в свою очередь, распределительный пункт передает эту электроэнергию непосредственно к конечным потребителям. Подводя итог из вышеизложенного, ГПП является единственно подходящим ИП, обеспечивающее надежное электроснабжение от внешней энергосистемы, так как РП и ЦРП выполняют вспомогательную роль в распределении электроэнергии внутри предприятия.

Далее необходимо определить предварительное номинальное напряжение  $U_n$ . Для этого применяется «формула Илларионова» [12]:

$$U_n = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L} + \frac{2500}{P}}}, \quad (1)$$

где  $L$  – «длина питающей линии, км» [12];

$P$  - «передаваемая мощность в сети, МВт» [12].

«По условию (1) для ГПП металлургического завода» [1]:

$$U_n = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{20} + \frac{2500}{34737}}} = 197,2 \text{ кВ.}$$

Исходя из полученного результата, было выбрано значение в 220 кВ, как номинальное напряжение.

При показателях, указанных выше, принимается напряжение 10 кВ, так как оно будет эффективнее и целесообразнее в экономическом плане по сравнению с 6 кВ.

Также «для питания электродвигателей и осветительных установок 380/220 В выбран прием напряжения в 380 В в качестве внутрицехового напряжения для питания ЭП ниже 1кВ» [1].

Следующим этапом станет выбор схем ГПП. Подстанция подключается к концу питающей линии, соответственно, «способ присоединения ГПП к питающей линии является тупиковым» [6]. Поэтому в большей степени подходящим и рациональным будет выполнение РУ-220 кВ ГПП по схеме «два блока линия-трансформатор с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны ЛЭП» [6]. Такого рода чертеж отличается значительной надежностью при производственных работах в любое время года «по сравнению со схемой с отделителями и короткозамыкателями» [6]. Обратив внимание на однолинейную схему (ОС) распределительного устройства РУ-220 кВ на рисунке 3, можно наблюдать перемычку, которая поможет поддерживать работу обоих трансформаторов в случае неисправности одной из питающих линий. Такое проектное решение также предоставит возможность продолжать запитывать ГПП при ремонте силового трансформатора.

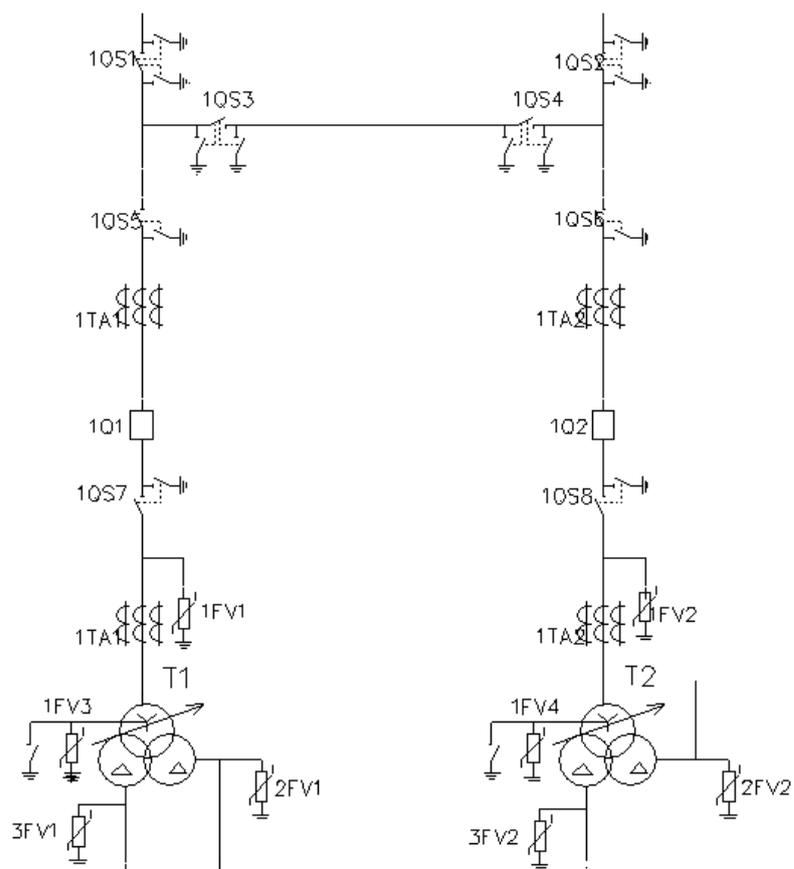


Рисунок 3 – Схема РУ-220 кВ ГПП

На графическом листе 1 показано местоположение строительства ГПП. Главная понизительная подстанция находится в центре электрических нагрузок, так как такое местоположение наиболее целесообразное.

После выбора основных схем ГПП необходимо определить, какие схемы использовать для внутривозводской сети.

Схемы внутренней сети металлургического предприятия отличаются значительным количеством разветвлений и наличием довольно большого разнообразия коммутационно-защитной аппаратуры. Это оказывает существенное воздействие на такие параметры, как техноэкономические и на долговечность системы электроснабжения.

«Чтобы разработать наиболее эффективную систему распределения электроэнергии, необходимо учесть множество аспектов. Важно обратить внимание такие аспекты, как конструкцию элементов сети, способ передачи

энергии, а также токи короткого замыкания при различных вариантах и т.д.» [1].

При проектировании схемы не менее важное значение имеют «правильные решения вопросов, связанные с питанием силовых и осветительных нагрузок в ночное время, в выходные и праздничные дни» [12]. Также «рекомендуется использовать шинные и кабельные перемычки между ближайшими подстанциями, такие же перемычки рекомендуется использовать и между концами сетей низшего напряжения» [12], которые запитываются от разных трансформаторов. Это обеспечит взаимное резервирование.

Обычно внутрицеховые схемы распределения на предприятиях имеют узловую структуру. Применение многоступенчатых (два и более узла/ступени) схем не рекомендуется, так как это усложняет коммутацию и защиту сети. На маломощных предприятиях стоит использовать для дальнейшей эксплуатации такой вид электросхем, как одноступенчатые.

Для обеспечения бесперебойной работы предприятия важно грамотно организовать систему распределения электроэнергии. Каждый «приемник электроэнергии разных параллельных технологических потоков должен получать питание от отдельного источника: подстанции, распределительного пункта или разных секций шин одной подстанции» [12]. Это необходимо для того, чтобы в случае аварии не остановился весь производственный процесс.

«В то же время взаимосвязанное технологическое оборудование, т. е. электрооборудование, питающееся от одной секции шин, обязано быть подключено к одному источнику питания, так как в случае отключения электричества все приёмники электроэнергии будут обесточены одновременно» [15].

«При разработке общей схемы электроснабжения предприятия требуется учет нескольких факторов. Во-первых, следует стремиться к рациональному использованию ячеек распределительных устройств. Во-

вторых, необходимо минимизировать длину распределительной сети. И в-третьих, нужна максимальная экономия коммутационно-защитной аппаратуры» [6].

В наше время можно выделить целых три типа схем распределения электрической энергии внутри завода: «магистральная, радиальная и смешанная» [6]. Каждая из них определяется конкретным классом надежности потребителей электроэнергии и собственной спецификой режимов работы.

Далее рассмотрим все варианты чертежей для того, чтобы определить необходимый, исходя из требований и стандартов, относящихся к теме данной преддипломной практики.

В радиальных схемах электрическая энергия передается напрямую от ИП к приемному пункту. Зачастую используют одно- или «двухступенчатые радиальные схемы» [5].

«На маленьких предприятиях малой или средней мощности используют одноступенчатые радиальные схемы» [12] для обеспечения электричеством узловых потребителей, которые располагаются во всех направлениях от источника питания. «Такие схемы обеспечивают полное секционирование всей системы электроснабжения» [12].

«Осуществление питания больших, и не только, подстанций, либо распределительных пунктов (РП), с потребителями I категории происходит не менее чем по 2 радиальным линиям, которые отходят от разного рода секций ИП» [15].

Таким образом, если на ПС нет потребителей I и II категорий, и, если будет возможность быстро отремонтировать на линии, то однострансформаторные электроустановки (400-630 кВ-А) получают «питание по одиночным радиальным линиям без резервирования» [12]. «При нахождении на производственном участке потребителей II категории обособленные подстанции должны запитываться с помощью двухкабельной линии с разъединителями на каждом кабеле» [6].

Второй тип радиальных схем, а именно двухступенчатые РС с промежуточными кроссами применяют на мощных и среднечастотных промышленных предприятиях. Запитывание крупных пунктов электропотребления происходит через РП из соображений целесообразности. Такое решение позволяет оптимизировать нагрузку на основной центр питания, в который монтированы дорогостоящие ячейки РУ. Такой вариант подключения помогает избежать перегрузки ЦП немалым количеством мелких отходящих линий. Питание подается на цеховые ПС от вторичных распределительных пунктов без использования системы шинпроводов высшего напряжения. В таких случаях используется глухой ввод трансформаторов, либо устанавливается выключатель/разъединитель и т.п., а коммутационно-защитное оборудование устанавливается сразу на распределительные пункты.

Магистральные схемы, в отличие от радиальных, применяются при большом количестве потребителей. Самое главное преимущество выбора именно такого типа – это уменьшение количества звеньев коммутации, а также при месторасположении электроподстанции на территории предприятия, довольно схожем к линейному, укорачивается длина линий за счет прямолинейного прохождения магистралей от ИП к потребителям.

«Однако, несмотря на существенное превосходство, у данных схем есть весомый недостаток, а именно довольно невысокая надежность в сравнении с радиальными схемами» [15]. «Этот минус обуславливается невозможностью зарезервировать систему на низшем напряжении однострановых ПС ввиду питания их по одной магистрали» [1]. «Рекомендуемое количество запитанных от одной магистрали трансформаторов:

- два-три (не более) трансформатора мощностью 2500-1000 кВ-А;
- четыре-пять (не более) трансформатора мощностью 630-250 кВ-А» [1].

«Как и в двухступенчатых радиальных схемах питания цеховых

подстанций, так и в магистральных используют более дешёвую коммутационную аппаратуру в виде выключателя нагрузки или разъединителя, их устанавливают на вводе к трансформатору» [12]. Чтобы заранее предугадать какие-либо нарушения работы трансформаторов при обесточивании поврежденного, устанавливается предохранитель типа ПК. Подобный предохранитель монтируется последовательно с разъединителем или выключателем нагрузки, такое присоединение и обеспечивает избирательное отключение трансформатора.

Вышеупомянутые типы схем имеют свои преимущества и недостатки. Неоднократно на практике использовался и используется смешанный тип, потому что при разработке такого чертежа под конкретное предприятие сочетаются преимущества как радиальных, так и магистральных схем, обеспечивая наилучшие техникоэкономические показатели.

При нахождении на объекте нагрузок первой категории их питание обеспечивается как минимум двумя независимыми радиальными линиями. «Трансформаторные подстанции, которые имеют два трансформатора, следует подключать к разным секциям главной понижающей подстанции (ГПП). Для обеспечения непрерывности питания на стороне вторичного напряжения таких подстанций устанавливается система автоматического ввода резерва (АВР) с использованием секционного автомата» [12].

«Магистральные схемы особо действенные при равномерно распределённых нагрузках, когда месторасположение ПС похоже на линейное на территории завода. Таким образом есть возможность более прямой прокладки магистралей от ГПП к ТП/РП без длинных обходов» [12]. Это делает возможным минимизацию потерь энергии и обеспечивает более надёжное электроснабжение. «Подключение близлежащих трансформаторных подстанций (ТП) к различным магистральным линиям повышает надёжность электроснабжения» [12].

При нахождении ТП рядом с распределительными пунктами (РП), то наиболее целесообразно подключить их к этим РП.

Исходя из вышеизложенного и основываясь на все имеемые данные, мной была выбрана «одноступенчатая РС электрической энергии для включения всех электропотребителей металлургического завода. Снабжение электроэнергией цехов первой и второй категорий достигается как минимум двумя кабельными линиями, в то время как цеха третьей категории могут быть запитаны от одной, что также было описано выше» [12]. Таким образом встроенные трансформаторы в цехах подключаются напрямую к ГПП, а цеха третьей категории, которые при надобности могут быть отключены, подключаются либо к РП, либо к отдельно стоящему распределительному пункту.

Так как при проектировании системы электроснабжения металлургического предприятия важно принимать во внимание помимо потребляемой мощности еще и требования, касающиеся характер распределения нагрузок по территории текущего предприятия. Необходимые расчеты электрических нагрузок представлены в следующем разделе.

## 2.2 Определение расчетных нагрузок

В данной главе будет произведен расчет электрических нагрузок металлургического завода, который включает в себя определение потребляемой мощности, распределение нагрузок по цехам и выбор соответствующего электрооборудования.

Расчет электрических нагрузок будем выполнять методом коэффициента спроса, для этого воспользуюсь формулами нахождения активной ( $P_p$ ), реактивной ( $Q_p$ ) и полной ( $S_p$ ) мощности:

$$P_p = K_{с.а.} \cdot P_{ном.}, \quad (2)$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (3)$$

$$S_{p.} = \sqrt{P_{p.}^2 + Q_{p.}^2}. \quad (4)$$

«Коэффициенты спроса ( $K_{c.a.}$ ) и коэффициенты мощности ( $\cos \phi$ ) определяются по справочным данным. Как правило, для продолжительного режима принимается значение  $K_c = 0,5 - 1,0$ » [6]

Произведем расчет для цеха трансформаторной стали:

$$P_{p.} = 0,7 \cdot 3312 = 2318,4 \text{ кВт},$$

$$Q_{p.} = 2318,4 \cdot 1,33 = 3091,2 \text{ кВАр},$$

$$S_{p.} = \sqrt{2318,4^2 + 3091,2^2} = 3864 \text{ кВА}.$$

«Расчет для остальных цехов производится аналогично» [8], результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчетов силовой нагрузки

Наименование цеха / помещения	$P_n$ , кВт	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , кВАр	$S_p$ , кВА
Трансформаторной стали	3312	2318,4	3091,20	3864,00
Цех производства горячекатаного проката	2912	1193,9	1591,89	1989,87
Холоднокатаной продукции № 2	10812	4108,6	4803,44	6320,86
Листоотделочный	4012	2006	2345,27	3086,15
Трубоэлектросварочный цех №1	2376	1425,6	1757,32	2262,86
Трубоэлектросварочный цех №2	2066	1136,3	1400,71	1803,65
Ремонтный блок	3179	2225,3	2270,26	3179,00
Купоросная	825	412,5	420,83	589,29
ЦЗЛ и административное здание	428	363,8	196,36	413,41
Механоремонтный цех	498	338,64	271,68	434,15

Продолжение таблицы 4

Наименование цеха/ помещения	P <sub>н</sub> , кВт	P <sub>р</sub> , кВт	Q <sub>р</sub> , кВАр	S <sub>р</sub> , кВА
Насосная	470	376	233,02	442,35
Гальванический	660	429	437,67	612,86
Склад снабжения	46	18,4	13,80	23,00
Вальцетокарный	1457	874,2	891,86	1248,86
Блок химических установок	270	175,5	179,05	250,71
Хранилище для мазута	400	120	105,83	160,00
Электроремонтный	468	327,6	245,70	409,50
Кислородно- компрессорный цех	3520	2816	1745,20	3312,94
Холоднокатаной продукции № 1	4772	2863,2	1998,53	3491,71
Сумма		23529	23999,63	33895,17

Далее требуется произвести расчет нагрузки освещения. Освещенность нормируется СНиП 23-05-95 и СП 52.13330.2016.

Для определения активной, реактивной и полной нагрузки освещения пользуемся формулами 4, 5 и 6:

$$P_{\text{расч.о.н.}} = K_{\text{с.о.н.}} \cdot P_{\text{уд.о.н.}} \cdot F, \quad (5)$$

$$Q_{\text{расч.о.н.}} = 0,75 \cdot P_{\text{расч.о.н.}} \cdot \text{tg} \varphi_{\text{о.н.}}, \quad (6)$$

$$S_{\text{р.}} = \sqrt{P_{\text{р.}}^2 + Q_{\text{р.}}^2}. \quad (7)$$

«где  $p_{\text{уд.о.н.}}$  – удельная нагрузка осветительных приемников (ламп); Вт./м.<sup>2</sup>;  
 $F$  – площадь цеха, определяемая по генплану, м.<sup>2</sup>;  
 $K_{\text{с.о.н.}}$  – коэффициент спроса осветительной нагрузки.» [6]

Значение коэффициента спроса  $K_{\text{с.о.н.}}$  принимается равным 0,85 для цехов, и 0,6 для остальных непроизводственных помещений.

Определим площадь цеха трансформаторной стали. Длина и ширина помещения представлена на чертеже 1.

$$F_{\text{ц}} = a \cdot b = 55 \cdot 20 = 1100, \text{ м}^2.$$

Найдем активную нагрузку цеха трансформаторной стали:

$$P_{\text{расч.о.н.}} = 0,85 \cdot 0,014 \cdot 1100 = 13,1 \text{ кВт.}$$

Найдем реактивную нагрузку цеха по формуле 5:

$$Q_{\text{расч.о.н.}} = 0,75 \cdot 13,1 \cdot 1,33 = 13,1 \text{ кВАр.}$$

Найдем полную нагрузку цеха трансформаторной стали по формуле 5:

$$S_{\text{р.}} = \sqrt{13,1^2 + 13,1^2} = 18,5 \text{ кВА.}$$

Расчет для остальных цехов и служебных помещений аналогичен, сводная по расчету осветительной нагрузки представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Сводная по расчету осветительной нагрузки

Наименование цеха/ помещения	Площадь цеха, м <sup>2</sup>	Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, кВАр	Полная мощность, кВА
Трансформаторной стали	1100	13,1	13,1	18,5
Цех производства горячекатаного проката	1200	16,3	16,3	23,1
Цех холоднокатаной продукции №2	1800	24,5	21,5	32,6
Листоотделочный	1650	22,4	19,7	29,8
Трубоэлектросварочный цех №1	1750	20,8	19,3	28,4

Продолжение таблицы 5

Наименование цеха/ помещения	Площадь цеха, м <sup>2</sup>	Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, кВАр	Полная мощность, кВА
Трубоэлектросварочный цех №2	2800	33,3	30,8	45,4
Ремонтный блок	900	15,3	11,7	19,3
Купоросная	750	5,4	4,1	6,8
ЦЗЛ и административное здание	450	3,2	1,3	3,5
Механоремонтный цех	450	6,1	3,7	7,1
Насосная	150	1,5	0,7	1,7
Гальванический	200	1,4	1,1	1,8
Склад снабжения	700	4,2	2,4	4,8
Вальцетокарный	200	1,4	1,1	1,8
Блок химических установок	150	2,6	2,0	3,2
Хранилище для мазута	150	1,3	0,8	1,5
Электроремонтный	400	3,8	2,2	4,4
Кислородно- компрессорный цех	300	2,6	1,2	2,8
Цех холоднокатаной продукции №1	1500	20,4	10,7	23,0
Сумма		199,76	163,54	259,55

Важным этапом для дальнейших расчетов является расчет суммарной нагрузки цехов, представленные в таблице 6.

Таблица 6 – Сводная по суммарной расчетной нагрузке

Наименование цеха/ помещения	Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, кВАр	Полная мощность, кВА
Трансформаторной стали	2331,5	3091,2	3871,9
Цех производства горячекатаного проката	1210,2	1591,9	1999,7
Цех холоднокатаной продукции №2	4133,0	4803,4	6336,8
Листоотделочный	2028,4	2345,3	3100,8

Продолжение таблицы 6

Наименование цеха/ помещения	Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, кВАр	Полная мощность, кВА
Трубоэлектросварочный цех №1	1446,4	1757,3	2276,0
Трубоэлектросварочный цех №2	1169,6	1400,7	1824,8
Ремонтный блок	2240,6	2270,3	3189,7
Купоросная	417,9	420,8	593,1
ЦЗЛ и административное здание	367,0	196,4	416,3
Механоремонтный цех	344,8	271,7	438,9
Насосная	377,5	233,0	443,7
Гальванический	430,4	437,7	613,9
Склад снабжения	22,6	13,8	26,5
Вальцетокарный	875,6	891,9	1249,9
Блок химических установок	178,1	179,0	252,5
Хранилище для мазута	121,3	105,8	161,0
Электроремонтный	331,4	245,7	412,6
Кислородно-компрессорный цех	2818,6	1745,2	3315,1
Цех холоднокатаной продукции №1	2883,6	1998,5	3508,5
Сумма	23728,7	23999,6	34031,5

Полная таблица с результатами расчетов электрических нагрузок на «стороне 0,4 кВ представлена ниже» [8].

«Аналогично расчетам нагрузок на стороне 0,4 кВ рассчитаем электрические нагрузки на стороне 10 кВ» [20]. Полученные результаты представлены в таблицах 7 и 8.

Таблица 7 – «Электрические нагрузки на стороне 0,4 кВ» [19]

Цех/помещение	Силовая нагрузка							Осветительная нагрузка							Суммарная нагрузка		
	Рн, кВт	Кс	cos φ	tg φ	Рр, кВт	Qр, кВАр	Sp, кВА	F, м2	Руд.о, кВт/м <sup>2</sup>	Рно, кВт	Ксо	Рро, кВт	Qр о, кВ Ар	Spо, кВА	Ррц, кВт	Qрц, кВАр	Spц, кВА
На стороне 0,4 кВ																	
Листоотделочный	4012	0,5	0,65	1,17	2006	2345,27	3086,15	1650	0,016	26,4	0,85	22,4	19,7	29,8	2028,4	2345,3	3100,8
Холоднокатаной продукции №1	4772	0,6	0,82	0,70	2863,2	1998,53	3491,71	1500	0,016	24	0,85	20,4	10,7	23,0	2883,6	1998,5	3508,5
Трансформаторной стали	3312	0,7	0,6	1,33	2318,4	3091,20	3864,00	1100	0,014	15,4	0,85	13,1	13,1	18,5	2331,5	3091,2	3871,9
Производства горячекатаного проката	2912	0,41	0,6	1,33	1193,9	1591,89	1989,87	1200	0,016	19,2	0,85	16,3	16,3	23,1	1210,2	1591,9	1999,7
Холоднокатаной продукции №2	10812	0,38	0,65	1,17	4108,6	4803,44	6320,86	1800	0,016	28,8	0,85	24,5	21,5	32,6	4133,0	4803,4	6336,8
Склад снабжения	46	0,4	0,8	0,75	18,4	13,80	23,00	700	0,01	7	0,6	4,2	2,4	4,8	22,6	13,8	26,5
Механоремонтный	498	0,68	0,78	0,80	338,64	271,68	434,15	450	0,016	7,2	0,85	6,1	3,7	7,1	344,8	271,7	438,9
Блок химических установок	270	0,65	0,7	1,02	175,5	179,05	250,71	150	0,02	3	0,85	2,6	2,0	3,2	178,1	179,0	252,5
Электроремонтный	468	0,7	0,8	0,75	327,6	245,70	409,50	400	0,016	6,4	0,6	3,8	2,2	4,4	331,4	245,7	412,6
Купоросная	825	0,5	0,7	1,02	412,5	420,83	589,29	750	0,012	9	0,6	5,4	4,1	6,8	417,9	420,8	593,1
Трубоэлектросварочный №1	2376	0,6	0,63	1,23	1425,6	1757,32	2262,86	1750	0,014	24,5	0,85	20,8	19,3	28,4	1446,4	1757,3	2276,0

Продолжение таблицы 7

Цех/помещение	Силовая нагрузка							Осветительная нагрузка							Суммарная нагрузка		
	Рн, кВт	Кс	cos φ	tg φ	Рр, кВт	Qр, кВАр	Sp, кВА	F, м2	Руд.о, кВт/м <sup>2</sup>	Рно, кВт	Ксо	Рро, кВт	Qр о, кВ Ар	Spо, кВА	Ррц, кВт	Qрц, кВАр	Spц, кВА
На стороне 0,4 кВ																	
Ремонтный блок	3179	0,7	0,7	1,02	2225,3	2270,26	3179	900	0,02	18	0,85	15,3	11,7	19,3	2240,6	2270,3	3189,7
ЦЗЛ и административное здание	428	0,85	0,88	0,54	363,8	196,36	413,41	450	0,012	5,4	0,6	3,2	1,3	3,5	367,0	196,4	416,3
Трубоэлектросварочный №2	2066	0,55	0,63	1,23	1136,3	1400,71	1803,65	2800	0,014	39,2	0,85	33,3	30,8	45,4	1169,6	1400,7	1824,8
Вальцетокарный	1457	0,6	0,7	1,02	874,2	891,86	1248,86	200	0,012	2,4	0,6	1,4	1,1	1,8	875,6	891,9	1249,9
Хранилище для мазута	400	0,3	0,75	0,88	120	105,83	160	150	0,01	1,5	0,85	1,3	0,8	1,5	121,3	105,8	161,0
Насосная	470	0,8	0,85	0,62	376	233,02	442,35	150	0,012	1,8	0,85	1,5	0,7	1,7	377,5	233,0	443,7
Кислородно-компрессорный	3520	0,8	0,85	0,62	2816	1745,2	3312,94	300	0,01	3	0,85	2,6	1,2	2,8	2818,6	1745,2	3315,1
Гальванический	660	0,65	0,7	1,02	429	437,67	612,86	200	0,012	2,4	0,6	1,4	1,1	1,8	430,4	437,7	613,9
Итого:	42483	-	-	-	23529	23999,63	33895,17	16600	-	244,6	-	199,76	163,54	259,55	23728,7	23999,6	34031,5

Таблица 8 – Электрические нагрузки на стороне 10 кВ

Наименование	Силовая нагрузка						
	Р <sub>н</sub> , кВт	Кс	cos φ	tg φ	Р <sub>р</sub> , кВт	Q <sub>р</sub> , кВАр	S <sub>р</sub> , кВА
На стороне 10 кВ							
Цех производства горячекатаного проката	2912	0,7	0,9	0,48	2038,4	987,2	2264,9
Цех холоднокатаной продукции №2	10812	0,5	0,85	0,62	5406	3350,3	6360,0
Листоотделочный	4012	0,5	0,84	0,65	2006	1295,7	2388,1
Трубоэлектросварочный 1	2376	0,8	0,9	0,48	1900,8	920,6	2112,0
Трубоэлектросварочный 2	2066	0,6	0,84	0,65	1239,6	800,7	1475,7
Кислородно-компрессорный цех	3520	0,6	0,85	0,62	2112	1308,9	2484,7
Цех холоднокатаной продукции №1	4772	0,8	0,9	0,48	3817,6	1848,9	4241,8
Итого:	30470	-	-	-	18520	10512,5	21327,2

Важной составляющей является расчет потерь активной и реактивной мощностей в трансформаторе. Для этого используем формулы:

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot S_{pc}, \quad (8)$$

$$\Delta Q_T = 0,1 \cdot S_{pc}, \quad (9)$$

где  $S_{pc}$  – «полная расчетная цеховая мощность» [19], кВт.

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot 34031,5 = 680,6 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_T = 0,1 \cdot 34031,5 = 3403,2 \text{ кВАр}.$$

Далее приведены формулы по общей нагрузке в сетях 0,4 кВ.

$$P_{P3} = (\sum P_{P0,4} + \sum P_{P10}) \cdot K_{PM} + \Delta P_T, \quad (10)$$

$$Q_{P3} = (\sum Q_{P0,4} + \sum Q_{P10}) \cdot K_{PM} + \Delta Q_T, \quad (11)$$

где  $\sum P_{P0,4}$  и  $\sum P_{P10}$  – «активные расчетные цеховые мощности на 0,4 кВ и 10 кВ, кВт» [19];

$\sum Q_{P0,4}$  и  $\sum Q_{P10}$  – «реактивные расчетные цеховые мощности на 0,4 кВ и 10 кВ, кВАр» [19];

$K_{PM}$  – «коэффициент разновременности максимумов» [19].

$$P_{P3} = (23728,7 + 18520) \cdot 0,95 + 680,6 = 40817,2 \text{ кВт},$$

$$Q_{P3} = (23999,6 + 10512,5) \cdot 0,95 + 3403,2 = 36189,7 \text{ кВАр}.$$

«Полная расчетная мощность металлургического завода» [7] рассчитывается по формуле:

$$S_{P3} = \sqrt{P_{P3}^2 + Q_{P3}^2}, \quad (12)$$

$$S_{p3} = \sqrt{40817,2^2 + 36189,7^2} = 54550,3 \text{ кВА.}$$

В данном разделе были выполнены расчеты электрических нагрузок, по результатам которых необходимо выбрать цеховые трансформаторные подстанции и трансформаторы ГПП.

### **2.3 Определение оптимального количества и мощности трансформаторов с учетом компенсации реактивной мощности**

«Чтобы определить оптимальное количество и мощность трансформаторов, необходимо провести серию технико-экономических расчётов. Важно учесть ряд ключевых факторов:

- категорию надёжности электроснабжения потребителей;
- перегрузочную способность трансформаторов в штатном и аварийном режимах работы;
- стандартные значения мощности;
- экономичный режим работы трансформаторов с учётом графика нагрузки» [11].

Для объектов первой и второй категории электроснабжения обычно используется два, иногда три трансформатора. Для потребителей третьей категории – один.

Исходя из этого, все понизительные ТП-10/0,4 кВ для цехов первой и второй категорий будут двухтрансформаторными.

По данной формуле можно рассчитать удельную плотность нагрузки:

$$\sigma = \frac{S_{pц}}{F_{ц}}, \quad (13)$$

где  $S_{pц}$  – полная расчетная мощность цехов, кВА;

$F_{ц}$  – площадь всех цехов завода, м<sup>2</sup>.

$$\sigma = \frac{34031,5}{16600} = 2,1 \text{ кВА/м}^2.$$

«При такой плотности рекомендуется применять трансформаторы мощностью 1600 кВА» [17].

Определив плотность нагрузки, следует выбрать необходимое число трансформаторов по формуле:

$$N_{\min} = \frac{P_p}{\beta_T + S_{\text{нт}}} + \Delta N, \quad (14)$$

где  $P_p$  – «суммарная активная мощность завода на напряжении 0,4 кВ, кВт» [19];

$\beta_T$  – «коэффициент загрузки трансформаторов» [19];

$S_{\text{нт}}$  – «номинальная мощность трансформатора», кВА» [19].

$$N_{\min} = \frac{23728,7}{0,65 + 1600} + 1,9 = 25.$$

Используя следующую формулу, можно определить номинальную полную мощность. Она определяет «мощность силовых трансформаторов» [7] на ТП-10 кВ.

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р.}} = \frac{\sum P_p}{N \beta_T}, \quad (15)$$

где  $S_{\text{ном.т.р.}}$  – «расчетная мощность силового трансформатора, кВА» [19];

$\sum P_p$  – «активная нагрузка объектов, которые запитывает ТП, кВт» [19];

$N$  – «кол-во трансформаторов цеховой ТП, шт.» [19].

Далее произведен расчет трансформаторов для первой ТП.

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р.}} = \frac{2573,8}{2 \cdot 0,7} = 1838,4 \text{ кВА.}$$

В качестве силовых трансформаторов на ТП №1 были выбраны 3 трансформатора марки ТМ 1600/10/0,4.

Расчет для остальных ТП будет аналогичен и представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Расчет количества и мощности трансформаторов на стороне 0,4 кВ

№ ТП	Категория надежности	№ цеха	Наименование цеха	NxS <sub>ном</sub> , кВА	S <sub>рΣ</sub> , кВА
ТП-1	I	1	Листоотделочный	3×1600	2573,8
	III	6	Склад снабжения		
	II	7	Механоремонтный цех		
	II	8	Блок химических установок		
ТП-2	I	2	Холоднокатаной продукции № 1	3×1600	2883,6
ТП-3	I	3	Трансформаторной стали	3×1600	2331,5
ТП-4	I	4	Цех производства горячекатаного проката	2×1600	1210,2
ТП-5	I	5	Холоднокатаной продукции № 2	4×1600	4133
ТП-6	I	11	Трубоэлектросварочный цех №1	3×1600	1446,4
ТП-7	I	14	Трубоэлектросварочный цех №2	2×1600	1169,6
ТП-8	II	9	Электроремонтный	3×1600	3568,9
	I	12	Ремонтный блок		
	II	15	Вальцетокарный		
	III	16	Хранилище для мазута		
ТП-9	II	10	Купоросная	4×1600	4411,4
	II	13	ЦЗЛ и административное здание		
	I	17	Насосная		
	II	18	Кислородно-компрессорный цех		
	I	19	Гальванический		

Аналогично произведены расчеты для стороны 10 кВ, результаты в таблице 10.

Таблица 10 – Расчет количества и мощности трансформаторов на стороне 10 кВ

Наименование	$SP_{\Sigma}$ , кВА	$N \times S_{ном}$ , кВА
Листоотделочный	2006	2×1600
Цех холоднокатаной продукции №1	3817,6	4×1600
Цех производства горячекатаного проката	2038,4	2×1600
Цех холоднокатаной продукции №2	5406	6×1600
Трубоэлектросварочный цех №1	1900,8	2×1600
Трубоэлектросварочный цех №2	1239,6	2×1000
Кислородно-компрессорный цех	2112	2×1600

Произведенный расчет соответствует всем допустимым нормам, все необходимые условия на ТП выполняются, поэтому данные трансформаторы могут быть установлены на металлургическом заводе.

Также важно учесть компенсацию реактивной мощности и произвести выбор устройств для этого.

Расчёт компенсации реактивной мощности (КРМ) подразумевает поиск наилучшего баланса между мощностью установок, размещаемых на стороне до 1000 вольт, и передачей реактивной мощности через сеть высокого напряжения, обеспечивающее значительное повышение эффективности системы электроснабжения. Важно учитывать все сопутствующие факторы: потери, возникающие при генерации реактивной мощности устройствами как до, так и свыше 1000 В; потери при передаче энергии из сети высокого напряжения в сеть низкого напряжения; а также увеличение стоимости трансформаторов, связанное с их дополнительной нагрузкой от реактивной мощности.

Для компенсации реактивной мощности сети устанавливают конденсаторные установки, которые обладают емкостной нагрузкой, и являются компенсирующими устройствами (КУ).

Далее приведена формула расчета максимальной реактивной мощности для передачи через трансформаторы 10/0,4 кВ.

$$Q_T = \sqrt{(N\beta_T S_{ном.т.})^2 - P_{р.ТП}^2} \text{ кВАр}, \quad (16)$$

где  $N$  – «число трансформаторов ТП», шт. [11];

$S_{ном.т.}$  – «полная номинальная мощность трансформатора ТП», кВа [11];

$P_{р.ТП}$  – «расчетная активная мощность нагрузки ТП», кВт [11].

Формула для расчета мощности для КУ с  $P_{ном}$  0,4 кВ представлена ниже.

$$Q_{н.к.} = Q_{р.т.} - Q_T \text{ кВАр}, \quad (17)$$

где  $Q_{р.т.}$  – «расчетная реактивная мощность», кВАр [11].

Произведем расчет для первой ТП:

$$Q_T = \sqrt{(3 \cdot 0,7 \cdot 1600)^2 - 2573,9^2} = 2159,8 \text{ кВАр},$$

$$Q_{н.к.} = 2809,8 - 2159,8 = 650 \text{ кВАр}.$$

Исходя из полученных результатов, необходимо выбрать регулируемую конденсаторную установку низкого напряжения типа КРМ-0,4-650-7 УЗ мощностью 650 кВАр.

Необходимо произвести аналогичные расчеты для выбора  $P_{ном}$  КУ 0,4 кВ остальных цеховых ТП-10/0,4 кВ, они будут приведены в таблице 11.

Расчет полной мощности на ТП после компенсации производится по формуле:

$$S_{\text{ТПн}} = \sqrt{(P_P)^2 + (Q_P - Q_{\text{HKн}})^2}. \quad (18)$$

Произведем расчеты для ТП №1:

$$S_{\text{ТПн}} = \sqrt{2573,9^2 + (2809,8 - 650)^2} = 3360 \text{ кВА}.$$

Необходимо провести оценку фактических коэффициентов загрузки в «двух режимах: нормальном и послеаварийном, на основании подобранных мощностей трансформаторов, с учетом КРМ» [15]:

$$K_{\text{з.ном}} = \frac{S_{\text{ТПн}}}{N_T \cdot S_{\text{ном.т}}}, \quad (19)$$

$$K_{\text{з.п.ав}} = \frac{S_{\text{ТПн}}}{(N_T - 1) \cdot S_{\text{ном.т}}}, \quad (20)$$

где  $S_{\text{ТПн}}$  – полная мощность ТП с учетом компенсации, кВА;

$S_{\text{ном.т}}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Ниже приведены расчеты для ТП №1:

$$K_{\text{з.ном}} = \frac{3360}{3 \cdot 1600} = 0,7 \text{ кВА},$$

$$K_{\text{з.п.ав}} = \frac{3360}{(3 - 1) \cdot 1600} = 1,1 \text{ кВА}.$$

По полученным результатам, представленных в таблице 11, можно увидеть, что обоих режимах все значения остаются в пределах допустимых параметров, не выходя за них. Все условия резервирования выполняются.

Аналогично расчетам для стороны 0,4 кВ подберем мощность КУ 10 кВ. Результаты представлены в таблице 12.

Таблица 11 - Подбор конденсаторных установок 0,4 кВ

№ ТП	$P_{р.тп},$ кВт	Количество трансформаторов N, шт.	$S_{ном.тп},$ кВА	$Q_T,$ кВАр	$Q_{р.тп},$ кВАр	$Q_{н.к.},$ кВАр	$tg \varphi_{рц}$	$tg \varphi_{э}$	Тип конденсаторной установки	Количество КУ, шт	$Q_{н.ку},$ кВАр	$\beta_T$	$S_{тп},$ кВА	Кз.ном, кВА	Кз.п.ав., кВА
ТП-1	2573,9	3	1600	2159,8	2809,8	650	1,1	0,38	КРМ-0,4-650-7 УЗ	1	650	0,7	3360	0,7	1,1
ТП-2	2883,6	3	1600	1191,3	1998,5	807,2	0,7	0,38	КРМ-0,4-800-8 УЗ	1	800	0,65	3120	0,65	1,0
ТП-3	2331,5	3	1600	2073,3	3091,2	1017,9	1,3	0,38	КРМ-0,4-500-7 УЗ	2	500	0,65	3120	0,65	1,0
ТП-4	1210,2	2	1600	1691,7	1591,9	-99,8	1,3	0,38	-	-	-	0,65	2080	0,65	1,3
ТП-5	4133	4	1600	473,2	4803,4	4330,2	1,2	0,38	КРМ-0,4-850-8 УЗ	5	850	0,65	4160	0,65	0,9
ТП-6	1446,4	2	1600	1494,8	1757,3	262,5	1,2	0,38	КРМ-0,4-300-6 УЗ	1	300	0,65	2080	0,65	1,3
ТП-7	1169,6	2	1600	1720,0	1400,7	-319,3	1,2	0,38	-	-	-	0,65	2080	0,65	1,3
ТП-8	3568,9	3	1600	1417,2	3513,7	2096,5	1,0	0,38	КРМ-0,4-1000-5 УЗ	2	1000	0,8	3840	0,8	1,2
ТП-9	4411,4	4	1600	781,0	3033,1	2252,1	0,7	0,38	КРМ-0,4-750-8 УЗ	3	750	0,7	4480	0,7	0,9

Таблица 12 – Подбор конденсаторных установок 10 кВ

№ ТП	$P_{р.тп},$ кВт	Количество трансформаторов N, шт.	$S_{ном.тп},$ кВА	$Q_T,$ кВАр	$Q_{р.тп},$ кВАр	$Q_{н.к.},$ кВАр	$tg \varphi$ рц	$tg \varphi$ э	Тип конденсаторной установки	Количество КУ, п, шт	$Q_{н.ку},$ кВАр	$\beta_T$	Стп, кВА	Кз.ном, кВА	Кз.п.ав., кВА
ТП-1	2006	2	1600	996,8	1295,7	298,9	0,65	0,38	КРМ-0,4-300-6 УЗ	1	300	0,7	2240	0,7	1,4
ТП-2	3817,6	4	1600	1652,7	1848,9	196,2	0,48	0,38	КРМ-0,4-50-4 УЗ	4	50	0,65	4160	0,65	0,9
ТП-4	2038,4	2	1600	413,9	987,2	573,3	0,48	0,38	КРМ-0,4-300-6 УЗ	2	300	0,65	2080	0,65	1,3
ТП-5	5406	6	1600	3116,5	3350,3	233,8	0,62	0,38	КРМ-0,4-80-4 УЗ	3	80	0,65	6240	0,65	0,78
ТП-6	1900,8	2	1600	844,6	920,6	76,0	0,48	0,38	КРМ-0,4-80-4 УЗ	1	80	0,65	2080	0,65	1,3
ТП-7	1239,6	2	1000	391,7	800,7	409,0	0,65	0,38	КРМ-0,4-400-8 УЗ	1	400	0,65	1300	0,65	1,3
ТП-9	2112	2	1600	746,4	1308,9	562,5	0,62	0,38	КРМ-0,4-300-6 УЗ	2	300	0,7	2240	0,7	1,4

Исходя из расчетов и подбора КУ можно сделать вывод, что переизбыток реактивной составляющей будет компенсирован в полном объеме во всей внешней и внутренней сети электроснабжения предприятия.

Помимо выбора трансформаторов на ТП, также требуется подобрать трансформаторы на ГПП.

Ранее по формуле Илларионова было рассчитано значение оптимального напряжения, оно равно  $U = 197,2 \text{ кВ}$ .

Ближайший оптимальный показатель напряжения для полученного результата – 220 кВ, в итоге его и принимаем.

Для выбора трансформатора ГПП требуется произвести расчеты активной и реактивной мощностей, определяющиеся по формулам:

$$S_{P3} = \sqrt{P_{P3}^2 + Q_{\ominus}^2}, \quad (21)$$

где  $Q_{\ominus}$  – «экономически целесообразная реактивная мощность за период наибольшей активной нагрузки, кВАр» [9].

$$Q_{\ominus} = P_{P3} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{\ominus}, \quad (22)$$

где  $\operatorname{tg}\varphi_{\ominus}$  – «экономически целесообразный тангенс реактивной мощности» [9].

$$Q_{\ominus} = 40817,2 \cdot 0,38 = 15510,5 \text{ кВАр},$$

$$S_{P3} = \sqrt{40817,2^2 + 15510,5^2} = 43644,9 \text{ кВА}.$$

По формуле (23) определяется мощность трансформаторов, находящихся на ГПП:

$$S_{\text{н.т.}} \geq \frac{S_{P3}}{\beta_{\text{т}} \cdot \eta'}, \quad (23)$$

где  $S_{P3}$  – «полная расчетная мощность завода со стороны высшего напряжения трансформаторов ГПП, кВА» [9];

$\beta_m$  – «коэффициент загрузки трансформаторов на ГПП» [9];

$n'$  – «число трансформаторов» [9].

$$S_{н.т.} \geq \frac{43664,9}{0,7 \cdot 2} = 31189,2 \text{ кВА.}$$

По полученным результатам выбираем трансформатор типа «ТРДН-40000/220» в количестве двух штук.

Таблица 13 – Результаты расчетов по выбору трансформаторов на ГПП

ГПП	tg φ э	Ppз, кВт	Qэ, кВАр	Spз, кВА	Sn.т., кВА	N, шт.	βт
	0,38	40817,2	15510,5	43664,9	31189,2	2	0,7

В таблице 14 представлены основные характеристики данного трансформатора.

Таблица 14 – Характеристика трансформатора типа «ТРДН-40000/220»

Тип	Sном, МВА	Пределы регулирования	Табличные данные						Расчетные данные		
			Уном обмоток		Uкз, %	Потери		Ix, %	Rт, Ом	Xт, Ом	ΔQх, квар
			ВН	НН		ΔPк, кВт	Pх, кВт				
ТРДН-40000/220	40	±8*1,5 %	230	11/11; 6,6/6,6	12	170	50	0,9	5,6	158,7	360

В данном разделе были подобраны трансформаторы, рассчитана их мощность, а также выбраны компенсирующие устройства.

## 2.4 Подбор кабеля и его сечений для системы электроснабжения

Определив номинальное напряжение, необходимо подобрать сечение кабельных линий.

Требуется произвести выбор кабеля для кабельных линий электропередач (220 кВ, 10 кВ и 0,4 кВ). ВЛ 220 кВ проложены от энергосистемы до ГПП, линии 10 кВ – от ГПП до цеховых ТП, а линии 0,4 кВ отходят от цеховых ТП к цеховым ВРУ.

Для определения сечений кабеля необходимо воспользоваться формулой:

$$F_{\text{э}} = \frac{I_{\text{расч.}}}{j_{\text{эк}}}, \quad (24)$$

где  $I_{\text{расч.}}$  – «расчетное значение тока, А» [19];

$j_{\text{эк.}}$  – «экономическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>, равная 1,2 (при работе завода более 5000 часов в год, кабели с алюминиевыми жилами с изоляцией), равная 1 (для алюминиевых неизолированных проводов)» [19].

Чтобы определить «расчетное значение рабочего тока нормального режима» [19] необходимо использовать формулу:

$$I_{\text{р.н.}} = \frac{P_{\text{р}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi} = \frac{S_{\text{р}}}{N \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (25)$$

где  $S_{\text{р}}$  – «расчетная полная нагрузка линии», кВА [19].

Величина тока при аварии увеличивается в 2 раза, поэтому воспользуемся формулой:

$$I_{\text{пар}} = 2 \cdot I_{\text{ном}}, \quad (26)$$

$$I_{\text{доп табл}} \geq I_{\text{пар}}. \quad (27)$$

Ниже представлена формула для расчета «допустимой токовой нагрузки на жилу кабеля при нормальном режиме», она применяется для «кабельных линий» [14], проложенных в траншее:

$$I_{\text{доп}} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot I_{\text{доп табл}}, \quad (28)$$

где  $k_1$  – «поправочный коэффициент для кабеля в зависимости от  $t$ » [19], равный 1;

$k_2$  – «поправочный коэффициент снижения нагрузки при совместной прокладке кабелей» [19] для расстояния между ними равного 200 мм;

$k_3$  – «коэффициент, учитывающий фактическое тепловое сопротивление грунта» [19], равный 1;

$I_{\text{доп табл}}$  – «допустимый длительный ток» [4], выбранный по таблице (для ВЛ-220 кВ).

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{р.н.}}, \quad (29)$$

где  $I_{\text{доп}}$  – «значение допустимого тока для проводника, имеющего стандартное сечение, А» [4].

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{р.мах}}, \quad (30)$$

Для проведения выбора сечений кабеля нужно заранее рассчитать максимальные токи в послеаварийном режиме для внешней и внутренней системы электроснабжения завода.

Коэффициент допустимой аварийной перегрузки трансформатора  $K_{\text{ав}}=1,4$ .

Чтобы рассчитать  $I_{\text{р.мах}}$  – максимальный рабочий ток послеаварийного режима, необходимо воспользоваться формулой:

$$I_{p.\max} = K_{ав} \cdot I_{p.н.} = 1,4 \cdot \frac{S_p}{(N - 1) \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном}}. \quad (31)$$

Ниже приведены расчеты по выбору и проверке сечения кабеля ВЛ-220 кВ, питающей трансформаторы ГПП от энергосистемы.

$$I_{p.н.} = \frac{43664,9}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 220} = 57,3 \text{ А},$$

$$I_{пар} = 2 \cdot 57,3 = 114,6 \text{ А},$$

$$F_{эк} = \frac{57,3}{1} = 57,3 \text{ мм}^2.$$

По полученным данным выбираем кабель марки «АС-70/11». По своим характеристикам он отлично подходит для прокладки в воздухе для сетей 220 кВ.

Проведем проверку по допустимому току послеаварийного режима работы:

$$I_{\text{доп табл}} \geq I_{пар}, \quad (32)$$

$$I_{\text{доп табл}} = 265 \text{ А} \geq I_{пар} = 114,6 \text{ А}.$$

По результатам можно сделать вывод, что «кабель подходит проверку по длительно-допустимому току» [9].

Все расчеты приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Выбор сечения кабеля ВЛ-220 кВ

U <sub>н</sub>	I <sub>ном</sub> , А	I <sub>пар</sub> , А	jn	F <sub>эк</sub> , мм <sup>2</sup>	I <sub>доп табл</sub> , А
220	57,3	114,6	1	57,3	265

Аналогично произведены расчеты для кабельных линий 10 кВ. Результаты приведены в таблице ниже.

Таблица 16 – Результаты расчетов и подбора кабельных линий

№ ТП	Ко- во- ли- ни- й, п, шт.	Расчетная нагрузка		Fэ	Марка кабеля	Сече- ние кабел- я	Iдоп табл, А	Iдоп, А	IдопКлер, А	N, шт.	Sном, кВт	jэж.	Uном.	Кав	k1	k2	k3	Допу- скаем- ая пере- рузка
		Ip.н.	Ip.ма х															
ТП-1	2	30,8	64,7	25,7	ААШв	3×35	110	96,8	125,8	3	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3
ТП-2	2	30,8	64,7	25,7	ААШв	3×35	110	96,8	125,8	3	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3
ТП-3	2	30,8	64,7	25,7	ААШв	3×35	110	96,8	125,8	3	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3
ТП-4	2	46,2	129,3	38,5	ААШв	3×50	134	117,9	153,3	2	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3
ТП-5	2	23,1	43,1	19,2	ААШв	3×35	110	96,8	125,8	4	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3
ТП-6	2	46,2	129,3	38,5	ААШв	3×50	134	117,9	153,3	2	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3
ТП-7	2	46,2	129,3	38,5	ААШв	3×50	134	117,9	153,3	2	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3
ТП-8	2	30,8	64,7	25,7	ААШв	3×35	110	96,8	125,8	3	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3
ТП-9	2	23,1	43,1	19,2	ААШв	3×35	110	96,8	125,8	4	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3
Листоотделоч- ный цех	2	46,2	129,3	38,5	ААШв	3×50	134	117,9	153,3	2	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3
Холоднокатано- й продукции № 1	2	23,1	43,1	19,2	ААШв	3×35	110	96,8	125,8	4	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3

Продолжение таблицы 16

№ ТП	Ко- ло- ли- ни- й, п, шт.	Расчетная нагрузка		Fэ	Марка кабеля	Сече- ние кабел- я	Iдоп табл, А	Iдоп, А	IдопКлер, А	N, шт.	Sном, кВт	jэк.	Uном.	Кав	k1	k2	k3	Допу- скаем- ая перег- рузка
		Ip.н.	Ip.ма х															
Цех производства горячекатаного проката	2	46,2	129,3	38,5	ААШв	3×50	134	117,9	153,3	2	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3
Трубоэлектрос- варочный 1	2	46,2	129,3	38,5	ААШв	3×50	134	117,9	153,3	2	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3
Трубоэлектрос- варочный 2	2	28,9	80,8	24,1	ААШв	3×35	110	96,8	125,8	2	1000	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3
Кислородно- компрессорный цех	2	46,2	129,3	38,5	ААШв	3×50	134	117,9	153,3	2	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3
Холоднокатано- й продукции № 2	2	15,4	25,9	12,8	ААШв	3×35	110	96,8	125,8	6	1600	1,2	10	1,4	1	0,88	1	1,3

В данном разделе были рассчитаны сечения кабеля для каждого ТП, а также подобран кабель, исходя из требуемых характеристик и результатов расчетов.

## 2.5 Расчет ТКЗ и подбор коммутационной и защитной аппаратуры

В электрических системах могут возникать КЗ. Возникновение короткого замыкания – это такая ситуация, когда ток в сети внезапно и резко возрастает. Для того, чтобы система электроснабжения работала надёжно, электрооборудование должно быть устойчивым к ТКЗ и подходить для таких нагрузок.

Короткие замыкания возникают по разным причинам:

- повреждение изоляции элементов электроустановок;
- ошибки персонала, который обслуживает систему;
- перекрытие токоведущих частей электрической дугой.

Если случается КЗ, питание потребителей в этой зоне отключается, а на других участках сети может снизиться напряжение. Это приводит к сбоям в работе энергетической системы.

Чтобы предотвратить КЗ или хотя бы минимизировать их последствия, нужно действовать быстро и эффективно:

- оперативно устранять причины короткого замыкания;
- сокращать время срабатывания защиты от короткого замыкания;
- использовать быстродействующие выключатели;
- правильно рассчитывать токи КЗ и подбирать компоненты электрической сети с учётом этих расчётов.

«В данной бакалаврской работе для определения расчётного вида короткого замыкания (КЗ) выбрано трёхфазное КЗ. При оценке величин токов короткого замыкания не принимаются во внимание следующие аспекты:

- сдвиг фаз электродвижущей силы и изменение скорости вращения роторов синхронных машин;
- ток намагничивания систем генераторов, трансформаторов и электродвигателей;
- насыщение магнитных систем генераторов, трансформаторов и электродвигателей;
- ёмкостная проводимость воздушных и кабельных линий;

- различие значений сверхпереходных сопротивлений по продольной и поперечной осям синхронных машин;
- возможная несимметрия трёхфазной системы;
- влияние статической нагрузки на токи КЗ;
- вклад электродвигателей напряжением до 630 В в подпитку места КЗ при расчёте токов КЗ в сети выше 630 В» [13].

Такие упрощения позволяют выполнить вычисления с погрешностью, которая не превышает допустимые 10%. Кроме того, в высоковольтных сетях пренебрегают активными сопротивлениями элементов. Схемы, которые иллюстрируют этот подход: расчётная схема токов КЗ для рассматриваемого проекта металлургического завода представлена на рисунке 4, а схема замещения для расчёта трёхфазных КЗ – на рисунке 5.

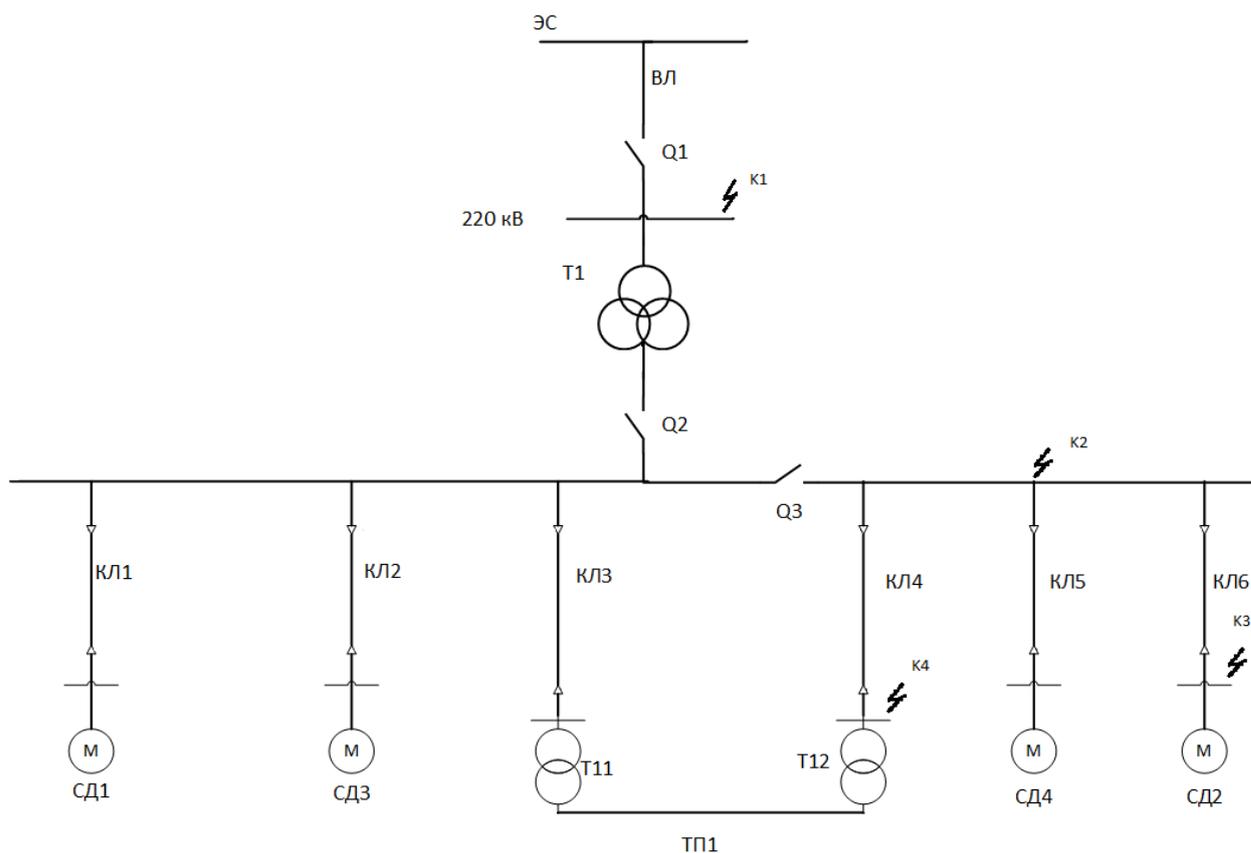


Рисунок 4 – Расчетная схема ТКЗ

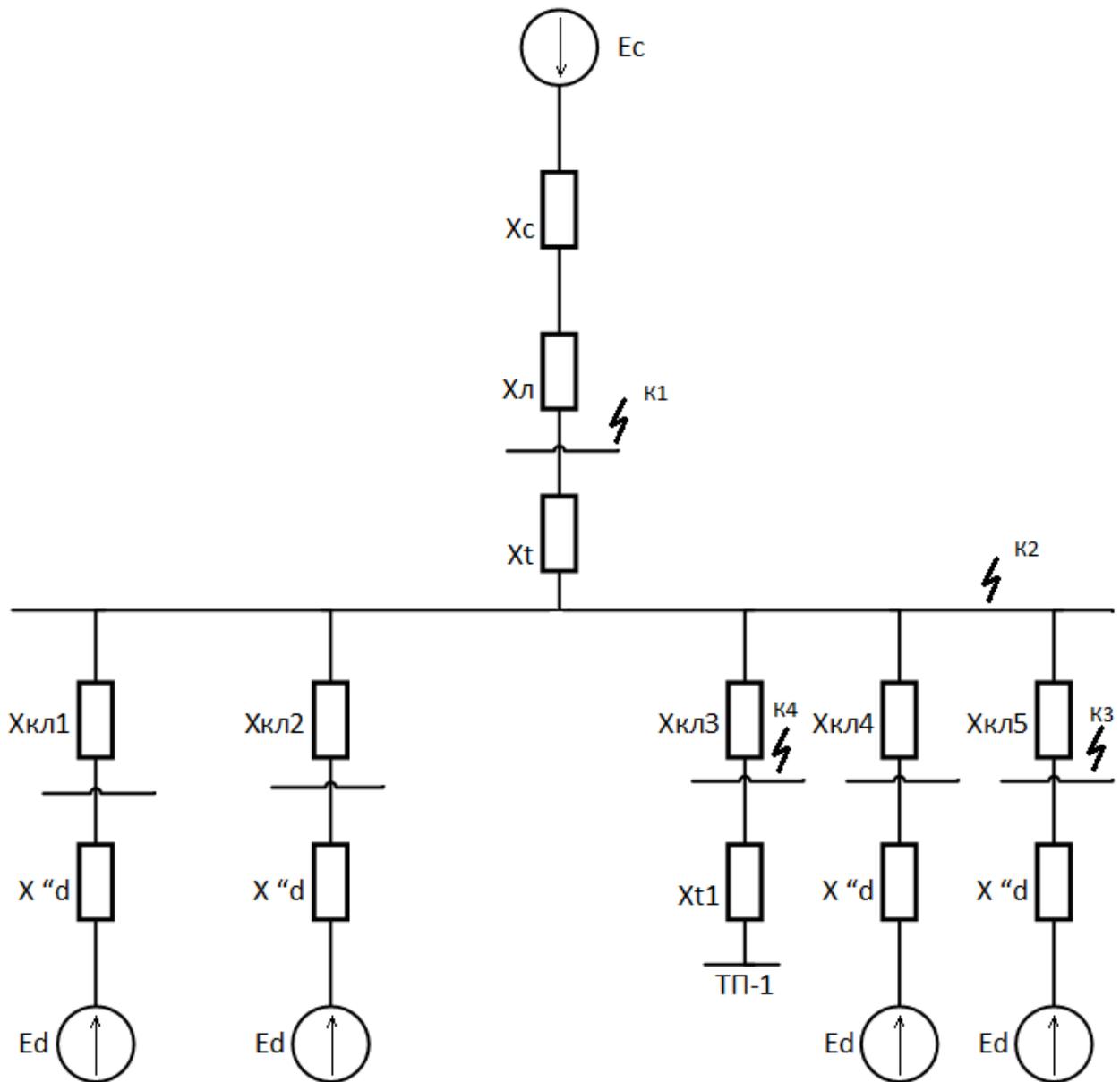


Рисунок 5 – Схема замещения

Определим ТКЗ в электрических сетях предприятия. Для этого «используем относительные единицы и шкалу средних напряжений, как указано в руководящих документах» [2].

«Первоначально примем базисную мощность,  $S_b = S_k$  и равно 3000 МВА. За базисное напряжение возьмём среднее эксплуатационное напряжение для той ступени, где предположительно может произойти короткое замыкание» [2]:

- $U_{б1}$  будет равно 230 кВ – это напряжение высокого напряжения (ВН) трансформатора;
- $U_{б2}$  составит 11 кВ – такое напряжение низкого напряжения (НН) у трансформатора.

Для начала вычислим базисные токи по формуле:

$$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\sigma}}. \quad (33)$$

В точках К1 и К2:

$$I_{\sigma 1} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 7,53 \text{ кА},$$

$$I_{\sigma 2} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 11} = 157,46 \text{ кА}.$$

По следующим формулам рассчитываются сопротивления:

$$x_c = \frac{S_{\sigma}}{S_k}, \quad (34)$$

где  $x_c$  – сопротивление системы.

$$x_{\text{вл}} = x_0 \cdot L \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{\text{ср}}^2}, \quad (35)$$

где  $x_{\text{л}}$  – сопротивление питающей ВЛ,

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

$L$  – длина линии.

$$x_{\text{тв}} = 0,125 \cdot \frac{u_{\text{к(в-н)}} \cdot S_{\sigma}}{100 \cdot S_{\text{тном}}}, \quad (36)$$

где  $x_{\text{тв}}$  – «сопротивление обмотки ВН трансформатора» [18],

$u_{\text{к(в-н)}}$  – «напряжение КЗ трансформатора, %» [18],

$S_{\text{тном}}$  – «номинальная мощность трансформатора, мВА» [18].

$$x_{\text{тн}} = 1,75 \cdot \frac{u_{\text{к(в-н)}} \cdot S_{\sigma}}{100 \cdot S_{\text{тном}}}, \quad (37)$$

где  $x_{\text{тн}}$  – сопротивление обмотки НН трансформатора.

$$x_T = x_{ТВ} + x_{ТН}, \quad (38)$$

где  $x_T$  – общее сопротивление трансформатора.

$$x_{кл} = x_0 \cdot L \cdot \frac{S_6}{U_{62}^2}, \quad (39)$$

где  $x_{кл}$  – сопротивление КЛ.

Рассчитаем сопротивления:

$$x_c = \frac{3000}{3000} = 1 \text{ о.е.},$$

$$x_{вл} = 0,4 \cdot 20 \cdot \frac{3000}{230^2} = 0,5 \text{ о.е.},$$

$$x_{ТВ} = 0,125 \cdot \frac{12 \cdot 3000}{100 \cdot 40} = 1,125 \text{ о.е.},$$

$$x_{ТН} = 1,75 \cdot \frac{12 \cdot 3000}{100 \cdot 40} = 15,75 \text{ о.е.},$$

$$x_T = 1,125 + 15,75 = 16,88 \text{ о.е.}$$

Сопротивление КЛ от ГПП до высоковольтных (ВВ) двигателей:

$$x_{кл1,6} = 0,2 \cdot 0,083 \cdot \frac{3000}{11^2} = 0,41 \text{ о.е.},$$

$$x_{кл2,5} = 0,2 \cdot 0,087 \cdot \frac{3000}{11^2} = 0,43 \text{ о.е.}$$

Сопротивление от ГПП до ТП-1:

$$x_{кл3,4} = 0,08 \cdot 0,082 \cdot \frac{3000}{11^2} = 1,63 \text{ о.е.}$$

Следующими идут расчеты начальных значений периодической составляющей ТКЗ:

$$I_{\text{но}i} = \frac{E_{\Sigma i}}{x_{\Sigma i}} \cdot I_{\text{б}i}, \quad (40)$$

где  $E_{\Sigma i}$  – суммарная ЭДС ИП, о.е.,

$x_{\Sigma i}$  – суммарное сопротивление до т. КЗ, о.е.

Далее произведем расчет для каждой из точек.

Для т. К1:

$$x_{\Sigma 1} = x_c + x_l, \quad (41)$$

$$x_{\Sigma 1} = 1 + 0,5 = 1,5 \text{ о.е.},$$

$$I_{\text{но}1} = \frac{1}{1,5} \cdot 7,53 = 5,03 \text{ кА.}$$

Для т. К2:

$$x_{\Sigma 2} = x_{\Sigma 1} + x_r, \quad (42)$$

$$x_{\Sigma 2} = 1,5 + 16,88 = 18,37 \text{ о.е.},$$

$$I_{\text{но}2} = \frac{1}{18,37} \cdot 157,46 = 8,57 \text{ кА.}$$

Для т. К3:

$$x_{\Sigma 3} = x_{\Sigma 2} + x_{\text{кл}3}, \quad (43)$$

$$x_{\Sigma 3} = 18,37 + 0,41 = 18,78 \text{ о.е.},$$

$$I_{\text{но}3} = \frac{1}{18,78} \cdot 157,46 = 8,38 \text{ кА.}$$

Для т. К4:

$$x_{\Sigma 4} = x_{\Sigma 2} + x_{\text{кл}4}, \quad (44)$$

$$x_{\Sigma 4} = 18,37 + 1,63 = 20 \text{ о.е.},$$

$$I_{no4} = \frac{1}{20} \cdot 157,46 = 7,87 \text{ кА.}$$

Далее рассчитаем токи, определяющие значения ударных ТКЗ:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{no i} \cdot k_y, \quad (45)$$

где  $k_y$  – ударный коэффициент.

Расчеты для точек К1-К4 представлены ниже:

$$i_{y1} = \sqrt{2} \cdot 5,03 \cdot 1,82 = 12,95 \text{ кА,}$$

$$i_{y2} = \sqrt{2} \cdot 8,57 \cdot 1,92 = 23,27 \text{ кА,}$$

$$i_{y3} = \sqrt{2} \cdot 8,38 \cdot 1,82 = 21,56 \text{ кА,}$$

$$i_{y4} = \sqrt{2} \cdot 7,87 \cdot 1,72 = 19,11 \text{ кА.}$$

Чтобы сделать правильный выбор высоковольтных выключателей, важно учитывать значение апериодической составляющей тока короткого замыкания в тот момент, когда дугогасительные контакты начинают расходиться. Этот показатель рассчитывается по определённой формуле:

$$i_{at} = \sqrt{2} \cdot I_{no i} \cdot e^{\frac{-t_0}{T_a}}, \quad (46)$$

где  $T_a$  – постоянная времени затухания апериодической составляющей ТКЗ,

$t_0$  – среднее значение времени отключения выключателя.

Произведем расчеты для каждой из точек (К1-К4):

$$i_{at1} = \sqrt{2} \cdot 5,03 \cdot e^{\frac{-0,01}{0,05}} = 5,83 \text{ кА,}$$

$$i_{at2} = \sqrt{2} \cdot 8,57 \cdot e^{\frac{-0,01}{0,12}} = 11,15 \text{ кА,}$$

$$i_{at3} = \sqrt{2} \cdot 8,38 \cdot e^{\frac{-0,01}{0,05}} = 9,71 \text{ кА},$$

$$i_{at4} = \sqrt{2} \cdot 7,87 \cdot e^{\frac{-0,01}{0,03}} = 7,98 \text{ кА}.$$

Чтобы оценить, насколько сильно нагреваются «проводники и электрические аппараты из-за кратковременного, но мощного воздействия тока короткого замыкания, используют интеграл Джоуля» [20]:

$$B_k = \int_0^{t_{откл}} i_{кз}^2 dt, \quad (47)$$

где  $i_{кз}$  – ТКЗ,

$t_{откл}$  – расчетная продолжительность короткого замыкания.

$$B_k = I_{но i}^2 \cdot (t_{откл} + T_a). \quad (48)$$

Для точки К1 будут следующие значения  $B_k$ :

$$B_{k1} = 5,03^2 \cdot (0,15+0,05) = 5,07 \text{ кА}^2\text{с}.$$

Для точки К2:

$$B_{k2} = 8,57^2 \cdot (1,53+0,12) = 121,22 \text{ кА}^2\text{с}.$$

Для точки К3:

$$B_{k3} = 8,38^2 \cdot (0,53+0,05) = 40,76 \text{ кА}^2\text{с}.$$

Для точки К4:

$$B_{k4} = 7,87^2 \cdot (0,53+0,03) = 34,72 \text{ кА}^2\text{с}.$$

Все расчетные данные сведены в таблицу 17.

Таблица 17 – Результаты расчетов ТКЗ

Точки КЗ	$x_{\Sigma i}$ , о.е.	$I_{noi}$ , кА	$i_{yi}$ , кА	$i_{ati}$ , кА	$t_{откл i}$	$B_{ki}$ , кА <sup>2</sup> с
К1	1,5	5,03	12,95	5,83	0,15	5,07
К2	18,37	8,57	23,27	11,15	1,53	121,22
К3	18,78	8,38	21,56	9,71	0,53	40,76
К4	20	7,87	19,11	7,98	0,53	34,72

После того как произведены расчёты токов к.з., нужно подобрать устройства защиты и коммутации для нормального и аварийного режимов работы.

« $U_{ном}$  аппарата совпадает с классом его изоляции. Существует определённый запас электрической прочности, который указан в технических условиях на изготовление устройства» [9]. «Этот запас позволяет аппарату работать в течение длительного времени при  $U$  на 10–15% выше номинального (максимальное рабочее напряжение -  $U_{max p}$ ), на практике отклонения обычно не превышают этих значений» [16]. Поэтому при выборе устройства достаточно убедиться, что соблюдается условие:

$$U_{сети} \leq U_{ном}, \quad (49)$$

$$I_{maxp} \leq I_{ном}. \quad (50)$$

По формуле (51) выполняется проверка устройств на термостойкость:

$$B_k \leq I_T^2 \cdot t_T, \quad (51)$$

где  $I_m$  - предельный ток термостойкости, который определяется по каталогу;

$t_m$  – длительность протекания тока термостойкости, с.

$$I_{maxp} = \frac{S_{Tном} \cdot k_n}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \quad (52)$$

где  $S_{т ном}$  – «номинальная мощность трансформатора» [2];

$k_n$  – «допустимый коэффициент перегрузки трансформатора, равный 1,4» [2].

Расчет максимального тока в послеаварийном режиме в цепи силового трансформатора представлен ниже:

$$I_{\max p} = \frac{40000 \cdot 1,4}{\sqrt{3} \cdot 220} = 147 \text{ А.}$$

В таблице 18 представлены результаты выбора аппаратов, отвечающие условиям выбора.

Таблица 18 – «Выбор аппаратов защиты и коммутации» [3]

Тип оборудования	Условие выбора	Расчётные значения	Каталожные данные	Проверка условия
РУ 220				
Выключатель ВГТ-220П* - 40/2500 УХЛ1	$U_{ном} \geq U_{сети}$ $I_{ном} \geq I_{макс}$ $I_{отк.} \geq I_{по}$ $i_{дин} \geq i_y$ $I_{тс}^2 \cdot t_{тс} \geq B_k$	$U_{сети} = 220 \text{ кВ}$ $I_{макс} = 147 \text{ А}$ $I_{по} = 5 \text{ кА}$ $i_y = 13 \text{ кА}$ $B_k = 6 \text{ кА}^2\text{с}$	$U_{ном} = 220 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 2500 \text{ А}$ $I_{отк.} = 40 \text{ кА}$ $i_{дин} = 102 \text{ кА}$ $I_{тс}^2 \cdot t_{тс} = 25^2 \cdot 3 = 1875 \text{ кА}^2\text{с}$	$220 \text{ кВ} = 220 \text{ кВ}$ $2500 \text{ А} > 147 \text{ А}$ $40 \text{ кА} > 5 \text{ кА}$ $102 \text{ кА} > 13 \text{ кА}$ $1875 \text{ кА}^2\text{с} > 6 \text{ кА}^2\text{с}$
Разъединитель РГ-2-220/1000 УХЛ1	$U_{ном} \geq U_{сети}$ $I_{ном} \geq I_{макс}$ $i_{дин} \geq i_y$ $I_{тс}^2 \cdot t_{тс} \geq B_k$	$U_{сети} = 220 \text{ кВ}$ $I_{макс} = 147 \text{ А}$ $i_y = 13,2 \text{ кА}$ $B_k = 5,9 \text{ кА}^2\text{с}$	$U_{ном} = 220 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 1000 \text{ А}$ $i_{дин} = 120 \text{ кА}$ $I_{тс}^2 \cdot t_{тс} = 31,5^2 \cdot 3 = 2977 \text{ кА}^2\text{с}$	$220 \text{ кВ} = 220 \text{ кВ}$ $1000 \text{ А} > 147 \text{ А}$ $120 \text{ кА} > 13,2 \text{ кА}$ $2977 \text{ кА}^2\text{с} > 5,9 \text{ кА}^2\text{с}$
Разъединитель РГ-1-220/1000 УХЛ1	$U_{ном} \geq U_{сети}$ $I_{ном} \geq I_{макс}$ $i_{дин} \geq i_y$ $I_{тс}^2 \cdot t_{тс} \geq B_k$	$U_{сети} = 220 \text{ кВ}$ $I_{макс} = 147 \text{ А}$ $i_y = 13,2 \text{ кА}$ $B_k = 5,9 \text{ кА}^2\text{с}$	$U_{ном} = 220 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 1000 \text{ А}$ $i_{дин} = 120 \text{ кА}$ $I_{тс}^2 \cdot t_{тс} = 31,5^2 \cdot 3 = 2977 \text{ кА}^2\text{с}$	$220 \text{ кВ} = 220 \text{ кВ}$ $1000 \text{ А} > 147 \text{ А}$ $120 \text{ кА} > 13,2 \text{ кА}$ $2977 \text{ кА}^2\text{с} > 5,9 \text{ кА}^2\text{с}$
Ограничитель перенапряжений ОПН-П/ЗЭУ-220/146/2 УХЛ1	$U_{ном} \geq U_{сети}$	$U_{сети} = 220 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 220 \text{ кВ}$	$220 \text{ кВ} = 220 \text{ кВ}$
Заземлитель нейтрали ЗРП-220 II УХЛ1	$U_{ном} \geq U_{сети}$	$U_{сети} = 220 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 220 \text{ кВ}$	$220 \text{ кВ} = 220 \text{ кВ}$

Продолжение таблицы 18

Тип оборудования	Условие выбора	Расчётные значения	Каталожные данные	Проверка условия
РУ 10				
Выключатели ВВ/TEL-10-20/630УХЛ2 Отходящих линий к двигателям	$U_{ном} \geq U_{сети}$ $I_{ном} \geq I_{макс}$ $I_{отк.} \geq I_{по}$ $i_{дин} \geq i_y$ $I_{тс} \cdot t_{тс} \geq B_k$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$ $I_{макс} = 43,4 \text{ А}$ $I_{по} = 8,6 \text{ кА}$ $i_y = 23,3 \text{ кА}$ $B_k = 121 \text{ кА}^2\text{с}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 630 \text{ А}$ $I_{отк.} = 20 \text{ кА}$ $i_{дин} = 51 \text{ кА}$ $I_{тс}^2 \cdot t_{тс} = 1200 \text{ кА}^2\text{с}$	$10 \text{ кВ} = 10 \text{ кВ}$ $630 \text{ А} > 43,4 \text{ А}$ $20 \text{ кА} > 8,6 \text{ кА}$ $51 \text{ кА} > 23,3 \text{ кА}$ $1200 \text{ кА}^2\text{с} > 121 \text{ кА}^2\text{с}$
Выключатель ВВ/TEL-10-20/630УХЛ2 отходящих линий к ТП-1	$U_{ном} \geq U_{сети}$ $I_{ном} \geq I_{макс}$ $I_{отк.} \geq I_{по}$ $i_{дин} \geq i_y$ $I_{тс} \cdot t_{тс} \geq B_k$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$ $I_{макс} = 254,6 \text{ А}$ $I_{по} = 8,6 \text{ кА}$ $i_y = 23,3 \text{ кА}$ $B_k = 121 \text{ кА}^2\text{с}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 630 \text{ А}$ $I_{отк.в} = 20 \text{ кА}$ $i_{дин} = 51 \text{ кА}$ $I_{тс}^2 \cdot t_{тс} = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2\text{с}$	$10 \text{ кВ} = 10 \text{ кВ}$ $630 \text{ А} > 254,6 \text{ А}$ $20 \text{ кА} > 8,6 \text{ кА}$ $51 \text{ кА} > 23,3 \text{ кА}$ $1200 \text{ кА}^2\text{с} > 121 \text{ кА}^2\text{с}$
Ограничитель перенапряжений ОПН-КР/TEL-10УХЛ1	$U_{ном} \geq U_{сети}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$B = 10 \text{ кВ}$
Вводной выключатель ВВ/TEL-10-20/2000УХЛ2	$U_{ном} \geq U_{сети}$ $I_{ном} \geq I_{макс}$ $I_{отк.} \geq I_{по}$ $i_{дин} \geq i_y$ $I_{тс} \cdot t_{тс} \geq B_k$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$ $I_{макс} = 1617 \text{ А}$ $I_{по} = 8,6 \text{ кА}$ $i_y = 23,3 \text{ кА}$ $B_k = 121 \text{ кА}^2\text{с}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 2000 \text{ А}$ $I_{отк.} = 21 \text{ кА}$ $i_{дин} = 54 \text{ кА}$ $I_{тс}^2 \cdot t_{тс} = 1200 \text{ кА}^2\text{с}$	$10 \text{ кВ} = 10 \text{ кВ}$ $2000 \text{ А} > 1617 \text{ А}$ $21 \text{ кА} > 8,6 \text{ кА}$ $54 \text{ кА} > 23,3 \text{ кА}$ $1200 \text{ кА}^2\text{с} > 121 \text{ кА}^2\text{с}$
Секционный выключатель ВВ/TEL-10-20/1000УХЛ2	$U_{ном} \geq U_{сети}$ $I_{ном} \geq I_{макс}$ $I_{отк.} \geq I_{по}$ $i_{дин} \geq i_y$ $I_{тс} \cdot t_{тс} \geq B_k$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$ $I_{макс} = 808 \text{ А}$ $I_{по} = 8,6 \text{ кА}$ $i_{уд} = 23,3 \text{ кА}$ $B_k = 121 \text{ кА}^2\text{с}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 1000 \text{ А}$ $I_{отк.} = 20 \text{ кА}$ $i_{дин} = 51 \text{ кА}$ $I_{тс}^2 \cdot t_{тс} = 1200 \text{ кА}^2\text{с}$	$10 \text{ кВ} = 10 \text{ кВ}$ $1000 \text{ А} > 808 \text{ А}$ $20 \text{ кА} > 8,6 \text{ кА}$ $51 \text{ кА} > 23,3 \text{ кА}$ $1200 \text{ кА}^2\text{с} > 121 \text{ кА}^2\text{с}$

В ходе разработки системы электроснабжения металлургического завода были рассчитаны электрические нагрузки, выбрано оборудование, рассчитаны токи короткого замыкания, подобраны аппараты защиты и коммутации для обеспечения надежности данной системы.

### 3 Разработка системы электроснабжения для цеха холоднокатаной продукции

В данной главе более подробно рассмотрим систему электроснабжения металлургического завода на примере цеха холоднокатаной продукции.

Первым и одним из основных этапов является расчет электрических нагрузок для цеха.

Расчет для сети 0,4 кВ произведен по формулам (53) – (56) и представлен в таблице 19.

$$ПВ = \frac{t_B}{t_{Ц}} = \frac{t_B}{t_B + t_{П}}, \quad (53)$$

где ПВ – повторно кратковременный режим;

$t_B$  – время паузы;

$t_{Ц}$  – время цикла работы (не более 10 мин.);

$t_{П}$  – время включения.

$$P_{Pi} = k_{ci} \cdot P_{устi} \cdot \sqrt{ПВ}, \quad (54)$$

$$Q_{Pi} = P_{Pi} \cdot \operatorname{tg}\varphi_i, \quad (55)$$

$$S_{Pi} = \sqrt{P_{Pi}^2 + Q_{Pi}^2}, \quad (56)$$

где  $P_{устi}$  – «установленная мощность группы приемников, кВт» [19];

$k_{ci}$  – «коэффициент спроса» [19];

$\varphi_i$  – «угол фазового сдвига между U и I» [19].

Таблица 19 – Нагрузки сети 0,4 для цеха

Наименование групп электроприёмников	$P_n$ , кВт	n	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , кВАр	$S_p$ , кВА
Пятиклетевой непрерывный стан холодной прокатки	500,00	1,00	385,00	228,45	447,67
Садочные печи	700,00	2,00	341,53	319,75	467,85
Машина для распушивания рулона	300,00	1,00	116,67	102,90	155,56

Продолжение таблицы 19

Наименование групп электроприёмников	P <sub>н</sub> , кВт	n	P <sub>р</sub> , кВт	Q <sub>р</sub> , кВАр	S <sub>р</sub> , кВА
Конвейер рулонов горячекатаных полос	650,00	1,00	435,06	281,02	517,93
Непрерывный прокатно-дрессировочный стан (НПДС)	400,00	2,00	227,68	232,28	325,26
Одноклетьевого непрерывный стан холодной прокатки 2030	350,00	2,00	280,00	180,86	333,33
Упаковочное оборудование	200,00	4,00	151,79	113,84	189,74
Линия покрытия полимерной пленкой	87,00	1,00	57,18	36,94	68,07
Ножницы	3,50	1,00	1,41	0,91	1,68
Весы	9,00	1,00	6,83	3,87	7,85
Передаточная тележка (80 т)	11,50	4,00	9,46	7,59	12,12
Ножницы для отбора проб	3,50	2,00	0,44	0,33	0,55
Машина зачистки фрезерованием	54,00	1,00	9,92	6,15	11,67
Барабанный разматыватель прокатного стана	700,00	1,00	431,65	278,82	513,87
Кантователи листов и рулонов	3,50	6,00	1,90	1,28	2,29
Аппараты для электрохимической очистки	800,00	1,00	404,77	229,39	465,25
Итого:	4772,00	-	2861	2024,4	3520,7

Далее выберем шинопроводы для цеха, для этого используем формулы:

$$I_{\text{ном.ш.}} \geq I_{\text{р.а.}} \geq I_{\text{макр}}, \quad (57)$$

где  $I_{\text{ном.ш.}}$  – номинальный ток;

$I_{\text{р.а.}}$  – расчетный послеаварийный ток;

$I_{\text{макр}}$  – максимальный рабочий ток.

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (58)$$

где  $n$  – кол-во шинопроводов.

Данные занесены в таблицу 20.

Таблица 20 – Выбор шинопроводов

Наименование	Pp, кВт	Qp, кВАр	Sp, кВА	Ip, А	Ином, А	S, мм <sup>2</sup>
ШМА 1	2066,70	1394,91	2503,71	3613,79	4000	160x20
ШМА 2	794,60	629,47	1017,00	2935,83	4000	160x20

Для ШМА выбираем шинопроводы большой мощности Canalis КТ (КТА-40) с номинальным током 4000 А.

«Электрооборудование рассчитано на работу с трёхфазным переменным током и напряжением 380 В. Условия в производственном цехе стандартные. Поскольку расположение приёмников электроэнергии стационарное, но неоднородное, электроснабжение обеспечивают комплектные магистральные шинопроводы типа ШМА и силовые РП.» [2]

«Силовые распределительные шкафы и пункты используются для приёма и распределения электрической энергии среди групп потребителей 3-хфазного переменного тока с напряжением 380 В.» [2]

Для производственных помещений с нормальными условиями окружающей среды выпускают шкафы серии ШРС-1-53УЗ, СПУ-62, ШРС-1-04-7-54-УЗ-001-Узола, и ШРС-1-54-УЗ.

Вместе с силовыми шкафами используют распределительные пункты серии ПР-9000, в них встроены автоматические выключатели, это позволяет автоматизировать процесс.

При выборе силовых пунктов и шкафов учитывают состояние окружающей среды и количество подключаемых потребителей электроэнергии.

«Для прокладки кабеля от трансформаторов Т30 и Т31 до РУ ШРА 1 и ШРА 2 выбраны АВ серии ВА-52Г-33. Они используются для проведения тока в нормальном режиме и надёжного отключения при КЗ, различных перегрузках, а также при недопустимых снижениях напряжения» [3]. «Помимо этого, эти выключатели позволяют выполнять нечастые (максимум 6 раз в сутки) оперативные включения и отключения электросети» [10]. АВ предназначены для эксплуатации в электроустановках с напряжением до 440 В постоянного тока и до 660 В переменного тока частотой 50 и 60 Гц.

Для расчета АВ используем формулу:

$$I_p = \frac{P}{U}. \quad (59)$$

Таблица 21 – Подбор АВ

Наименование групп электроприёмников	P <sub>н</sub> , кВт	I <sub>p</sub>	I <sub>ном</sub>	Автоматический выключатель
Пятиклетевой непрерывный стан холодной прокатки	500	1250	1600	ВА 55-1600
Садочные печи	700	1750	2000	ВА 55-43
Машина для распушивания рулона	300	750	1000	ВА 55-41
Конвейер рулонов горячекатаных полос	650	1625	2000	ВА 55-43
Непрерывный прокатно-дрессировочный стан (НПДС)	400	1000	1000	ВА 55-41
Одноклетевой непрерывный стан холодной прокатки 2030	350	875	1000	ВА 55-41
Упаковочное оборудование	200	500	500	ВА 57-39
Линия покрытия полимерной пленкой	87	217,5	250	ВА 55-250
Ножницы	3,5	8,75	10	SH201LC10
Весы	9	22,5	32	ABB1-полюсный S201 C32
Передачная тележка (80 т)	11,5	28,75	32	ABB1-полюсный S201 C32
Ножницы для отбора проб	3,5	8,75	10	SH201LC10
Машина зачистки фрезерованием	54	135	250	ВА 55-250
Барабанный разматыватель прокатного стана	700	1750	2000	ВА 55-43
Кантователи листов и рулонов	3,5	8,75	10	SH201LC10
Аппараты для электрохимической очистки	800	2000	2000	ВА 55-43

Подведем итоги по главе с разработкой системы электроснабжения цеха. В графическом материале 4 представлено расположение оборудования в цехе холоднокатанной продукции №1. Электрооборудование предназначено для работы от переменного 3-хфазного тока с напряжением 380 В. Условия среды в помещении цеха можно назвать нормальными.

Расположение электрических устройств на участках цеха – стационарное и неравномерное, поэтому система электроснабжения предусматривает

использование силовых РП серии ПР-9000. Выбор СП (силовых пунктов) и шкафов зависит от количества подключённых электроприёмников и их расчётной нагрузки: ток группы электроприёмников, подсоединённых к силовому пункту, не должен превышать номинальный ток пункта.

Электроприёмники подключаются к СП при помощи кабелей или проводов, проложенных в защитных трубах или металлорукавах. Силовые пункты присоединяются к магистральному шинопроводу с помощью перемычки, которая соединяет вводной автомат пункта с ответвительной секцией ШМА.

На графических листах 4-5 представлены схемы для системы электроснабжения цеха. Графический лист 4 отражает расположение технологического оборудования цеха, на листе 5 представлена линейная схема подключения электрооборудования в цеху.

По данным, представленным выше, можно сделать вывод, что спроектированная система электроснабжения может считаться пригодной для ее использования в реальном цеху металлургического завода.

При проектировании системы электроснабжения для цеха были учтены необходимые требования и факторы, влияющие на надежность и работоспособность данной системы, например, потребляемая электроприборами мощность, категория их надежности и другие.

## **4 Молниезащита и заземление электроустановок системы электроснабжения**

Молниезащита и заземление системы электроснабжения металлургического завода – это критически важные меры для обеспечения безопасности и сохранности оборудования. Они помогают предотвратить повреждения от ударов молнии и других негативных факторов.

Молниезащита представляет собой комплекс технических решений, которые включают в себя специальные устройства для приёма разрядов молний, токоотводы и контур заземления. Существует несколько видов молниеприёмников: молниеприёмная сетка, стержневые и тросовые молниеотводы. Все они выполняют функцию «ловушки» для молний.

Заземление же обеспечивает электробезопасность. Оно достигается путём соединения электроустановок (шкафов управления, корпусов электродвигателей, станков и т. п.) с заземляющим устройством, которое состоит из заземлителя и заземляющих проводников. На промышленных предприятиях используют как естественные, так и искусственные заземлители. Естественные заземлители – это металлические трубопроводы и конструкции, проложенные непосредственно в земле, а также металлоконструкции самого цеха. Искусственные заземлители представляют собой вертикальные и горизонтальные заземлители, такие как стальные уголки, стержни и трубы.

На электроэнергетических объектах заземляющее устройство выполняет несколько функций:

- защитное заземление, то есть обеспечение безопасности работы обслуживающего персонала;
- рабочее заземление, необходимое для присоединения нейтралей генераторов и трансформаторов;
- возможность присоединить средства грозозащиты, такие как разрядники и молниеотводы.

Проведем необходимые расчеты молниезащиты для главной понизительной подстанции. Чтобы обеспечить защиту от молнии, необходимо установить 4 молниеотвода.

$$h_A = h - h_x, \quad (60)$$

где  $h_A$  – активная высота молниеотвода, м;

$h$  – высота молниеотвода, м;

$h_x$  – высота установки молниеотвода, м.

$$h_A = 40 - 8 = 32 \text{ м.}$$

Далее определим зону защиты по следующей формуле (61):

$$r_x = h_a \cdot \frac{1,6}{1 + \frac{h_x}{h}}, \quad (61)$$

$$r_x = 32 \cdot \frac{1,6}{1 + \frac{8}{40}} = 42,7 \text{ м.}$$

Проведем проверку:

$$a \leq 7 \cdot h_A, \quad (62)$$

$$46 \leq 7 \cdot 32 = 224,$$

$$D = \sqrt{a^2 + b^2} \leq 8 \cdot h_A, \quad (63)$$

$$D = \sqrt{46^2 + 32^2} \leq 8 \cdot 32,$$

$$D = 56 \text{ м} \leq 256 \text{ м.}$$

По результатам проверки, можно сделать вывод, что подстанция в полной мере находится под защитой от прямых ударов молнии.

Определим сопротивление заземляющего устройства по формуле:

$$R_3 \leq \frac{U_p}{I_3}, \quad (64)$$

$$R_3 \leq 0,5 \text{ Ом.}$$

Сопротивление искусственного заземлителя  $R_u = R_z = 0,5 \text{ Ом}$ , так как данных о естественных заземлителях нет.

Определим параметры электродов, которые будут использоваться для создания системы заземления. В роли вертикальных элементов выберем стержни из прочного материала. Их длина составит 5 метров, диаметр – 14 мм. Такие заземлители хорошо защищены от коррозии и долго служат.

Для установки стержней в грунт на глубину 0,7 метра воспользуемся специальными инструментами – электрозаглубителями. А в качестве горизонтальных электродов возьмём полосовую сталь с параметрами сечения 4 х 40 мм. Чтобы обеспечить надёжное соединение и предотвратить возможные нарушения контакта из-за усадки грунта, уложим её на ребро.

Вертикальные и горизонтальные электроды соединим сваркой.

Рассчитаем периметр контурного заземления:

$$P = 2 \cdot (46 - 4 + 32 - 4) = 140 \text{ м.}$$

Среднее расстояние между электродами равно:

$$a = \frac{P}{n_v}, \quad (65)$$

где  $n_v$  – предварительное количество электродов вертикальных.

$$a = \frac{140}{70} = 2 \text{ м.}$$

$K_{u.g.} = 0,29$  – коэффициент использования вертикальных электродов.

Рассчитаем удельное сопротивление глины для вертикальных электродов:

$$\rho_{p.v.} = K_{c.g.} \cdot \rho_0, \quad (66)$$

где  $K_{c.g.}$  – повышающий коэффициент, который учитывается сезонное состояние грунта;

$\rho_0$  – удельное сопротивление глины,  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ .

$$\rho_{p.v.} = 1,3 \cdot 60 = 78 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Для горизонтальных электродов формула удельного сопротивления, следующая:

$$\rho_{p.g.} = K_{c.g.} \cdot \rho_0, \quad (67)$$

$$\rho_{p.g.} = 3 \cdot 60 = 180 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Сопротивление растеканию тока вертикального электрода:

$$R_B = \frac{\rho_{p.v.}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right), \quad (68)$$

где  $l$  – длина электрода, м;

$d$  – диаметр заземлителя, мм;

$t$  – расстояние до середины электрода от поверхности земли.

$$R_B = \frac{78}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left( \ln \frac{2 \div 5}{0,014} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 3,2 + 5}{4 \cdot 3,2 - 5} \right) = 17,3 \text{ Ом.}$$

Далее требуется определить ориентировочное количество заземлителей (электродов) по формуле:

$$n_B = \frac{R_B}{K_{и.в.} \cdot R_{и.}}, \quad (69)$$

где  $K_{и.в.}$  – коэффициент использования, предварительно выбираем равным 0,29.

$$n_B = \frac{17,3}{0,29 \cdot 0,5} = 120.$$

По формулам (70) – (71) определим сопротивление растеканию тока для горизонтальных электродов и число вертикальных электродов, учитывая проводимость горизонтальных:

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho_{\text{п.г.}}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l^2}{d_{\text{э}} \cdot t}, \quad (70)$$

где  $l$  – длина электрода горизонтального, м;

$t$  – глубина, на которую будут закладываться электроды;

$d_{\text{э}}$  – диаметр электрода эквивалентный.

$$n_{\text{в.у}} = \frac{R_{\text{в}} \cdot R_{\Gamma} - R_{\text{и}} \cdot K_{\text{и.г.}} \cdot R_{\text{в}}}{R_{\text{и}} \cdot R_{\Gamma} \cdot K_{\text{и.в.}}}, \quad (71)$$

где  $K_{\text{и.г.}}$  – уточненное значение коэффициента использования, равное 0,16;

$K_{\text{и.в.}}$  – уточненное значение коэффициента использования, равное 0,28.

$$R_{\Gamma} = \frac{180}{2 \cdot \pi \cdot 114} \cdot \ln \frac{114^2}{0,02 \cdot 0,7} = 3,5 \text{ Ом.}$$

$$n_{\text{в.у}} = \frac{17,3 \cdot 3,5 - 0,5 \cdot 0,16 \cdot 17,3}{0,5 \cdot 3,5 \cdot 0,28} = 121.$$

Проведем проверку:

$$\frac{n_{\text{в.у}} - n_{\text{в}}}{n_{\text{в}}} \cdot 100\%, \quad (72)$$

$$\frac{121 - 120}{120} \cdot 100\% = 1\%.$$

Исходя из полученных результатов, а именно, что различие менее 10%, можно сделать вывод, что количество вертикальных электродов составит 121.

В данной главе была разработана система, обеспечивающая безопасность и сохранность электрооборудования, такая как, молниезащита, а также заземление. Расчеты представлены выше.

## 5 Требования охраны труда

Металлургическое производство – это высокоэнергетическое предприятие, которое занимается различного рода процессами в области металлургии, которые могут быть опасными для жизни и здоровья людей. Строгое соблюдение требований охраны труда и электробезопасности является ведущим требованием для данного предприятия. В комплекс мероприятий, направленных на предотвращение несчастных случаев, для системы охраны труда на таких заводах входят защита работников от воздействия опасных и вредных факторов, а также обеспечение безопасных условий работы.

Каждое рабочее место должно регулярно проверяться на наличие потенциальных источников опасности, к которым относятся шум, вибрации, высокие температуры, токсичные вещества, а также механические и электрические воздействия, несущие опасность жизни и здоровью человека. У каждого цеха или участка завода должна быть индивидуальная карта безопасности.

Все сотрудники обязаны регулярно проходить обучение по безопасности труда, основам первой помощи, а также специфике работы с опасным оборудованием. На постоянной основе должны проводиться тренировки и аттестация работников, работающих с тяжёлым и потенциально опасным оборудованием.

Основные производственные работники (ОПР) металлургического предприятия могут быть подвержены профессиональным заболеваниям, связанным с воздействием высоких температур, пыли, вибрации и вредных химических веществ. Чтобы предотвратить производственные травмы и заболевания, регулярно проводятся медицинские осмотры сотрудников. Кроме того, для обеспечения безопасности используются средства индивидуальной защиты: противогазы, защитные костюмы, очки и перчатки.

На случай нештатных ситуаций (например, пожара) на предприятии чётко распределяются обязанности между работниками. Это позволяет оперативно реагировать и минимизировать возможный ущерб. Завод оснащён планами эвакуации и ликвидации аварийных ситуаций, а также системами оповещения.

## 5.1 Электробезопасность

Электробезопасность представляет собой комплекс мер, направленных на защиту людей от поражения электрическим током и предотвращение повреждения оборудования из-за неисправностей в электрической системе.

Проектирование и эксплуатация электрических установок должны соответствовать Правилам устройства электроустановок (ПУЭ), ГОСТ 33.1001-2015 и другим стандартам. Оборудование должно быть надёжно заземлено, а все металлические конструкции, не являющиеся частью электрической цепи, – иметь защитное заземление.

Для участков с риском поражения электрическим током устанавливают устройства защитного отключения (УЗО). Они автоматически отключают питание при утечке тока в случае КЗ или других неисправностей.

Электрические установки, кабели, трансформаторы и аппараты защиты регулярно проверяют и обслуживают, чтобы обеспечить их надёжную работу.

Сотрудники, обслуживающие электрическое оборудование, используют средства индивидуальной защиты: диэлектрические перчатки, ботинки, коврики, защитные очки и каски.

Перед началом работ на электросетях, в распределительных пунктах или на электрических устройствах полностью отключают питание и проверяют отсутствие напряжения с помощью специальных измерительных приборов.

Все высоковольтные установки ограждены, вокруг них установлены предупреждающие знаки и указания, например, «Осторожно, высокое напряжение».

Работы в электроустановках под напряжением допускаются только в исключительных случаях и выполняются с соблюдением строгих правил безопасности. Для этого используют специальные инструменты и защитные средства.

Весь металлургический завод оборудован системой заземления, которая исключает возможность поражения электрическим током при повреждении оборудования или проводов.

## Заключение

В ходе выполнения бакалаврской работы была разработана система электроснабжения металлургического завода. В рамках исследования были рассмотрены основные требования к системе электроснабжения предприятия и ключевые аспекты, которые являются основой для обеспечения надежности и безопасности электроснабжения на предприятии.

В первой главе была рассмотрена характеристика металлургического предприятия, где были представлены производственные помещения и их описание, рассмотрены схемы расположения помещений на территории металлургического завода, описаны требования к проектируемому объекту, по результатам которого были выделены основные нормативные правила для проектирования системы электроснабжения металлургического цеха.

Во второй главе были проанализированы возможные разновидности электрических схем соединений, выбрана оптимальная структура электроснабжения, определены источники питания предприятия и оценена надежность выбранной схемы с учетом всех факторов и требований. Помимо этого, были произведены анализ и необходимый расчёт электрических нагрузок металлургического завода, включающий такие параметры, как потребляемую мощность и расчет нагрузок по цехам, также были подобраны трансформаторы с учетом компенсации реактивной мощности, кабель и его сечения, рассчитаны ТКЗ и выбрано коммутационное и защитное оборудование.

В третьей главе была разработана система электроснабжения цеха с произведенными необходимыми расчетами и разработанными схемами.

В четвертой главе подобрана системы молниезащиты и заземления, которая обеспечит надежную защиту электроустановок системы электроснабжения.

В пятой главе рассмотрены основные требования охраны труда и электробезопасности. Также был произведен анализ нормативной документации, такой как «Правила устройства электроустановок (ПУЭ)» и «Межотраслевые правила по охране труда (ГОСТ)». Проведенная работа по рассмотрению и анализу указанной документации, позволила определить

ключевые аспекты в обеспечении безопасности работников при выполнении работ.

Так же было разработано 6 чертежей для электроснабжения металлургического завода, представленные в виде графических рисунков 1-6.

Проведенная работа по разработке системы электроснабжения соответствует требованиям надежности и безопасности, при которой обеспечивается бесперебойная работа производства. Поставленные в бакалаврской работе цели были достигнуты. Актуальность данной темы обусловлена важностью регулярной модернизации систем электроснабжения металлургических заводов с целью увеличения эффективности производства и надежности работы предприятий.

Полученные знания и навыки в ходе написания выпускной квалификационной работы являются важным этапом для дальнейшей профессиональной деятельности.

## Список используемых источников

1. Абрамова, Е. Я. Курсовое проектирование по электроснабжению промышленных предприятий: учебное пособие. / Е.Я. Абрамова. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2017. – 122 с. – ISBN: 978-5-7410-1847-7. – Текст: непосредственный.

2. Автоматический выключатель. Устройство, схемы включения, характеристики, выбор автоматических выключателей // ЭлектроТехИнфо : [сайт]. – URL: [https://eti.su/articles/nizkovoltnaya-tehnika/nizkovoltnaya-tehnika\\_1444.html](https://eti.su/articles/nizkovoltnaya-tehnika/nizkovoltnaya-tehnika_1444.html) (дата обращения: 15.04.2025).

3. Автоматы типа ВА51; ВА52; ВА53; ВА55; ВА56 // Элниго – Инновации в традиции : [сайт]. – URL: <https://elnigo.ru/main/elektrotexnicheskaya-produkciya-i-elektronika/avtomaticheskie-vyklyuchateli-i-kontaktory/avtomaticheskij-vyklyuchatel/avtomaticheskij-vyklyuchatel-va/avtomat-va51-va52-va53-va55-va56/> (дата обращения: 15.04.2025).

4. Андреенков, Е.С. Выбор оптимальных параметров схем электрических сетей напряжением до 1 кВ / Е.С. Андреенков // Электронная библиотека : [сайт]. – URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=66237442> (дата обращения 07.03.2025).

5. Бекиров, Э.А., Электроснабжение промышленных предприятий, зданий сооружений с использованием энергоагрегатов возобновляемой энергетики: книга. / Э.А. Бекиров. – Симферополь: издательство «Ариал», 2019. – 370 с. – ISBN: 978-5-907162-13-6. – Текст: непосредственный.

6. Вахнина, В.В. Системы электроснабжения: электронное учебное пособие. / В.В. Вахина. – Тольятти: ТГУ, 2015. – 46 с. – URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/2943> (дата обращения: 06.03.2025). – Текст: электронный.

7. ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты // МегаНорм : [сайт] – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293733/4293733591.pdf> (дата обращения: 27.04.2025). – Текст: электронный.

8. Расчет электрических нагрузок, выбор главных схем и оборудования промышленных предприятий: учебное пособие. / В.К. Грунин, С.Г. Диев, В.В.

Карпов [и др.]; под общ. ред. В.К. Гринина. – Омск: ОмГТУ, 2001. – 104 с. – ISBN 5-8149-0067-9. – Текст: непосредственный.

9. Гужов, Н.П. Система электроснабжения: учебное пособие / Н.П. Гужов, В.Я. Ольховский, Д.А. Павлюченко. – Новосибирск: Издательство НТУ, 2006. – 154 с. – ISBN: 978-5-7782-2734-7. – Текст: непосредственный.

10. Егорова, М.А. Конкурентное право России: учебное пособие. / М.А. Егорова, Д.А. Петров. – Москва: «Проспект», 2019. – 192 с. – ISBN: 978-5-9988-0827-2. – Текст: непосредственный.

11. Киреева, Э.А., Электрооборудование электрических станций, сетей и систем: учебное пособие. / Э.А. Киреева. – Москва: Издательство «КноРус», 2017. – 320 с. – ISBN: 978-5-406-12616-5. – Текст: непосредственный.

12. Кнорринг, Г.М. Справочная книга для проектирования электрического освещения: учебник. / Г.М. Кнорринг, И.М. Фадин, В.Н. Сидоров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1992. – 448 с. – URL: <https://www.elec.ru/viewer?url=files/2014/09/24/Knorring.pdf> (дата обращения: 19.03.2025). – Текст: электронный.

13. Кобелев, А.В. Проектирование систем электроснабжения объектов коммунальной и производственной инфраструктуры: учебное пособие / А. В. Кобелев, С. В. Кочергин, Е. А. Печагин. – Тамбов: ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – URL: <http://dlib.rsl.ru/rsl01008000000/rsl01008788000/rsl01008788838/rsl01008788838.pdf> (дата обращения: 20.04.2025). – Текст: электронный.

14. Крубцов, Д.С. Исследование электромагнитной совместимости активных выпрямителей электроприводов непрерывных прокатных станов: диссертация / Д.С. Крубцов. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2017. – 151 с. – URL: <http://dlib.rsl.ru/rsl01009000000/rsl01009481000/rsl01009481987/rsl01009481987.pdf> (дата обращения: 25.04.2025). – Текст: электронный.

15. Кудашев, А.С., Электрические сети и подстанции: учебное пособие / А.С. Кудашев. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2021. – 102 с. – URL:

<http://library.vstu.ru/ebsvstustaticpage?command=subdisc&disc=Электрические%20сети%20и%20подстанции> (дата обращения: 11.03.2025). – Текст: электронный.

16. Кудрин, Б.И. Электроснабжение потребителей и режимы: учебное пособие / Б.И. Кудрин, Б.В. Жилин, Ю.В. Матюнина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 412 с. – ISBN 978-5-383-00753-2 – Текст: непосредственный.

17. Куликовский, В.С., Кручек, О.А., Герасимов, А.И., Ковалева, О.А., Кузьмин, С.В. Электроснабжение и электрооборудование горных предприятий. / В.С. Куликовский, О.А. Кручек, А.И. Герасимов, О.А. Ковалева, С.В. Кузьмин. // Электронная библиотека : [сайт]. – URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=45651974> (дата обращения: 13.03.2025).

18. Сафиуллин, Р.Н. Основы электроснабжения промышленных предприятий: учебное пособие / Р.Н. Сафиуллин, В.А. Третьяк. – Санкт-Петербург, 2021. – 199 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=mfc dax> (дата обращения: 10.03.2025). – Текст: электронный.

19. Синенко, Л.С. Электроснабжение. Версия 1.0: учебное пособие / Л.С. Синенко, Е.Ю. Сизганова, Ю.П. Попов. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 140 с. – URL: [https://lms.kgeu.ru/pluginfile.php?file=%2F207339%2Fmod\\_resource%2Fcontent%2F1%2FЭлектроснабжение%20-%20КП.pdf](https://lms.kgeu.ru/pluginfile.php?file=%2F207339%2Fmod_resource%2Fcontent%2F1%2FЭлектроснабжение%20-%20КП.pdf) (дата обращения: 13.04.2025). – Текст: электронный.

20. Шахнин, В.А., Электроснабжение промышленных предприятий: учебное пособие. / В.А. Шахнин. – Владимир: Издательство Владимирский государственный университет, 2014. – 95 с. – URL: <https://studfile.net/preview/16712991/> (дата обращения: 17.03.2025). – Текст: электронный.