

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра Электроснабжение и электротехника

(наименование)

13.03.02. Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Реконструкция системы электроснабжения сварочного производства

Обучающийся

Жиров Д.В.

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.п.н., доц. М. Н. Третьякова

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

Тольятти 2024

Аннотация

«Работа посвящена разработке мероприятий по реконструкции системы электроснабжения машиностроительного предприятия с последовательной проверкой основных решений» [12].

Обоснованы мероприятия по реконструкции схемы электрических соединений сварочного производства машиностроительного предприятия.

На основе полученной информации, проведено решение следующих основных задач:

- выбраны рациональные схемы электроснабжения питающей и распределительной сети предприятия и сварочного производства;
- рассчитаны электрические нагрузки на объекте исследования и на предприятии в целом;
- «проведён расчет и выбор силовых трансформаторов для установки и использования на главной понизительной подстанции (далее – ГПП), а также на цеховых трансформаторных подстанциях (далее – ТП)» [12], питающих сварочное производство и прочие цеха и участки машиностроительного предприятия;
- осуществлён расчет и выбор электрооборудования схемы электроснабжения объекта, включая выбор проводников и ячеек распределительных устройств питающих ГПП и ЦТП, с последующей их компоновкой;
- рассчитано заземления ГПП предприятия.

Данные вопросы решены в работе в полном объёме.

Работа состоит из расчётно-пояснительной записки объёмом 72 печатные страницы, а также шести чертежей формата А1.

Содержание

Введение.....	4
1 Анализ технологического процесса и электроприемников предприятия	7
1.1 Исходная характеристика объекта исследования.....	7
1.2 Требования к реконструкции систем электроснабжения машиностроительного предприятия	13
2 Расчёт электрических нагрузок и выбор схемы электроснабжения предприятия	17
2.1 Схемы электроснабжения предприятия и цеха сварочного производства	17
2.2 Расчёт электрических нагрузок цеха сварочного производства машиностроительного предприятия	19
2.3 Расчёт электрических нагрузок освещения предприятия.....	24
2.4 Расчёт электрических нагрузок предприятия	27
3 Расчёт и выбор силовых трансформаторов	33
3.1 Проверка трансформаторов главной понизительной подстанции.....	33
3.2 Выбор места расположения ГПП	35
3.3 Выбор и проверка трансформаторов цеховых трансформаторных подстанций.....	37
4 Расчёт и выбор электрооборудования.....	41
4.1 Выбор кабельных линий цеха сварочного производства	41
4.2 Выбор и проверка проводников питающей сети предприятия	44
4.3 Выбор электрических аппаратов цеха сварочного производства.....	47
4.4 Выбор электрических аппаратов питающей сети предприятия.....	51
5 Расчёт заземления ТП-10/0,4 кВ цеха сварочного производства.....	58
Заключение	67
Список используемых источников.....	71

Введение

Сварочное производство на машиностроительном заводе выполняет критически важные функции, связанные с изготовлением, сборкой и ремонтом различного оборудования, машин и их составляющих. Данный процесс является неотъемлемой частью производственного цикла, позволяя создавать прочные, надежные и долговечные изделия.

Сварочные работы позволяют соединять отдельные металлические элементы в единую конструкцию, обеспечивая её необходимую прочность и стабильность.

Многие детали машин и механизмов требуют для своего изготовления применения сварочных технологий для обеспечения их целостности и функциональности.

Сварка используется для восстановления изношенных или поврежденных деталей машин, что позволяет продлить срок их службы.

Сварные соединения отличаются высокой прочностью, что критически важно для многих машиностроительных изделий. В некоторых случаях, например, при производстве гидравлических систем, требуется не только прочность, но и герметичность соединений, которую обеспечивает сварка.

Сварочные работы могут выполняться для широкого спектра металлов и сплавов, что делает их универсальным инструментом на машиностроительном производстве.

В машиностроении применяются различные методы сварки, включая дуговую, аргонодуговую, лазерную, электронно-лучевую и другие, выбор которых зависит от материала, типа изделия и требований к соединению.

Сварочное производство оснащено специализированным оборудованием, включая сварочные аппараты, автоматы и полуавтоматы, станки для плазменной и лазерной резки, а также вспомогательное оборудование для подготовки и очистки деталей.

Таким образом, сварочное производство машиностроительного завода тесно связано с инновационными технологиями и требует высокой квалификации персонала, что в совокупности обеспечивает производство высококачественной и конкурентоспособной продукции.

Ключевыми факторами эффективности системы электроснабжения на современных машиностроительных заводах, их производственных отделениях и рабочих зонах, становятся гарантирование безопасных условий труда, стабильность функционирования, повышенная энергоэффективность, электромагнитная совместимость, а также способность выдерживать внешние влияния и быстро адаптироваться к колебаниям производственных нагрузок и изменениям в технологических цепочках.

Принятие и реализация подобных стратегий приводит к увеличению производственной мощности, сокращению затрат на электроэнергию и снижению вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций, что, в свою очередь, укрепляет конкурентные позиции и повышает общую эффективность как отдельно взятого предприятия, так и машиностроительной отрасли в целом.

Достижение заданных целей на предприятиях, введённых в эксплуатацию, является техническое перевооружение их цехов и участков.

Данный вопрос исследуется в настоящей работе, обуславливая её актуальность и практическую ценность [17], [20].

Основная цель работы заключается в разработке рациональных и эффективных мероприятий по реконструкции системы электроснабжения сварочного производства машиностроительного предприятия с последовательной проверкой основных решений.

Данная реконструкция обусловлена вводом в эксплуатацию новых потребителей цеха сварочного производства данного предприятия.

Объектом исследования является система электроснабжения цеха сварочного производства машиностроительного предприятия.

Предметом исследования являются параметры и характеристики надёжности, безопасности, бесперебойности и безаварийности электроснабжения, экономичности и экологичности объекта исследования.

Достижение основной цели выполняется через решение следующих основных поставленных задач:

- проведение анализа технологического процесса и электроприемников предприятия, а также его сварочного производства;
- обоснование мероприятий по реконструкции схемы электрических соединений сварочного производства машиностроительного предприятия;
- выбор рациональных схем электроснабжения питающей и распределительной сети предприятия и сварочного производства;
- расчёт электрических нагрузок на объекте исследования и на предприятии в целом;
- расчёт и выбор силовых трансформаторов для установки и использования на ГПП, а также на цеховых ТП, питающих сварочное производство и прочие цеха и участки машиностроительного предприятия;
- расчет и выбор электрооборудования схемы электроснабжения объекта, включая выбор проводников и ячеек распределительных устройств питающих ГПП и ЦТП, с последующей их компоновкой;
- расчёт заземления ГПП предприятия.

Данные вопросы решаются в работе в полном объёме.

1 Анализ технологического процесса и электроприемников предприятия

1.1 Исходная характеристика объекта исследования

Машиностроительный завод играет важную роль в экономике любой страны, являясь ключевым звеном в промышленном секторе.

Основное назначение машиностроительного завода заключается в производстве машин и оборудования, необходимых для различных отраслей промышленности, сельского хозяйства, строительства, транспорта и бытового использования.

Известно, что состав и спецификация подразделений машиностроительного предприятия зависят от направленности предприятия, его масштабов и производственных задач [13].

Состав типичного машиностроительного завода на примере [4], представлен в работе на рисунке 1.

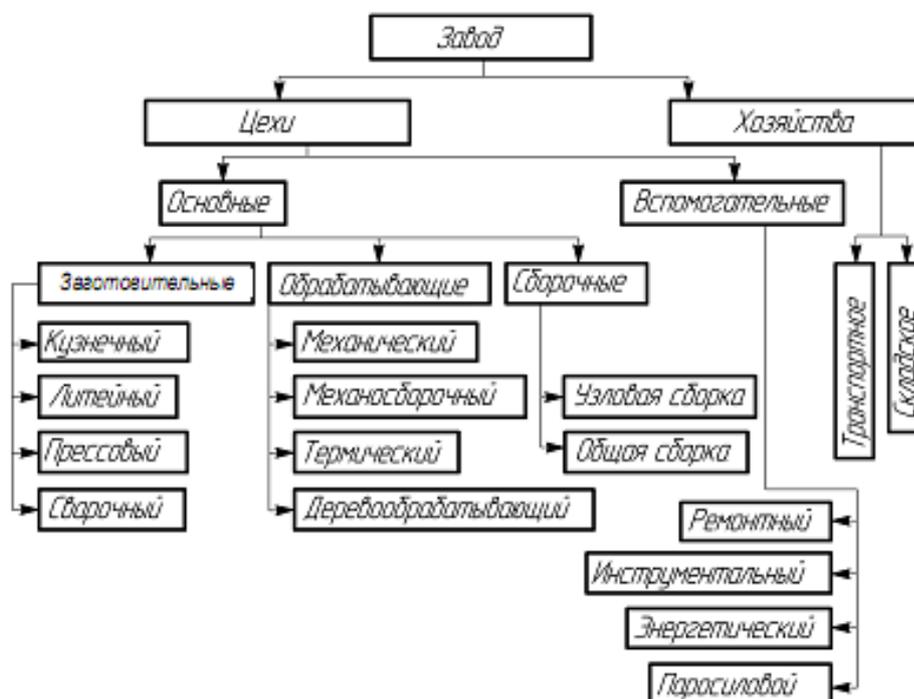


Рисунок 1 – Состав типичного машиностроительного завода

Такие заводы производят широкий ассортимент продукции, от простых инструментов до сложных механизмов и технологических линий. К их продукции относятся создание двигателей, турбин, насосов, станков, сельскохозяйственной техники, оборудования для добычи полезных ископаемых и многое другое.

В состав рассматриваемого в работе машиностроительного предприятия, которое рассмотрено в настоящей работе, входит комплекс следующих цехов и подразделений [4]:

- литейный цех черных металлов (с двумя синхронными высоковольтными электродвигателями 10 кВ);
- литейный цех цветных металлов;
- цех обработки двигателей;
- цех обработки трансмиссии;
- цех сборки и испытания двигателей;
- штамповочный цех деталей корпуса техники;
- штамповочный цех деталей техники;
- цех производства мелких деталей;
- сборочный цех основной сборки;
- сборочный цех дополнительной сборки;
- цех сварочного производства.

Каждое из перечисленных подразделений машиностроительного предприятия выполняет специфические функции, обеспечивая эффективное и бесперебойное производство. Ниже приводится краткое описание функций перечисленных подразделений [13].

Литейный цех черных металлов занимается производством отливок из черных металлов, используя два синхронных высоковольтных электродвигателя 10 кВ для мощного оборудования, включая печи для плавки металла. Литейный цех цветных металлов специализируется на изготовлении изделий из цветных металлов и сплавов, таких как алюминий, медь и их сплавы, методом литья.

Цех обработки двигателей выполняет работы по механической обработке компонентов двигателей, таких как блоки цилиндров, головки блоков и кривошипно-шатунные механизмы.

Цех обработки трансмиссии специализируется на обработке компонентов трансмиссии, включая коробки передач, дифференциалы и другие элементы системы передачи мощности.

Цех сборки и испытания двигателей отвечает за сборку двигателей из обработанных деталей и последующее тестирование готовых агрегатов на соответствие техническим требованиям.

Штамповочный цех деталей корпуса техники производит штамповку крупногабаритных деталей и компонентов корпусов техники, таких как кузова автомобилей или корпуса станков.

Штамповочный цех деталей техники занимается штамповкой мелких и средних деталей и компонентов для различного оборудования и машин.

Цех производства мелких деталей специализируется на изготовлении мелких деталей и компонентов, требующих высокой точности, методами токарной, фрезерной обработки и другими видами механической обработки.

Сборочный цех основной сборки осуществляет сборку основных узлов и агрегатов машин и оборудования из произведенных и обработанных деталей.

Сборочный цех дополнительной сборки выполняет окончательную сборку, монтаж дополнительного оборудования, настройку и подготовку продукции к испытаниям и отгрузке.

Цех сварочного производства предназначен для выполнения сварочных работ различной сложности, включая соединение металлических деталей и конструкций для создания прочных и надежных изделий.

Каждый из этих цехов выполняет уникальный набор задач, обеспечивая полный цикл производства от литья и обработки до сборки и испытания готовой продукции.

Исходные данные электрических нагрузок машиностроительного предприятия представлены в форме таблицы 1.

Таблица 1 – Исходные данные электрических нагрузок машиностроительного предприятия

Наименование цеха	Номер по плану	n, шт	$\sum P_n$, кВт	P_n , кВт	m
Литейный цех черных металлов (СД 10 кВ)	1	2	2500	1250	1
Литейный цех цветных металлов	2	30	1550	1-400	400
Цех обработки двигателей	3	50	520	1-25	25
Цех обработки трансмиссии	4	40	480	1-20	20
Цех сборки и испытания двигателей	5	30	2270	1-200	200
Штамповочный цех деталей корпуса техники	6	50	850	1-50	50
Штамповочный цех деталей техники	7	25	460	2-30	15
Цех производства мелких деталей	8	40	360	1-5	5
Сборочный цех основной сборки	9	50	520	1-20	20
Сборочный цех дополнительной сборки	10	60	780	1-30	30
Цех сварочного производства	11	Рассматривается отдельно (таблица 2)			

Исходный генплан машиностроительного предприятия (согласно номерам цехов, представленных в таблице 1), показан на рисунке 2.

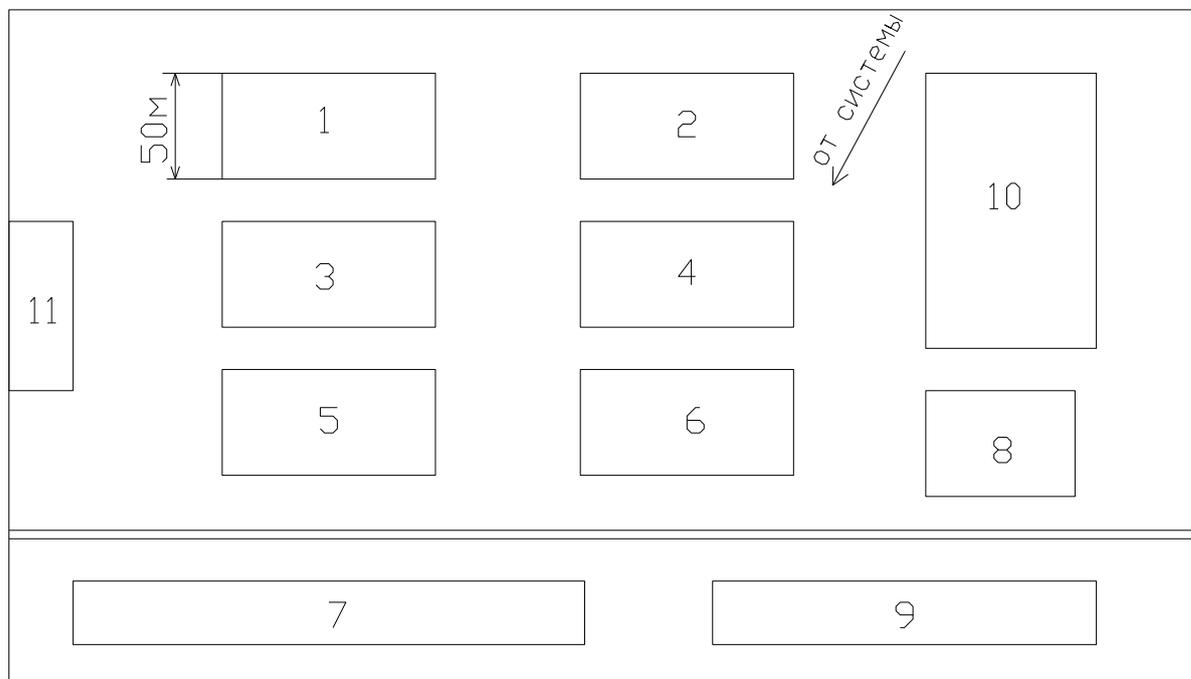


Рисунок 2 – Исходный генплан машиностроительного предприятия

В состав машиностроительного завода входят два приемники напряжением 10 кВ. Это – высоковольтные электродвигатели литейного цеха

черных металлов. Остальные приёмники предприятия работают на напряжении 0,38/0,22 кВ. Данные аспекты необходимо учесть в работе далее.

В работе, согласно заданию, необходимо провести разработку проекта реконструкции системы электроснабжения цеха сварочного производства машиностроительного предприятия.

Поэтому среди всего оборудования также присутствует новое, которое вводится в эксплуатацию в существующей схеме цеха сварочного производства. Для этого в работе необходимо выбрать рациональные решения.

Следовательно, необходимо провести более детальное описание технологий и назначения данного цеха, так как он является основным объектом исследования в работе.

Цех сварочного производства на машиностроительном предприятии выполняет критически важные функции, обеспечивая создание и сборку металлических конструкций и деталей, необходимых для производства машин и оборудования. Этот цех занимается выполнением сварочных работ различной сложности, используя современные технологии и оборудование.

Сварка позволяет создавать соединения металлов с высокой прочностью, что является ключевым для обеспечения долговечности и надежности готовой продукции.

Цех сварочного производства позволяет реализовывать сложные инженерные решения, создавая конструкции различной формы и размера, которые могут быть неосуществимы другими методами обработки.

При этом сварка обеспечивает возможность быстрой адаптации к производству новых изделий благодаря относительной простоте изменения технологического процесса и перенастройки оборудования.

Цех также выполняет работы по ремонту и восстановлению деталей машин и оборудования, продлевая их срок службы и уменьшая затраты на новое производство. В зависимости от задач используются разнообразные

методы сварки, включая дуговую, газовую, точечную, аргодуговую и лазерную сварку.

Таким образом, цех сварочного производства машиностроительного предприятия является неотъемлемой частью производственного процесса, обеспечивая изготовление качественных и надежных изделий, способствующих успеху и конкурентоспособности предприятия на рынке.

Электрические нагрузки цеха сварочного производства машиностроительного предприятия представлены в форме таблице 2.

Таблица 2 – Электрические нагрузки цеха сварочного производства машиностроительного предприятия

Наименование оборудования	Номер по плану	п, шт	Р _н , кВт
Сварочные посты	1	14	20
Устройства дуговой сварки	2	2	15
Устройства полуавтоматической сварки	3	4	10
Устройства аргодуговой сварки	4	5	40
Транспортеры	5	3	30
Кран-балки, ПВ=25%	6	1	10

Исходный план расположения оборудования цеха сварочного производства машиностроительного предприятия (согласно номерам оборудования, представленных в таблице 2), показан на рисунке 3.

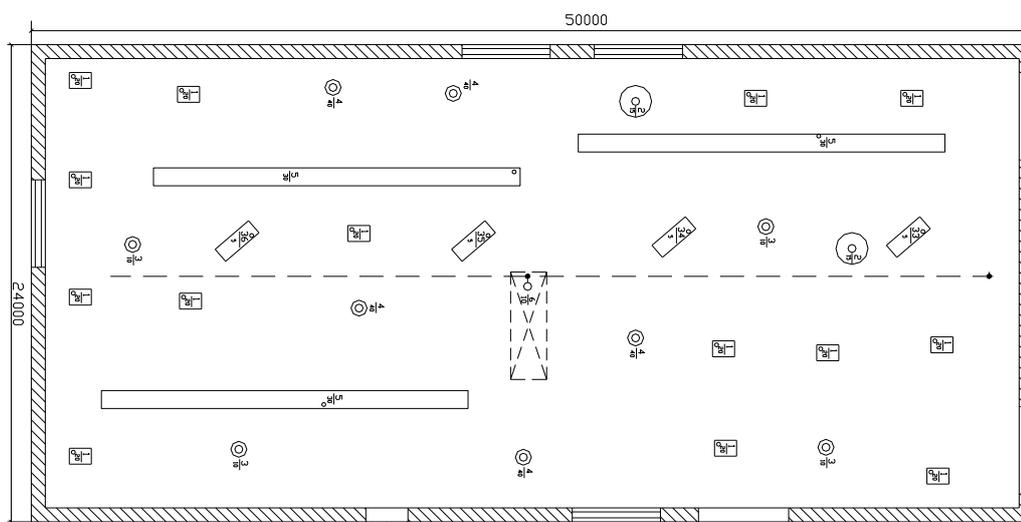


Рисунок 3 – Исходный план расположения оборудования цеха сварочного производства машиностроительного предприятия

Электроприемники в цехе по надежности электроснабжения относятся ко второй категории, рассчитаны на переменный ток напряжением 380 В.

Они устанавливаются стационарно и по площади цеха распределены равномерно.

В цехе имеются электроприемники, работающие в повторно–кратковременном режиме, это – кран-балки.

Окружающая среда в цехе нормальная, температура 25°С.

1.2 Требования к реконструкции систем электроснабжения машиностроительного предприятия

Реконструкция системы электроснабжения машиностроительного предприятия предполагает комплексный подход к внесению качественных изменений в существующую схему, а также модернизации существующей инфраструктуры, направленный на повышение её эффективности, надежности и безопасности [2], [11], [12], [16].

Этот процесс включает в себя не только обновление оборудования, но и пересмотр системы управления, а также адаптацию к современным стандартам и технологическим требованиям. Кроме того, в современном мире важно также учитывать экологические и экономические аспекты.

Перед проведением реконструкции, необходимо провести аудит существующих схемных решений и электротехнического оборудования и заменить устаревшие или изношенные элементы на более современные и эффективные аналоги.

Такой подход позволит сэкономить время и денежные средства ещё на стадии подготовки.

Реконструкция должна включать оптимизацию трасс электропередач, улучшение качества электроэнергии и снижение потерь при её передаче.

Поэтому в первую очередь необходимо рассмотреть и выбрать наиболее рациональные схемные решения, которые обеспечивают данный результат.

В современном мире особенно важным аспектом при проведении реконструкции объектов является внедрение систем автоматизации.

Известно, что автоматизированные системы управления и мониторинга могут значительно повысить эффективность и надежность электроснабжения, а также обеспечить оперативное реагирование на изменения нагрузки и возможные неисправности.

Важным требованием также является оптимизация потребления электроэнергии и внедрение энергосберегающих технологий для снижения операционных затрат.

После реконструкции система электроснабжения должна соответствовать всем современным нормам и стандартам безопасности, минимизируя риски для персонала и производства.

При этом реконструкция должна обеспечивать высокую надежность электроснабжения, исключая возможность длительных отключений и сбоев в работе критически важного оборудования.

В современном мире реконструкция должна учитывать экологические требования, включая снижение воздействия на окружающую среду и использование экологически чистых технологий.

Все мероприятия по реконструкции должны быть экономически обоснованы, с четким расчетом сроков окупаемости инвестиций и потенциальной экономии.

Установлено, что реконструкцию систем электроснабжения промышленных предприятий следует проводить с учётом технологических инноваций и новейших технологий.

Известно, что внедрение инновационных решений и технологий в области электроснабжения может дать дополнительные преимущества, такие как увеличение производственных мощностей и расширение функционала системы управления.

Также при практическом внедрении принятых решений по реконструкции энергетических объектов, результат должен соответствовать

гибкости и адаптивности. Следовательно, такая система должна быть способна адаптироваться к будущим технологическим изменениям и потребностям предприятия.

Таким образом, реконструкция систем электроснабжения машиностроительного предприятия требует комплексного подхода, включающего анализ текущего состояния, планирование на основе современных требований и стандартов, а также применение передовых технологий для достижения целей в области безопасности, надежности, энергоэффективности и экологичности.

Приведённые требования необходимо учесть в работе.

Выводы по разделу.

Проведён анализ исходных технических и технологических данных на выполнение работы.

Рассмотрен состав машиностроительного предприятия. Установлено, что в него входит комплекс, состоящий из одиннадцати цехов и подразделений. Приведено краткое описание функций перечисленных подразделений. Установлено, что каждый из цехов завода выполняет уникальный набор задач, обеспечивая полный цикл производства от литья и обработки до сборки и испытания готовой продукции.

Определено, что в состав машиностроительного завода входят два приемники напряжением 10 кВ. Это – высоковольтные электродвигатели литейного цеха черных металлов. Остальные приёмники предприятия работают на напряжении 0,38/0,22 кВ. Данные аспекты необходимо учесть в работе далее.

Показано, что в работе, согласно заданию, необходимо провести разработку проекта реконструкции системы электроснабжения цеха сварочного производства машиностроительного предприятия.

Поэтому среди всего оборудования также присутствует новое, которое вводится в эксплуатацию в существующей схеме цеха сварочного производства.

Для этого в работе необходимо выбрать рациональные решения.

Проведено детальное описание технологий и назначения данного цеха, так как он является основным объектом исследования в работе.

В результате проведения анализа исходных данных и состояния оборудования цеха сварочного производства, установлено следующее:

- электроприемники в цехе по надежности электроснабжения относятся ко второй категории;
- все потребители цеха рассчитаны на переменный ток напряжением 380/220 В;
- все потребители цеха устанавливаются стационарно и по площади цеха распределены равномерно;
- в цехе имеются электроприемники, работающие в повторно–кратковременном режиме, это – кран-балки;
- окружающая среда в цехе нормальная, температура 25°С.

На основании исходных данных, далее проводится решение поставленных задач.

2 Расчёт электрических нагрузок и выбор схемы электроснабжения предприятия

2.1 Схемы электроснабжения предприятия и цеха сварочного производства

Проводится проверка выбора схемы электроснабжения предприятия и обоснование реконструкции схемы цеха сварочного производства.

«Установлено, что данное предприятие питается от двухтрансформаторной главной понизительной подстанции (далее – ГПП) 110/10 кВ. На такой заводской ГПП-110/10 кВ установлено два силовых трансформатора марки ТМН-6300/110» [5].

От данных трансформаторов получают питание четыре цеховые ТП-10/0,4 кВ, которые питают одиннадцать производственных цехов. На каждой из цеховых ТП-10/0,4 кВ находятся по два силовых трансформатора.

Таким образом, на питающей ГПП-110/10 кВ машиностроительного предприятия приняты два класса напряжения: 110 кВ (питающее напряжение внешней СЭС объекта) и 10 кВ (распределительное напряжение внешней СЭС объекта).

По причине того, что предприятие «относится ко II категории надёжности, его система электроснабжения должна быть обеспечена двумя независимыми источниками питания, следовательно, на питающей ГПП-110/10 кВ необходимо установить два силовых трансформатора»[12].

В состав внутренней системы электроснабжения предприятия входят следующие элементы:

- четыре цеховые двухтрансформаторные ТП-10/0,4 кВ;
- щитки распределительные (далее – ЩР) – для питания силовой нагрузки;
- щитки осветительные (далее – ЩО) – для питания осветительной нагрузки;

– конечные потребители (оборудование).

Кроме того, в состав системы электроснабжения предприятия входят также высоковольтные электродвигатели литейного цеха чёрных металлов, которые получают питание от РУ-10 кВ ГПП-110/10 кВ.

Все приведённые условия в исходной схеме предприятия выполняются [2], [12].

Следовательно, в реконструкции такая схема внешнего электроснабжения завода не нуждается. Таким образом, в работе необходимо проверить все схемные решения в СЭС машиностроительного предприятия.

Далее необходимо рассмотреть схемные решения в системе внутреннего электроснабжения цеха сварочного производства машиностроительного предприятия. Установлено, что данная реконструкция определена вводом новых потребителей в существующую схему данного цеха.

К ним относятся:

- сварочные посты – «5 единиц мощностью 20 кВт каждый (итого – 100 кВт);
- устройства дуговой сварки – одно устройство мощностью 10 кВт;
- устройства аргодуговой сварки – одно устройство мощностью 40 кВт» [5].

Таким образом, мощность новых потребителей цеха сварочного производства составляет 150 кВт.

В цеху предусмотрены три распределительных щита (далее – РЩ) напряжением 0,38/0,22 кВ, от которых получают питание существующие потребители цеха.

Предлагается новые потребители подключить отдельной питающей кабельной линией 0,38/0,22 кВ к новому РЩ4.

Такая схема удовлетворяет требованиям нормативных документов и реализуется в работе.

2.2 Расчёт электрических нагрузок цеха сварочного производства машиностроительного предприятия

Ранее в работе было установлено, что план реконструкции цеха сварочного производства машиностроительного предприятия включает интеграцию новых потребителей в действующую электросеть цеха.

В число новых потребителей входят следующие производственные единицы: пять «сварочных постов с индивидуальной мощностью 20 кВт, общей суммарной мощностью 100 кВт, одно устройство дуговой сварки мощностью 10 кВт и одно устройство аргодуговой сварки мощностью 40 кВт. Следовательно, суммарная мощность» [5] новых потребителей в составе сварочного цеха достигает 150 кВт. В цехе находятся три распределительных щита с напряжением 0,38/0,22 кВ, которые обеспечивают электроэнергией текущих потребителей. Для подключения новых потребителей предлагается использовать отдельную кабельную линию напряжением 0,38/0,22 кВ, которая будет подключена к вновь установленному распределительному щиту РЩ4.

Определение электрических нагрузок в цехе сварочного производства на машиностроительном заводе осуществляется с помощью метода упорядоченных диаграмм. Данный подход к анализу нагрузок включает в себя оценку пиковой нагрузки цеха на основе статистического изучения активности энергопотребителей за определенный интервал времени. Метод позволяет учесть неодновременность включения различных потребителей и на основе полученных данных спрогнозировать максимальную суммарную нагрузку с достаточной степенью точности.

«Расчетная мощность группы электроприемников определяется по формуле, кВт» [19]:

$$P_p = K_m P_{см} = K_m K_u P_{ном}, \quad (1)$$

где « $P_{см}$ – средняя активная мощность группы электроприемников за наиболее нагруженную смену, кВт;

$P_{ном}$ – суммарная номинальная активная мощность группы электроприемников, кВт;

K_u – групповой коэффициент использования активной мощности» [19].

«Последний определяется так» [19]:

$$k_{II} = \frac{\sum_{i=1}^n K_M \cdot P_H}{\sum_{i=1}^n P_H}, \quad (2)$$

K_M – «групповой коэффициент максимума» [19].

«Коэффициент максимума» [19]:

$$K_M = f(n_э, K_u), \quad (3)$$

где « $n_э$ – эффективное число электроприемников (если $n_э > n$, то следует принять $n_э = n$)» [19].

Отсюда [19]:

$$n_э = \frac{(\sum_{i=1}^n P_H)^2}{\sum_{i=1}^n P_H^2}. \quad (4)$$

«Данная формула используется при $m > 3$; $K_M < 0,2$ » [5].

«Для нахождения группового коэффициента мощности, предлагается воспользоваться формулой» [19]:

$$\cos\varphi = \frac{\sum_{i=1}^n \cos\varphi \cdot P_H}{\sum_{i=1}^n P_H}. \quad (5)$$

«Для электроприемников, работающих в прерывистом режиме, номинальная мощность рассчитывается исходя из величины повторного включения ПВ, кВт» [19]:

$$P_H = P_{\text{пасп}} \cdot \sqrt{\text{ПВ}}. \quad (6)$$

«Номинальная мощность кран-балки с ПВ = 25%»[19]:

$$P_H = 10 \cdot \sqrt{0,25} = 5 \text{ кВт}.$$

«Расчетная реактивная мощность группы электроприемников» [19]:

$$Q_p = K'_m \cdot Q_{cm} = K'_m \cdot P_{cm} \cdot \text{tg}\varphi, \quad (7)$$

где « Q_{cm} – средняя реактивная мощность группы электроприемников за наиболее нагруженную смену, квар;

K'_m – коэффициент максимума реактивной нагрузки, равный $K'_m = 1,1$ при $nэ \leq 10$, $K'_m = 1$ при $nэ > 10$;

$\text{tg}\varphi$ – коэффициент реактивной мощности, соответствующий средневзвешенному $\cos\varphi$ » [19].

«Токовые нагрузки для потребителей рассчитываются по известным формулам.

Для группового электроприемника ток будет рассчитываться, А» [19]:

$$I_P = \frac{S_P}{\sqrt{3} \cdot U_{Л}}. \quad (8)$$

«Для отдельного трёхфазного электроприемника ток будет, А» [19]:

$$I_P = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot \cos \varphi}. \quad (9)$$

«Для отдельного однофазного электроприемника ток будет, А» [19]:

$$I_P = \frac{P_H}{U_{\text{Фазн}} \cdot \cos \varphi}. \quad (10)$$

Для ЩР-1:

$$k_{II} = \frac{4 \cdot 20 \cdot 0,2 + 10 \cdot 0,8 + 2 \cdot 40 \cdot 0,6 + 30 \cdot 0,5}{4 \cdot 20 + 10 + 2 \cdot 40 + 30} = 0,33,$$

$$n_9 = \frac{200^2}{4 \cdot 20^2 + 10^2 + 4 \cdot 40^2 + 30^2} = 7,$$

$$m = \frac{40}{10} = 4.$$

Методом интерполяции определяется $K_m = 1,73$.

$$P_{см} = 0,33 \cdot 200 = 66 \text{ кВт},$$

$$P_p = 1,73 \cdot 0,33 \cdot 200 = 114,2,$$

$$\cos \varphi = \frac{4 \cdot 20 \cdot 0,65 + 10 \cdot 0,8 + 2 \cdot 40 \cdot 0,7 + 30 \cdot 0,7}{4 \cdot 20 + 10 + 40 + 30} = 0,65,$$

$$\operatorname{tg} \varphi = 1,17,$$

$$Q_{см} = 1,17 \cdot 66 = 77,2 \text{ квар},$$

$$Q_p = 1,1 \cdot 77,2 = 84,9 \text{ квар},$$

$$S_p = \sqrt{114,2^2 + 84,9^2} = 142,3 \text{ квар},$$

$$I_p = \frac{142,3}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 216,2 \text{ кВА}.$$

Аналогично определены остальные расчётные нагрузки отдельных потребителей, распределительных шкафов, а также всей системы внутреннего электроснабжения цеха «сварочного производства машиностроительного предприятия» [19].

Результаты представлены в работе в форме таблицы 3.

Таблица 3 – «Результаты расчёта нагрузки цеха сварочного производства машиностроительного завода»[19]

Наименование РУ и оборудования	$P_{ном}$, кВт	n	$P_{ном\Sigma}$, кВт	K_u	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	Расчетные нагрузки			
							P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , А
ЩР-1	-	8	200	0,33	0,65	1,17	114,2	84,9	142,3	216,2
Сварочные посты	20	4	80	0,2	0,65	1,17	-	-	-	46,7
Устройства дуговой сварки	10	1	10	0,8	0,8	0,75	-	-	-	19,0
Устройства аргодуговой сварки	40	2	80	0,6	0,7	1,02	-	-	-	86,8
Транспортеры	30	1	30	0,5	0,7	1,02	-	-	-	65,1
ЩР-2	-	7	115	0,42	0,69	1,05	78,7	55,8	96,5	212,5
Сварочные посты	20	2	40	0,2	0,65	1,17	-	-	-	46,7
Устройства дуговой сварки	15	2	30	0,8	0,8	0,75	-	-	-	28,5
Устройства дуговой сварки	10	1	10	0,8	0,8	0,75	-	-	-	19,0
Транспортеры	30	1	30	0,5	0,7	1,02	-	-	-	65,1
Кран-балка (ПВ=25 %)	5	1	5	0,1	0,5	1,73	-	-	-	15,2
ЩР-3	-	7	180	0,46	0,7	1,02	136,3	92,7	164,8	362,9
Сварочные посты	20	3	60	0,2	0,65	1,17	-	-	-	46,7
Устройства дуговой сварки	10	1	10	0,8	0,8	0,75	-	-	-	19,0
Устройства аргодуговой сварки	40	2	80	0,6	0,7	1,02	-	-	-	86,8
Транспортеры	30	1	30	0,5	0,7	1,02	-	-	-	65,1

Продолжение таблицы 3

Наименование РУ и оборудования	$P_{ном}$, кВт	n	$P_{ном\Sigma}$, кВт	K_u	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	Расчетные нагрузки			
							P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , А
Новая нагрузка										
ЩР-4	-	7	150	0,44	0,67	1,11	110,9	80,6	137,1	301,9
Сварочные посты	20	5	100	0,2	0,65	1,17	-	-	-	46,7
Устройства дуговой сварки	10	1	10	0,8	0,8	0,75	-	-	-	19,0
Устройства аргодуговой сварки	40	1	40	0,6	0,7	1,02	-	-	-	86,8
ЩО (раб.)	-	-	-	-	-	-	17,9	7,7	19,5	29,6
ЩО (авар.)	-	-	-	-	-	-	1,8	0,8	2,0	3,0
1СШ: (ЩР-1; ЩР-2; ЩО (авар))	-	-	-	-	-	-	194,7	141,5	240,7	365,8
2СШ: (ЩР-3; ЩР-4; ЩО (раб))	-	-	-	-	-	-	265,1	156,2	307,7	467,6
Всего по цеху	-	-	645	-	-	-	459,8	297,7	547,8	832,5

Полученные результаты расчёта электрических нагрузок цеха сварочного производства с учётом ввода новой нагрузки ЩР-4, используются в работе далее.

2.3 Расчёт электрических нагрузок освещения предприятия

«В работе расчетная активная мощность приемников освещения предприятия определяется по методу коэффициента спроса.

Применение метода коэффициента спроса»[16] при проектировании систем освещения обусловлено необходимостью адекватной оценки интенсивности искусственного освещения, требуемой для выполнения заданных функциональных и эстетических требований в различных условиях эксплуатации.

Данный метод представляет собой аналитический инструмент, позволяющий учитывать изменчивость потребления световой энергии за счет корректировки исходных параметров освещенности на основе фактического уровня использования помещений. Основная задача метода заключается в

определении оптимального количества и мощности светильников, необходимых для достижения нормативных показателей освещенности при одновременном сокращении излишнего энергопотребления.

Метод коэффициента спроса включает в себя вычисление коэффициента, отражающего отношение максимальной фактической нагрузки к потенциально возможной, что позволяет произвести корректировку проектных мощностей осветительных приборов с учетом реальных условий их эксплуатации. Данный аспект способствует повышению эффективности системы освещения за счет более точного подбора оборудования, исключая ненужные издержки на приобретение и использование светотехнических устройств с избыточными характеристиками. Таким образом, метод коэффициента спроса является эффективным средством для оптимизации проектных решений в области искусственного освещения, обеспечивая высокое качество светового комфорта при минимальных энергозатратах. Это обеспечивает значительное снижение эксплуатационных расходов и способствует созданию экологически устойчивой и энергоэффективной среды в жилых, общественных и производственных помещениях.

«Расчётная мощность освещения объекта (цеха, участка), кВт» [16]:

$$P_{p.o} = K_{c.o} P_{ном.o} K_{пра}, \quad (11)$$

где « $K_{c.o}$ – коэффициент спроса приемников освещения;

$P_{ном.o}$ – суммарная номинальная мощность освещения, кВт;

$K_{пра}$ – коэффициент, учитывающий потери мощности в пускорегулирующей аппаратуре для светодиодных ламп» [8].

$$P_{ном.o} = P_{уд.o} F_{ц}, \quad (12)$$

где « $P_{уд.o}$ – удельная установленная мощность осветительных приемников на 1 м^2 освещаемой площади цеха, кВт/ м^2 ;

$F_{ц}$ – площадь пола цеха по генплану, м^2 » [8].

«Реактивная мощность светодиодных ламп» [16]:

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

где $\operatorname{tg}\phi_o$ – «коэффициент реактивной мощности освещения» [8].

«Расчет освещения для литейного цеха чёрных металлов» [16]:

$$P_{уд.o} = 15 \text{ Вт} / \text{м}^2,$$

$$F = 50 \cdot 100 = 5000 \text{ м}^2,$$

$$P_{ном.o} = 5000 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 75 \text{ кВт},$$

$$P_{p.o} = 75 \cdot 1,05 \cdot 0,95 = 74,8 \text{ кВт},$$

$$Q_{p.o} = 75 \cdot 0,43 = 32,3 \text{ квар}.$$

Расчет освещения для остальных цехов предприятия сведён в таблицу 4.

Таблица 4 – Расчет освещения для цехов предприятия

Наименование цеха	$F_u, \text{ м}^2$	$P_{уд.o}, \text{ Вт/м}^2$	$P_{ном.o}, \text{ кВт}$	$P_{p.o}, \text{ кВт}$	$Q_{p.o}, \text{ квар}$
Литейный цех черных металлов	5000	15	75,0	74,8	32,3
Литейный цех цветных металлов	5000	15	75,0	74,8	32,3
Цех обработки двигателей	5000	17	85,0	84,8	36,5
Цех обработки трансмиссии	5000	17	85,0	84,8	36,5
Цех сборки и испытания двигателей	5000	17	85,0	84,8	36,5
Штамповочный цех деталей корпуса техники	5000	15	75,0	74,8	32,3
Штамповочный цех деталей техники	6000	17	102,0	101,7	43,8
Цех производства мелких деталей	4000	18	72,0	71,8	30,9
Сборочный цех основной сборки	4500	15	67,5	67,3	28,9
Сборочный цех дополнительной сборки	11250	15	168,8	168,4	72,4
Цех сварочного производства	1200	15	18,0	17,9	7,7
Освещение территории предприятия	122250	4	48,9	48,8	21,0
Всего	179200	-	-	1033	466

Полученные результаты учитываются при расчёте суммарной нагрузки машиностроительного завода.

2.4 Расчёт электрических нагрузок предприятия

Проводится расчёт силовой и суммарной электрических нагрузок предприятия.

Расчёт первого проводится с помощью метода коэффициента спроса [18]. При проведении второго учитывается силовая и осветительная нагрузки и используется метод их суммирования.

«Активная нагрузка объектов, кВт» [18]:

$$P_p = P_n \cdot K_c, \quad (14)$$

где « P_n – номинальная (паспортная) активная нагрузка, кВт;

K_c – значение коэффициента спроса» [18].

«Реактивная нагрузка, квар» [18]:

$$Q_p = P_n \cdot \operatorname{tg}\varphi, \text{ квар}. \quad (15)$$

«Полная нагрузка, кВА» [18]:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}. \quad (16)$$

На примере литейного цеха чёрных металлов:

$$P_p = 0,5 \cdot 2500 = 1250 \text{ кВт}.$$

$$Q_p = 0,75 \cdot 1250 = 937,5 \text{ квар}.$$

$$S_p = \sqrt{1250^2 + 937,5^2} = 1562,5 \text{ кВА}.$$

$$I_p = \frac{1562,5}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 85,9 \text{ кВА}.$$

Аналогичные расчёты проведены для остальных подразделений системы электроснабжения машиностроительного предприятия и всей питающей ГПП-110/10 кВ. Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты расчёта силовых электрических нагрузок предприятия

Наименование цеха	$P_{ном},$ кВт	K_c	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	$P_p,$ кВт	$Q_p,$ квар	$S_p,$ кВА	$I_p,$ А
Литейный цех черных металлов	2500	0,5	0,8	0,75	1250	937,5	1562,5	85,9
Литейный цех цветных металлов	1550	0,5	0,8	0,75	775	581,3	968,8	53,2
Цех обработки двигателей	520	0,35	0,7	1,02	182	185,6	259,9	14,3
Цех обработки трансмиссии	480	0,35	0,7	1,02	168	171,4	240,0	13,2
Цех сборки и испытания двигателей	2270	0,4	0,8	0,75	908	681	1135,0	62,4
Штамповочный цех деталей корпуса техники	850	0,4	0,6	1,33	340	452,2	565,8	31,1
Штамповочный цех деталей техники	460	0,3	0,8	0,75	138	103,5	172,5	9,5
Цех производства мелких деталей	360	0,3	0,7	1,02	108	110,2	154,3	8,5
Сборочный цех основной сборки	520	0,4	0,6	1,33	208	276,6	346,1	19,0
Сборочный цех дополнительной сборки	780	0,4	0,7	1,02	321	327,4	458,5	25,2
Цех сварочного производства	-	-	-	-	459,8	297,7	547,8	832,5
Всего по заводу	-	-	-	-	4865	2290	-	-

Полная расчетная нагрузка цехов и предприятия определяется суммой осветительной и силовой нагрузки, рассчитанной в работе ранее, кВА [19]:

$$S_{p.n} = \sqrt{(P_{p.n} + P_{p.o})^2 + (Q_{p.n} + Q_{p.o})^2}. \quad (17)$$

Расчётная суммарная активная и реактивная нагрузка питающей ГПП-110/10 кВ [19]:

$$P_{p.ГПП} = \left(\sum P_{p.n} + \sum P_{p.в} \right) K_{pm} + \sum P_{p.o} + \sum \Delta P_{mц}, \text{кВт}, \quad (18)$$

$$Q_{p.ГПП} = \left(\sum Q_{p.n} + \sum Q_{p.в} \right) K_{pm} + \sum Q_{p.o} + \sum \Delta Q_{mц}, \text{квар}, \quad (19)$$

где $K_{pm} = 0,95$ – «коэффициент разновременности максимумов нагрузки отдельных групп приемников» [13].

Полная суммарная нагрузка «питающей ГПП-110/10 кВ предприятия» [19]:

$$S_{p.ГПП} = \sqrt{P_{p.ГПП}^2 + Q_{p.ГПП}^2}, \text{кВА}. \quad (20)$$

Входная реактивная мощность, которая отводится предприятию [11]:

$$Q_{\phi 1} = \operatorname{tg} \phi_{\phi 1} P_{p.ГПП}, \text{квар}, \quad (21)$$

где $\operatorname{tg} \phi_{\phi 1} = 0,328$ – «экономически целесообразный коэффициент реактивной мощности на шинах 10 кВ ГПП-110/10 кВ» [11].

«На данном этапе трансформаторы ГПП еще не выбраны, поэтому потери мощности в них приближенно определяются по формулам» [13]:

$$\Delta P_{m.ГПП} = 0,02 S_{p1,ГПП}, \text{кВт}, \quad (22)$$

$$\Delta Q_{m.ГПП} = 0,1 S_{p1,ГПП}, \text{квар}. \quad (23)$$

«Тогда полная расчетная мощность на шинах высшего напряжения 110 кВ ГПП-110/10 кВ» [13]:

$$S_{p.n} = \sqrt{P_{p.n}^2 + Q_{p.n}^2} = \sqrt{\left(P_{p.ГПП} + \Delta P_{m.ГПП} \right)^2 + \left(Q_{p.ГПП} + \Delta Q_{m.ГПП} \right)^2}, \text{кВА}. \quad (24)$$

«Производится расчет для литейного цеха цветных металлов.

Полная суммарная расчетная нагрузка» [13]:

$$S_{p.n} = \sqrt{(775 + 74,8)^2 + (581,3 + 32,3)^2} = 1048,2 \text{ кВА.}$$

«Предварительные потери в цеховых трансформаторах, питающих объект» [13]:

$$\Delta P_m = 0,02 \cdot 1048 = 21 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_m = 0,1 \cdot 1048,2 = 104,8 \text{ квар.}$$

«Суммарные расчётные нагрузки ГПП-110/10 кВ без учета компенсации реактивной мощности (PM)» [13]:

$$P_{p.ГПП} = 4398 \cdot 0,95 + 951 + 256 = 5385,1 \text{ кВт.}$$

$$Q_{p.ГПП} = 1986 \cdot 0,95 + 431 + 627 = 2944,7 \text{ квар.}$$

$$S_{p.ГПП} = \sqrt{(5385,1)^2 + (2944,7)^2} = 6137,6 \text{ кВА.}$$

«Суммарные расчётные нагрузки ГПП-110/10 кВ с учетом компенсации PM» [13]:

$$Q_{\text{с1}} = 0,328 \cdot 5385,1 = 1766,3 \text{ квар,}$$

$$S_{p.ГПП} = \sqrt{(5385,1)^2 + (1766,3)^2} = 5667,4 \text{ кВА,}$$

$$\Delta P_m = 0,02 \cdot 5667,4 = 113,3 \text{ кВт,}$$

$$\Delta Q_m = 0,1 \cdot 5667,4 = 566,7 \text{ квар.}$$

«Тогда полная суммарная расчетная нагрузка на шинах высшего напряжения 110 кВ ГПП-110/10 кВ предприятия» [13]:

$$S_{p.n} = \sqrt{(5385,1 + 113,3)^2 + (1766,3 + 566,7)^2} = 5972,9 \text{ кВА.}$$

Результаты расчётов силовых и суммарных нагрузок предприятия приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты расчётов силовых и суммарных нагрузок предприятия

Наименование цеха	Р _{рн} , кВт	Р _{р.о} , кВт	Q _{рн} , квар	Q _{р.о} , квар	Р _р , кВт	Q _р , квар	Sp, кВА	ΔP _т , кВт	ΔQ _т , квар
Главный корпус	1350	74,8	1377	32,3	1424,8	1409,3	2004,0	40,1	200,4
Блок вспомогательных цехов	900	112,2	918	48,2	1012,2	966,2	1399,3	28,0	139,9
Цех первичной переработки	420	179,6	369,6	77,2	599,6	446,8	747,8	15,0	74,8
Цех глубокой переработки	1200	74,8	1056	32,3	1274,8	1088,3	1676,2	33,5	167,6
(в т.ч. СД 10 кВ)	2000	-	1760	-	2000	1760	2664,1	53,3	266,4
Цех утилизации отходов	280	112,2	210	48,2	392,2	258,2	469,6	9,4	47,0
(в т.ч. ЭП 10 кВ)	880	-	660	-	880	660	1100,0	22,0	110,0
Экспериментальный цех	750	179,6	765	77,2	929,6	842,2	1254,4	25,1	125,4
Цех контроля и упаковки готовой продукции	60,0	39,9	61,2	17,2	99,9	78,4	127,0	2,5	12,7
Компрессорная станция (СД 10 кВ)	1152,0	143,6	1013,8	61,7	1295,6	952,1	1607,8	32,2	160,8
Складской комплекс	60,0	69,8	61,2	30,0	129,8	91,2	158,6	3,1	15,9
Ремонтный цех	392,1	27,9	-	20,6	296,5	214,5	366,0	7,3	36,6
Освещение территории	-	63,3	-	27,2	63,3	27,2	68,9	1,4	6,9
Итого на стороне 10 кВ, без учета КРМ	9444,1	1077,7	8251,8	472,2	10322,5	9675,8	14148,3	272,9	1364,4
Потери в трансформаторах ГПП с учетом КРМ	-	-	-	-	10322,5	4640,7	11317,7	226,4	1131,8
Итого на стороне ВН	-	-	-	-	10548,9	10807,6	15102,4	-	-

«В работе получены результаты расчёта осветительных, силовых и суммарных нагрузок цехов и всего предприятия» [13].

Выводы по разделу.

В работе приняты соответствующие схемные решения.

Проведена проверка схемы электроснабжения предприятия и обоснование реконструкции схемы цеха сварочного производства.

Установлено, что схема электроснабжения машиностроительного предприятия соответствует требованиям нормативных документов и в реконструкции не нуждается. Таким образом, в работе необходимо проверить выбранные решения в схеме ЭС завода в связи с введением в эксплуатацию дополнительной нагрузки цеха сварочного производства предприятия.

Рассмотрены схемные решения в системе внутреннего электроснабжения цеха сварочного производства машиностроительного предприятия. Установлено, что данная реконструкция определена вводом новых потребителей в существующую схему данного цеха.

К ним относятся:

- сварочные посты – 5 единиц «мощностью 20 кВт каждый (итого – 100 кВт);
- устройства дуговой сварки – одно устройство мощностью 10 кВт;
- устройства аргодуговой сварки – одно устройство мощностью 40 кВт» [5].

Мощность новых потребителей цеха сварочного производства составляет 150 кВт. В цеху предусмотрены три распределительных щита (далее – РЩ) напряжением 0,38/0,22 кВ, от которых получают питание существующие потребители цеха. Предлагается новые потребители подключить отдельной питающей кабельной линией 0,38/0,22 кВ к новому РЩ4. Такая схема удовлетворяет требованиям нормативных документов и реализуется в работе.

Рассчитаны электрические нагрузки детально рассматриваемого цеха сварочного производства машиностроительного предприятия, а также освещения, силовой и суммарной нагрузки системы электроснабжения машиностроительного предприятия.

3 Расчёт и выбор силовых трансформаторов

3.1 Проверка трансформаторов главной понизительной подстанции

Проводится проверка силовых трансформаторов питающей ГПП-110/10 кВ машиностроительного предприятия. До реконструкции на ГПП были установлены два силовые трансформаторы марки ТМН-4000/110.

Однако, в связи с вводом в эксплуатацию новой нагрузки цеха сварочного производства, их необходимо проверить на соответствие расчётным параметрам установки.

На подстанциях нагрузка в разные часы различна. Если трансформатор в нормальном режиме загружен не более чем на 80%, то в аварийной режиме его можно перегрузить на 40% в течении 6 часов 5 суток подряд.

Поэтому выбор и проверку номинальной мощности трансформатора ГПП-110/10 кВ машиностроительного предприятия производят с учетом его нагрузочной способности [1]. В общем случае условие выбора мощности трансформатора для установки на ГПП-110/10 кВ машиностроительного предприятия имеет вид [9]:

$$S_{ном.т} \geq \frac{S_{м.знп}}{N \cdot K_3}, \quad (25)$$

где « $S_{м.знп}$ – полная расчетная нагрузка, кВА;

N – число трансформаторов на подстанции, шт.

K_3 – коэффициент загрузки, о.е.» [9].

«Значит» [9]:

$$S_{ном.т} \geq \frac{5972,9}{2 \cdot 0,8} = 3733,1 \text{ кВА.}$$

Исходя из полученных данных, для установки на питающей ГПП-110/10 кВ выбираются два силовых трансформатора типа ТМН-4000/110, которые удовлетворяют условиям выбора и полностью совпадают с трансформаторами, установленными на главной понизительной подстанции машиностроительного предприятия ранее [9].

«Проверка на соответствие номинальной мощности выполняется» [9]:

$$S_{ном.т} \geq S_{м.зпп}, МВА. \quad (26)$$

$$S_{ном.т} = 4000 \text{ кВА} \geq S_{ном.т.р} = 3733,1 \text{ кВА}.$$

Для окончательного выбора силового трансформатора данной марки, проводятся расчёты его перегрузочной способности:

$$K_{з.н} = \frac{0,5 \cdot S_{м.зпп}}{S_{ном.т}} \leq 0,8. \quad (27)$$

$$K_{з.н} = \frac{S_{м.зпп}}{S_{ном.т}} \leq 1,6. \quad (28)$$

«Проверки выполняются» [9]:

$$K_{з.н} = \frac{0,5 \cdot 5972,9}{4000} = 0,74 \leq 0,8.$$

$$K_{з.н} = \frac{5972,9}{4000} = 1,48 \leq 1,4.$$

Исходя из полученных данных, для установки на питающей ГПП-110/10 кВ окончательно приняты два силовых трансформатора типа ТМН-4000/110, которые удовлетворяют условиям выбора и полностью совпадают с трансформаторами, установленными на ГПП машиностроительного предприятия ранее.

Технические характеристики трансформатора представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Каталожные данные трансформатора ГПП-110/10 кВ

Тип трансформатора	S _{НОМ} , МВА	U _{ВН} , кВ	U _{НН} , кВ	P _Х , кВт	P _К , кВт	U _К , %	I _Х , %	РПН
ТМН-4000/10	4	115	10,5	14	58	10,5	0,9	± 6 x 1,5%

Оба трансформатора в нормальном режиме включены на существующую нагрузку подстанции. В аварийном режиме один трансформатор сможет обеспечить питание всей нагрузки I и II категории надёжности всего предприятия.

3.2 Выбор места расположения ГПП

После выбора проверки трансформаторов для установки на питающей ГПП-110/10 кВ, проводится выбор и проверка места расположения ГПП.

Определение местоположения главной понизительной подстанции предприятия представляет собой сложный инженерный процесс, который требует комплексного анализа технико-экономических, экологических и эксплуатационных факторов. При этом основное внимание уделяется обеспечению надёжности и эффективности электроснабжения, минимизации потерь электроэнергии в сетях, а также сокращению затрат на строительство и эксплуатацию подстанции и прокладку кабельных линий. Таким образом, выбор места расположения главной понизительной подстанции осуществляется на основе многофакторного анализа с целью оптимизации капитальных и эксплуатационных затрат, повышения надёжности электроснабжения. Наиболее рациональным вариантом является расположение ГПП в центре электрических нагрузок (далее – ЦЭН).

«Координаты ЦЭН, м» [10]:

$$X_0 = \frac{\sum P_{p,i} X_i}{\sum P_{p,i}}, \quad (29)$$

$$Y_0 = \frac{\sum P_{p,i} Y_i}{\sum P_{p,i}}, \quad (30)$$

где « X_i, Y_i – координаты центров нагрузок отдельных цехов, м» [10].

Также для каждого цеха определяется радиус окружностей картограммы электрических нагрузок:

$$R_i = \sqrt{\frac{P_{p,i}}{\pi m}}, \quad (31)$$

«где $P_{p,i}$ – расчетная активная мощность i -го цеха, кВт;

m – масштаб мощности, принимается $m = 1000 \text{ Вт/мм}^2$ » [10].

«Угол заштрихованного сектора» [10]:

$$\varphi = 360 \frac{P_{p,o}}{P_p}. \quad (32)$$

Результаты расчета представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результат расчёта картограммы нагрузок и ЦЭН предприятия

Наименование цеха	P_p , кВт	$X, \text{м}$	$Y, \text{м}$	$P_p \cdot X$, кВт·м	$P_p \cdot Y$, кВт·м	R , мм	$\varphi, ^\circ$
Литейный цех черных металлов	1324,8	150	280	198720	370944	21	20
Литейный цех цветных металлов	849,8	350	280	297430	237944	16	32
Цех обработки двигателей	266,8	150	220	40020	58696	9	114
Цех обработки трансмиссии	252,8	350	220	88480	55616	9	121
Цех сборки и испытания двигателей	992,8	150	160	148920	158848	18	31
Штамповочный цех деталей корпуса техники	414,8	350	160	145180	66368	12	65
Штамповочный цех деталей техники	239,7	200	50	47940	11985	9	153
Цех производства мелких деталей	179,8	450	140	80910	25172	8	144
Сборочный цех основной сборки	275,3	420	50	115626	13765	9	88
Сборочный цех дополнительной сборки	489,4	480	250	234912	122350	12	124
Цех сварочного производства	459,8	10	220	4958	101156	12	14
Итого	5816,0	-	-	1403096	1222844	-	-

Координаты центра нагрузок предприятия:

$$X_0 = \frac{1403096}{5816} = 241 \text{ м},$$

$$Y_0 = \frac{1222844}{5816} = 210 \text{ м}.$$

Питающая ГПП-110/10 кВ машиностроительного предприятия должна находиться как можно ближе к ЦЭН. Данное условие в работе соблюдено.

3.3 Выбор и проверка трансформаторов цеховых трансформаторных подстанций

Известно, что цеховые трансформаторные подстанции (далее – ЦТП) обеспечивают критически важную роль в системе энергоснабжения предприятия, гарантируя стабильное и эффективное электропитание для различных производственных цехов, включая те, которые эксплуатируют оборудование, работающее на низком напряжении.

Правильный выбор и последующая верификация трансформаторов ЦТП являются значимыми этапами, требующими детального рассмотрения и полного соответствия установленным техническим стандартам и критериям безопасности с целью обеспечения надежности и безопасности электроснабжения на производственных площадках.

В работе приняты двухтрансформаторные подстанции в качестве цеховых ТП.

Проводится проверка правильности выбора мощности цеховых ТП на предприятии.

«Удельная плотности нагрузки» [5]:

$$\sigma_{уд} = S_{см} / F_{ц}, \text{кВА} / \text{м}^2, \quad (33)$$

где « $S_{см}$ – полная расчетная нагрузка (среднее значение) цеха, кВА» [5].

Последняя определяется так:

$$S_{cm} = K_{32} S_p, \quad (34)$$

где « F_y – площадь цеха по генплану, m^2 » [5].

Для литейного цеха черных металлов:

$$\sigma_{y\delta} = 1644 / 5000 = 0,33 \text{ кВА} / m^2.$$

«Мощность трансформаторов для установки на ЦТП-10/0,4 кВ» [8]:

$$S_{ном.т} \geq S_{ном.т.р} = \frac{\sum P_p}{N \beta_T}, \quad (35)$$

где « $\sum P_p$ – суммарная активная нагрузка объектов, кВт;

N – количество трансформаторов цеховой ТП, шт.;

β_T – коэффициент активной загрузки трансформаторов» [8].

«На примере новой цеховой ТП-1» [8]:

$$S_{ном.т} \geq S_{ном.т.р} = \frac{1590,8}{2 \cdot 0,7} = 1136,3 \text{ кВА}.$$

«Выбирается два силовых трансформатора ТМ-1600/10» [8].

«Проверки по нагрузочной способности выполняются» [12]:

$$K_{3.н} = \frac{0,5 \cdot 1590,8}{1600} \approx 0,5 \leq 0,7.$$

$$K_{3.п} = \frac{1590,8}{1600} \approx 1,0 \leq 1,4.$$

«Наибольшая РМ, которую целесообразно передать через ТП» [12]:

$$Q_{\max,т} = \sqrt{\left(N_{\text{опт}}\beta_{\text{норм.т}}S_{\text{ном}}\right)^2 - P_{\text{см}}^2}, \text{квар.} \quad (36)$$

Для ТП-1:

$$Q_{\max,т} = \sqrt{\left(2 \cdot 0,7 \cdot 1600\right)^2 - 1127,3^2} = 1935,7 \text{квар.}$$

«Суммарная мощность конденсаторных батарей, квар» [12]:

$$Q_{\text{НБК}} = Q_{\text{см}} - Q_{\max,т}. \quad (37)$$

Для ТП-1:

$$Q_{\text{НБК}} = 1127,3 - 1935,7 = -808,4 \text{квар.}$$

При $Q_{\text{НБК}} < 0$ установка КУ на данной подстанции не требуется. Поэтому на ТП-1 КУ не устанавливаются.

Аналогично проведён выбор силовых трансформаторов ЦТП-10/0,4 кВ с учётом КРМ (таблица 7).

Таблица 7 – Выбор цеховых трансформаторов с учётом КРМ

№ ТП	Наименование цеха	$F_{ц}$, м ²	$P_{\text{см}}$, кВт	$Q_{\text{см}}$, квар	$S_{\text{см}}$, кВ·А	$\sigma_{\text{уд}}$, кВ·А/м ²	$S_{\text{ном.т}}$, кВА	$Q_{\max,т}$, квар	$Q_{\text{НБК}}$, квар
ТП-1	Литейный цех черных металлов	5000	1324	905,2	1644	0,33	1600	1935,7	-808,4
	Цех обработки двигателей	5000	266,8	222,1	347,1	0,07			
ТП-2	Цех сборки и испытания двигателей	5000	992,8	717,5	1224,9	0,25	1600	1214,1	-198,9
	Цех сварочного производства	1200	459,8	297,7	547,8	0,11			

Продолжение таблицы 7

№ ТП	Наименование цеха	$F_{ц}$, м ²	$P_{см}$, кВт	$Q_{см}$, квар	$S_{см}$, кВт·А	$\sigma_{уд}$, кВт·А/м ²	$S_{ном.т}$, кВА	$Q_{max.т}$, квар	$Q_{НБК}$, квар
ТП-3	Сборочный цех дополнительной сборки	11250	489,4	399,8	631,9	0,06	1600	1901,4	-907,7
	Цех производства мелких деталей	4000	179,8	141,1	228,6	0,06			
	Сборочный цех основной сборки	4500	275,3	305,5	411,2	0,09			
	Штамповочный цех деталей техники	6000	239,7	147,3	281,3	0,05			
ТП-4	Литейный цех цветных металлов	5000	849,8	613,6	1048,2	0,21	1600	1647,8	-341,8
	Цех обработки трансмиссии	5000	252,8	207,9	327,3	0,07			
	Штамповочный цех деталей корпуса техники	5000	414,8	484,5	637,8	0,13			

Принятые решения подтверждены расчётами и проверками.

Все полученные результаты выбора силовых трансформаторов с учётом КРМ, показаны в графической части работы.

Выводы по разделу.

Исходя из полученных данных, для установки на питающей ГПП-110/10 кВ окончательно приняты два силовых трансформатора типа ТМН-4000/110, которые удовлетворяют условиям выбора и полностью совпадают с трансформаторами, установленными на главной понизительной подстанции машиностроительного предприятия ранее.

Оба трансформатора в нормальном режиме включены на существующую нагрузку подстанции. В аварийном режиме один трансформатор сможет обеспечить питание всей нагрузки I и II категории надёжности всего предприятия.

Расчитан центр электрических нагрузок предприятия. Определено, что питающая ГПП-110/10 кВ машиностроительного предприятия находится в непосредственной близости к ЦЭН. Предложено все цеховые ТП-10/0,4 кВ выполнить в виде комплектных подстанций с трансформаторами марки ТМ-1600/10, которые удобнее, компактнее и надёжнее закрытых и открытых типов подстанций.

4 Расчёт и выбор электрооборудования

4.1 Выбор кабельных линий цеха сварочного производства

Проводится выбор новых кабельных линий напряжением 0,38/0,22 кВ для питания новых электроприёмников (распределительная сеть) и новой ЩР-4 (питающая сеть). Кроме того, необходимо проверить в работе все существующие кабельные линии цеха сварочного производства, питающие распределительную сеть и питающую сети напряжением до 1 кВ.

Для питания новых потребителей принимается радиальная схема, отвечающая категории надёжности данных потребителей. С целью экономии ресурсов, предлагается для новых потребителей цеха использовать четырёхжильные кабели марки АВВГ, прокладка – открыто, в лотке. Таким же способом выполнена и существующая сеть цеха. Выбор кабельных линий цеха сварочного производства машиностроительного предприятия осуществляется по допустимому нагреву [15]:

$$I_{\text{доп}} \geq I_p, \quad (38)$$

где « I_p – расчетный ток линии, А» [15].

Допустимый ток [15]:

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{доп.каб.}} \cdot n \cdot K_n, \quad (39)$$

где K_n – коэффициент прокладки кабелей (если условия отличаются от стандартных).

Выбранный кабель необходимо проверить на допустимую потерю напряжения по условию [12]:

$$\Delta U = \frac{L(P_p \cdot r_0 - Q_p \cdot x_0)}{U^2} \cdot 100, \% \quad (40)$$

Для питания ЩР-1 предварительно выбираются два кабеля марки АВВГ 3×70+1×35, проложенных открыто, в лотке. Допустимый длительный ток кабелей выбирается из [12].

Активное и реактивное сопротивление кабеля: $r = 0,474$ Ом/км, $x = 0,15$ Ом/км [12].

Длительный допустимый ток для данного кабеля:

$$I_{\text{доп}} = 140 \cdot 2 \cdot 0,92 = 257,6 \text{ А.}$$

Условие проверки кабеля по нагреву длительным допустимым током выполняется:

$$257,6 \text{ А} > 216,2 \text{ А.}$$

Определяются потери напряжения в предварительно выбранном кабеле:

$$\Delta U = \frac{65 \cdot (114,2 \cdot 0,549 + 84,9 \cdot 0,065)}{0,4^2} \cdot 100 = 2,8\%.$$

$$2,8\% \leq 5 \%$$

Условие выполняется.

Для ЩР-1 окончательно выбирается питающая кабельная линия, в которой находятся два кабеля марки АВВГ 3×70+1×35, проложенных открыто, в лотке.

Результаты выбора остальных кабелей цеха сварочного производства машиностроительного предприятия представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты выбора кабелей цеха сварочного производства машиностроительного предприятия

Участок	I _p , А	I _{доп} , А	F, мм ²	L, м	K _з , м	Марка кабел	Сечение кабеля	ΔU, %
ЩР-1	216,2	257,6	63,6	65	0,84	АВВГ	2 шт. 3×70+1×35	2,8
ЩР1-ЭП №1	46,7	69,0	27,4	8	0,71	АВВГ	3×25+1×16	0,1
ЩР1-ЭП №2	46,7	69,0	27,4	12	0,71	АВВГ	3×25+1×16	0,2
ЩР1-ЭП №3	46,7	69,0	27,4	16	0,71	АВВГ	3×25+1×16	0,2
ЩР1-ЭП №4	46,7	69,0	27,4	14	0,71	АВВГ	3×25+1×16	0,3
ЩР1-ЭП №5	19,0	41,4	11,2	15	0,52	АВВГ	3×10+1×6	0,4
ЩР1-ЭП №6	86,8	101,2	51,1	16	0,86	АВВГ	3×50+1×25	0,3
ЩР1-ЭП №7	86,8	101,2	51,1	12	0,86	АВВГ	3×50+1×25	0,3
ЩР1-ЭП №8	65,1	87,4	38,3	22	0,75	АВВГ	3×35+1×16	0,4
ЩР-2	212,5	216,2	124,7	50	0,98	АВВГ	3×150+1×70	2,6
ЩР2-ЭП №9	46,7	69,0	27,4	8	0,71	АВВГ	3×25+1×16	0,1
ЩР2-ЭП №10	46,7	69,0	27,4	12	0,71	АВВГ	3×25+1×16	0,2
ЩР2-ЭП №11	28,5	41,4	11,2	15	0,69	АВВГ	3×10+1×6	0,4
ЩР2-ЭП №12	28,5	41,4	11,2	15	0,69	АВВГ	3×10+1×6	0,4
ЩР2-ЭП №13	19,0	41,4	11,2	15	0,52	АВВГ	3×10+1×6	0,4
ЩР2-ЭП №14	65,1	87,4	38,3	22	0,75	АВВГ	3×35+1×16	0,4
ЩР2-ЭП №15	15,2	41,4	8,9	50	0,37	ШТА-75	ШТА-75	2,6
ЩР-3	362,9	368,0	325,8	75	0,98	АВВГ	2 шт. 3×120+1×70	1,7
ЩР3-ЭП №16	46,7	69,0	27,4	8	0,71	АВВГ	3×25+1×16	0,1
ЩР3-ЭП №17	46,7	69,0	27,4	12	0,71	АВВГ	3×25+1×16	0,2
ЩР3-ЭП №18	46,7	69,0	27,4	16	0,71	АВВГ	3×25+1×16	0,2
ЩР3-ЭП №19	19,0	41,4	11,2	15	0,52	АВВГ	3×10+1×6	0,4
ЩР3-ЭП №20	86,8	101,2	51,1	16	0,86	АВВГ	3×50+1×25	0,3
ЩР3-ЭП №21	86,8	101,2	51,1	12	0,86	АВВГ	3×50+1×25	0,3
ЩР3-ЭП №22	65,1	87,4	38,3	22	0,75	АВВГ	3×35+1×16	0,4
ЩР-4	301,9	303,6	247,8	90	0,98	АВВГ	2 шт. 3×95+1×50	2,9
ЩР4-ЭП №23	46,7	69,0	27,4	8	0,71	АВВГ	3×25+1×16	0,1
ЩР4-ЭП №24	46,7	69,0	27,4	12	0,71	АВВГ	3×25+1×16	0,2
ЩР4-ЭП №25	46,7	69,0	27,4	16	0,71	АВВГ	3×25+1×16	0,2
ЩР4-ЭП №26	46,7	69,0	27,4	10	0,71	АВВГ	3×25+1×16	0,1
ЩР4-ЭП №24	46,7	69,0	27,4	16	0,71	АВВГ	3×25+1×16	0,2
ЩР4-ЭП №28	19,0	41,4	11,2	15	0,52	АВВГ	3×10+1×6	0,4
ЩР4-ЭП №29	86,8	101,2	51,1	12	0,86	АВВГ	3×50+1×25	0,3
ЩО (раб)	29,6	41,4	15,6	10	0,9	АВВГ	3×10+1×6	0,7
ЩО (авар).	3,0	24,8	0,8	11	0,05	АВВГ	3×4+1×2,5	0,07

Таким образом, проведён выбор новых кабельных линий напряжением 0,38/0,22 кВ для питания новых электроприёмников (распределительная сеть) и новой ЩР-4 (питающая сеть).

Кроме того, проверены все существующие кабельные линии цеха сварочного производства, питающие распределительную сеть и питающую сети напряжением до 1 кВ. Все кабели питающей и распределительной сети цеха принимаются к установке.

4.2 Выбор и проверка проводников питающей сети предприятия

Далее в работе необходимо выбрать и проверить проводники вводных линий питающей сети предприятия напряжением 10 кВ и 0,4 кВ.

Отходящие линии питающей сети предприятия напряжением 10 кВ и 0,4 кВ выполнены в виде кабельных линий. Для питающей сети 10 кВ принимаются классические кабели марки АСБ-10 (трёхжильные). Для питающей сети 0,4 кВ принимаются классические кабели марки АВВГ (четырёхжильные).

Выбор кабелей питающей сети 10 кВ предприятия проводится «по экономической плотности тока» [12]:

$$F_3 = \frac{I_{p.}}{j_3}, \quad (41)$$

где « j_3 – экономическая плотность тока, А/мм²» [12].

«Проверка выбранного сечения провода в нормальном режиме» [14]:

$$I_{дон} \geq I_{p.}, \quad (42)$$

где « $I_{дон}$ – предельно – допустимое значение тока проводника, А» [14].

«Проверка проводника в послеаварийном режиме работы» [14]:

$$I_{дон} \geq I_{p.max}, \quad (43)$$

где « $I_{p.max}$ – максимальный ток, А» [14].

«Минимальное допустимое сечение проводника» [14]:

$$F_{ст} \geq F_{мин}, мм^2. \quad (44)$$

Определяются расчетные токи в нормальном и послеаварийном режимах для кабеля от ГПП до ТП-4, питающей цех сварочного производства:

$$I_{р.норм} = \frac{S_p}{2\sqrt{3}U_{ном}}, \quad (45)$$

$$I_{р.норм} = \frac{1517,4}{2\sqrt{3} \cdot 10,5} = 41,7 А,$$

$$I_{р.ав} = 2I_{р.норм}, \quad (46)$$

$$I_{р.ав} = 2 \cdot 41,7 = 83,4 А.$$

Экономическое сечение жил данного кабеля 10 кВ питающей сети:

$$F_э = \frac{41,7}{1,4} = 29,8 мм^2,$$

Выбирается кабель АСБ–10 (3×35), $I_{дл.доп.} = 115 А$. Прокладка кабеля будет в траншее [3]. Проводятся необходимые проверки выбранного сечения кабельной линии по допустимому нагреву токами нормального и послеаварийного режимов работы, а также по допустимой потере напряжения в конце выбранных линий. Проверка кабеля в нормальном режиме работы:

$$115 А \geq 41,7 А.$$

Условие выполняется.

Проверка кабеля в послеаварийном режиме работы:

$$115 A \geq 83,4 A.$$

Условие выполняется.

Для питающей сети 0,38/0,22 кВ принимаются силовые кабели классического типа марки АВВГ.

Сечение проводников остальных кабельных линий питающей сети 10 кВ и 0,4 кВ машиностроительного предприятия выбраны аналогично и представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Выбор сечений проводников кабельных линий питающей сети 10 кВ и 0,4 кВ машиностроительного предприятия

Линия	n, шт.	S _p , кВА	I _{p.норм} , А	I _{p.ав} , А	Площадь сечения, мм ²			Марка	L, м	R, Ом/ км	X, Ом/ км	ΔU%
					по J _{эк}	по нагреву	принято					
Питающие кабельные линии сети 10 кВ												
ГПП-ТП1	2	1991,1	54,7	109,5	39,1	16	3×16	АСБ	100	0,84	0,095	0,21
ГПП-ТП2	2	1772,7	48,7	97,5	34,8	16	3×16	АСБ	250	0,84	0,095	1,12
ГПП-ТП3	2	1553,0	42,7	85,4	30,5	16	3×16	АСБ	400	0,84	0,095	1,48
ГПП-ТП4	2	2013,3	55,4	110,8	39,6	16	3×16	АСБ	100	0,84	0,095	0,21
ГПП-1 (СД)	2	1250,0	34,4	68,8	24,6	16	3×16	АСБ	100	1,17	0,099	0,35
Питающие кабельные линии сети 0,4 кВ												
ТП1-3	2	266,8	202,7	405,4	144,8	95	3×95+1×50	АВВГ	25	0,59	0,063	0,34
ТП2-11	2	459,8	349,3	698,6	249,5	2×150	2 шт. 3×150+1×70	АВВГ	200	0,20	0,059	2,17
ТП3-8	2	179,8	136,6	273,2	97,6	185	3×185+1×70	АВВГ	180	0,16	0,059	3,47
ТП3-9	2	275,3	209,1	418,2	149,4	2×95	2 шт. 3×95+1×50	АВВГ	350	0,59	0,063	4,37
ТП3-7	2	239,7	182,1	364,2	130,1	2×70	2 шт. 3×70+1×35	АВВГ	400	0,42	0,061	4,18
ТП4-4	2	252,8	192,0	384,0	137,1	2×70	2 шт. 3×70+1×35	АВВГ	25	0,42	0,061	0,24
ТП4-6	2	414,8	315,1	630,2	225,1	2×150	2 шт. 3×150+1×70	АВВГ	120	0,20	0,059	1,22

Выбранные сечение проводников кабельных линий питающей сети 10 кВ и 0,4 кВ машиностроительного предприятия показаны в графической части работы.

4.3 Выбор электрических аппаратов цеха сварочного производства

Проводится выбор электрических аппаратов цеха сварочного производства. Для обеспечения защиты и коммутации данного объекта, выбираются автоматические выключатели.

Автоматические выключатели являются ключевым элементом в системе электроснабжения цеха сварочного производства машиностроительного завода, обеспечивая надежную и безопасную работу оборудования. Они выполняют несколько фундаментальных функций, которые в совокупности гарантируют эффективность и безопасность электрической сети.

Во-первых, автоматические выключатели обеспечивают защиту от коротких замыканий и перегрузок. В условиях сварочного производства, где потребление электроэнергии высоко и изменчиво, риск возникновения этих нежелательных явлений особенно велик. Автоматические выключатели, реагируя на превышение нормальных рабочих параметров тока, мгновенно отключают питание, предотвращая тем самым возможное повреждение оборудования и обеспечивая защиту персонала от электротравм.

Во-вторых, они способствуют повышению надежности электроснабжения. Автоматические выключатели позволяют локализовать проблемы в электросети, минимизируя область отключения только до зоны неполадки. Это значит, что в случае возникновения короткого замыкания или перегрузки в одном участке сети, не происходит полного отключения электроэнергии во всем цехе, что обеспечивает бесперебойность производственных процессов.

Кроме того, автоматические выключатели вносят вклад в улучшение качества электроэнергии. Они помогают предотвратить возникновение пиковых перегрузок и скачков напряжения, которые могут негативно сказаться на работе чувствительного оборудования, используемого в сварочном производстве. Таким образом, автоматические выключатели не

только защищают от возможных аварий, но и способствуют продлению срока службы оборудования за счет обеспечения стабильности электроснабжения.

Также стоит отметить, что автоматические выключатели обладают функцией управления нагрузкой. Они могут использоваться для планового распределения нагрузок в электросети цеха, что позволяет оптимизировать энергопотребление и снизить эксплуатационные расходы.

Таким образом, автоматические выключатели играют важнейшую роль в системе электроснабжения цеха сварочного производства, выполняя задачи по защите, надежности, качеству электроэнергии и управлению нагрузкой. Они обеспечивают эффективную и безопасную работу производственных процессов, способствуя тем самым устойчивому развитию предприятия.

«Расчет и выбор автоматического выключателя приводится для защиты и коммутации ЩР-1.

В качестве пиковой нагрузки от одного асинхронного двигателя принимают его пусковой ток, А» [19]:

$$I_{\text{пик}} = I_{\text{пуск.двmax}} + (\sum I_{\text{р-кн}} \cdot I_{\text{номmax}}) = i_{\text{п}} \cdot I_{\text{ном.дв}} + (\sum I_{\text{р-кн}} \cdot I_{\text{номmax}}), \quad (47)$$

где « $I_{\text{пуск.дв}}$ – пусковой ток двигателя, А, принимается $I_{\text{пуск.дв}} = (3-5) I_{\text{ном.дв}}$;

$I_{\text{ном.дв}}$ – номинальный ток двигателя, А;

$i_{\text{п}}$ – кратность пускового тока двигателя по отношению к номинальному» [19].

Для ЩР-1 цеха сварочного производства машиностроительного предприятия:

$$I_{\text{пик}} = 5 \cdot 32,7 + (105,5 - 0,2 \cdot 32,7) = 262,5 \text{ А.}$$

Для защиты и коммутации ЩР-1 выбирается автоматический выключатель марки «ВА-88-37 с номинальным током 400 А, ток теплового расцепителя – 315 А, ток электромагнитного расцепителя $10 \cdot I_{\text{ср.т}}$ » [1].

«Номинальное напряжение выключателя должно соответствовать номинальному напряжению сети, В» [19]:

$$U_{\text{ном.в}} \geq U_{\text{ном.с}}, \quad (48)$$

где « $U_{\text{ном.в}}$ – номинальное напряжение выключателя, В;

$U_{\text{ном.с}}$ – номинальное напряжение сети, В» [19].

$$400 \text{ В} = 400 \text{ В}.$$

«Номинальный ток выключателя, А» [19]:

$$I_{\text{ном.в}} \geq I_p, \quad (49)$$

где « $I_{\text{ном.в}}$ – номинальный ток выключателя, А;

I_p – расчетный ток ответвления, А» [19].

«Для автомата ЩР-1 цеха сварочного производства машиностроительного предприятия» [19]:

$$400 \text{ А} > 216,2 \text{ А}.$$

«Номинальный ток теплового расцепителя, А» [19]:

$$I_{\text{ср.т}} > (1,2-1,4) \cdot I_p, \quad (50)$$

где « $I_{\text{ср.т}}$ – ток срабатывания теплового расцепителя. А;

I_p – расчетный ток, А» [19].

Для автомата ЩР-1 цеха сварочного производства машиностроительного предприятия:

$$315 \text{ А} > 1,4 \cdot 216,2 = 302,7 \text{ А}.$$

«Ток срабатывания электромагнитного расцепителя, А» [19]:

$$I_{\text{ср.э}} \geq k_{\text{н.о.}} \cdot I_{\text{пик}}, \quad (51)$$

где « $I_{\text{ср.э}}$ – ток срабатывания электромагнитного расцепителя. А;

$k_{\text{н.о.}}$ –коэффициент надежности» [19].

Для автомата ЩР-1:

$$10 \cdot 315 = 3150 \text{ А} \geq 2,1 \cdot 598,1 = 1256 \text{ А.}$$

Условие выполняется.

Результаты выбора автоматов для защиты сети 0,38/0,22 кВ цеха сварочного производства машиностроительного предприятия представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Выбор автоматических выключателей цеха сварочного производства машиностроительного предприятия

Наименование потребителя	I_p , А	$I_{\text{пик}}$, А	$I_{\text{пик}} \cdot K_{\text{н.о.}}$, А	$I_p \cdot 1,4$, А	Тип автомата	$I_{\text{ном.в.}}$, А	$I_{\text{ср.т.}}$, А	$I_{\text{ср.э.}}$, А
Сварочные посты	46,7	233,5	490,4	65,4	ВА-88-32	125	100	1000
Устройства дуговой сварки	19,0	95,0	199,4	26,6	ВА-88-32	125	32	320
Устройства дуговой сварки	28,5	142,5	299,3	39,9	ВА-88-32	125	32	320
Устройства аргодуговой сварки	86,8	434,0	911,4	121,5	ВА-88-32	125	100	1000
Транспортеры	65,1	325,5	683,6	91,1	ВА-88-32	125	100	1000
Кран-балка (ПВ = 25 %)	15,2	76,0	159,6	21,3	ВА-88-32	125	16	160
ЩР-1	216,2	598,1	1256,0	302,7	ВА-88-37	400	315	-
ЩР-2	212,5	633,1	1329,5	297,5	ВА-88-37	400	315	-
ЩР-3	362,9	834,7	1752,9	508,1	ВА-57-39	630	630	-
ЩР-4	301,9	706,4	1483,4	422,7	ВА-57-39	630	500	-
ЩО (раб)	29,6	29,6	29,6	29,6	ВА-88-32	125	32	-
ЩО (авар)	3,0	3,0	3,0	3,0	ВА 47-29	63	6,3	-

Все автоматы цеха сварочного производства машиностроительного предприятия выбраны верно. Они представлены на электрических схемах данного цеха в графической части работы (до и после реконструкции).

4.4 Выбор электрических аппаратов питающей сети предприятия

Далее в работе проводится выбор электрических аппаратов питающей сети машиностроительного предприятия.

Решение поставленной задачи выполняется в два этапа:

- первый этап предусматривает выбор типов ячеек распределительного устройства;
- на втором этапе выбираются электрические аппараты для компоновки выбранных ячеек.

Для установки на питающей ГПП-110/10 кВ с целью её модернизации, предложено выбрать такие ячейки и типы распределительных устройств:

- «на стороне 110 кВ – современное комплектное элегазовое РУ (далее – КРУЭ-110 кВ) с ячейками марки ЯТЭ 110Л/2500 У2, произведенное ЗАО «ЗЭТО» (Великолукский завод электротехнического оборудования)» [7];
- «на стороне 10 кВ – вакуумное комплектное распределительное устройство с выкатным элементом КРУ-ZETO-10, также произведенное ЗАО «ЗЭТО»» [6].

«Комплектные распределительные устройства (КРУЭ) на 110 кВ с ячейками марки ЯТЭ 110Л/2500 У2, произведенные ЗАО «ЗЭТО» (Великолукский завод электротехнического оборудования)» [7], представляют собой передовое решение в области электротехнического оборудования, обладающее рядом преимуществ, обеспечивающих повышенную эффективность и надежность систем электроснабжения. Основной акцент в разработке данных устройств был сделан на оптимизации их эксплуатационных характеристик и безопасности применения.

Данные КРУЭ оснащены ячейками, разработанными с использованием современных материалов и технологий, что обеспечивает их высокую надежность и долговечность. Применение инновационных конструктивных и технологических решений в ячейках ЯТЭ 110Л/2500 У2 позволяет

значительно повысить уровень безопасности эксплуатации, снизив риск возникновения аварийных ситуаций, связанных с электрическими процессами.

Важной особенностью КРУЭ от ЗАО «ЗЭТО» является их адаптация к работе в условиях современных энергосистем, что включает в себя высокую степень автоматизации управления и мониторинга параметров работы оборудования. Это способствует оптимизации процессов распределения электроэнергии, повышению эффективности и экономичности энергопотребления, а также упрощению процедур обслуживания и ремонта.

Применение ячеек ЯТЭ 110Л/2500 У2 в составе КРУЭ обеспечивает улучшенную коммутационную способность и повышенную пропускную способность, что критически важно для систем, испытывающих высокие нагрузки. Это делает данные устройства идеально подходящими для использования в ключевых узлах энергосистем, где требуется гарантия надежности электроснабжения и минимизация времени простоя в случае аварий.

Также следует отметить экологический аспект эксплуатации данных КРУЭ. Использование современных материалов и технологий в производстве оборудования способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду, что важно в контексте современных требований к промышленному оборудованию.

Таким образом, КРУЭ 110 кВ с ячейками марки ЯТЭ 110Л/2500 У2 от ЗАО «ЗЭТО» являются высокотехнологичным и надежным решением для систем электроснабжения, обеспечивающим высокий уровень безопасности, эффективности и экологичности эксплуатации.

Вакуумное комплектное распределительное устройство с выкатным элементом КРУ-ZETO-10, произведенное ЗАО «ЗЭТО», представляет собой современное технологическое решение в области электротехнического оборудования, предназначенное для распределения и коммутации электроэнергии в сетях напряжением до 10 кВ.

Принципиальной особенностью вакуумных коммутаторов является отсутствие воздуха в коммутационной камере, что исключает возможность возникновения электрической дуги при разрыве цепи.

Это обстоятельство существенно повышает электрическую безопасность устройства и уменьшает риск повреждения оборудования из-за коммутационных перенапряжений.

В результате, КРУ-ZETO-10 обеспечивает высокую надежность работы системы электроснабжения, сокращая вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Использование выкатного элемента в конструкции устройства упрощает обслуживание и ремонт, поскольку позволяет быстро извлекать и заменять коммутационное оборудование без необходимости демонтажа всего устройства.

Данный факт снижает время простоя оборудования и увеличивает общую эффективность эксплуатации распределительного устройства.

Кроме того, вакуумное комплектное распределительное устройство КРУ-ZETO-10 характеризуется компактными размерами и низким уровнем шума во время работы, что делает его подходящим для использования в условиях ограниченного пространства и требований к снижению шумового загрязнения.

Важным аспектом является также экологическая безопасность вакуумных коммутаторов.

В отличие от SF₆-коммутаторов, вакуумные коммутаторы не используют гексафторид серы, который является парниковым газом и оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

Это делает КРУ-ZETO-10 более предпочтительным с точки зрения экологических требований.

Таким образом, вакуумное комплектное распределительное устройство с выкатным элементом КРУ-ZETO-10 от ЗАО «ЗЭТО» обладает рядом значительных преимуществ, включая высокую надежность и безопасность

эксплуатации, удобство обслуживания и ремонта, компактность и экологическую безопасность, что делает его эффективным решением для современных систем электроснабжения.

Таким образом, выбор ячеек РУ-110 кВ и РУ-10 кВ производства ЗАО «ЗЭТО», обоснован.

«В РУ-110 кВ и РУ-10 кВ выбираются выключатели следующих марок:

- РУ-110 кВ: ВГТ-110-31,5/2000 (элегазовые);
- РУ-10 кВ: ВБ-10-ПЗ-ZETO-31,5/2000 (вакуумные)» [8].

Значения расчётных токов короткого замыкания и ударных токов при выборе всех аппаратов взяты по исходным данным энергосистемы.

«Результаты выбора выключателей высокого напряжения» [8], представлены в форме таблицы 11.

Таблица 11 – Результаты выбора выключателей ВН (на примере вводных присоединений) в системе ЭС предприятия

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные
«Вводы 1 и 2, выключатели РУ-110 кВ: ВГТ-110-31,5/2000 (элегазовые)» [8]	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 34,58 \text{ А}$	$I_{ном} = 2000 \text{ А}$
	$I_{п.т} \leq I_{отк.ном}$	$I_{п.т} = 9,3 \text{ кА}$	$I_{отк.ном} = 80 \text{ кА}$
	$i_y \leq i_{дин}$	$i_y = 23,67 \text{ кА}$	$i_{дин} = 31,5 \text{ кА}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T$	$I_T^2 \cdot t_T = 9,3^2 \cdot 3 = 259,47 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 80^2 \cdot 3 = 19200 \text{ кА}^2\text{с}$
«Вводы 1 и 2, выключатели РУ-10 кВ: ВБ-10-ПЗ-ZETO-31,5/2000 (вакуумные)» [8]	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 249,16 \text{ А}$	$I_{ном} = 2000 \text{ А}$
	$I_{п.т} \leq I_{отк.ном}$	$I_{п.т} = 5,78 \text{ кА}$	$I_{отк.ном} = 31,5 \text{ кА}$
	$i_y \leq i_{дин}$	$i_y = 10,22 \text{ кА}$	$i_{дин} = 31,5 \text{ кА}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T$	$I_T^2 \cdot t_T = 5,78^2 \cdot 3 = 100,23 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 31,5^2 \cdot 3 = 2976,8 \text{ кА}^2\text{с}$

Результаты выбора разъединителей (на примере вводных присоединений) в системе ЭС предприятия, представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Результаты выбора разъединителей (на примере вводных присоединений) в системе ЭС предприятия

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные
«Разъединители РУ-110 кВ: РГ-16-110/1000 УХЛ1» [8]	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 110 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 34,58 \text{ А.}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 23,67 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 31,5 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$I_T^2 \cdot t_T = 9,3^2 \cdot 3 = 259,47 \text{ кА}^2\text{с.}$	$B_K = 80^2 \cdot 3 = 19200 \text{ кА}^2\text{с.}$

Выбор измерительных трансформаторов тока (далее – ТТ) и трансформаторов напряжения (далее – ТН) осуществляется по потребляемой мощности в требуемом классе точности. В работе на стороне 110 кВ выбраны элегазовые выключатели бакового типа со встроенными трансформаторами тока. Поэтому отдельно выбирать ТТ на стороне 110 кВ нет необходимости.

В работе выбираются ТТ для установки на стороне 10 кВ (таблица 13).

Таблица 13 – Результаты проверки ТТ на стороне 10 кВ

Тип ТН	Схема ТТ	Мощность на один ТТ, ВА	Класс точности	$\frac{U_H}{U_{уст}}$, кВ	$\frac{S_H}{S_2 \Sigma}$, ВА
ТОЛ-СЭЩ-10-21	«неполная звезда»	30	1,0	$\frac{10}{10}$	$\frac{60,0}{\leq 60,0}$

«Выбор трансформаторов напряжения на сторонах 110 кВ и 10 кВ представлены в таблице 14» [15].

Таблица 14 – Результаты выбора ТН на сторонах 110 кВ и 10 кВ

Тип ТН	Кол-во ТН	Мощность на один ТН, ВА	Класс точности	$\frac{U_H}{U_{уст}}$, кВ	$\frac{S_H}{S_2 \Sigma}$, ВА
ЗНОГ-110/УХЛ1	2	600/2	1,0	$\frac{110}{110}$	$\frac{1200,0}{\leq 1200,0}$
НАМИТ-10	2	100/2	1,0	$\frac{10}{10}$	$\frac{200,0}{\leq 200,0}$

Основной задачей устройств защиты от перенапряжений (в частности, ОПН) является обеспечение защиты электротехнического оборудования от повреждений, вызываемых высокими уровнями напряжения в электросети.

Такие перенапряжения могут происходить из-за различных факторов, включая молниевые удары, операции коммутации в сети или другие воздействия, способные привести к критическому ущербу или даже полному выходу из строя электрооборудования.

Устройства защиты от перенапряжений предупреждают подобные повреждения.

Эти устройства монтируются на местах ввода воздушных и кабельных линий электропередач, а также используются в ячейках 10 кВ в сочетании с ранее выбранными вакуумными выключателями, что позволяет нейтрализовать перенапряжения, возникающие в результате формирования «вакуумной дуги».

Таким образом, ОПН играют важную роль на подстанциях, обеспечивая защиту оборудования, стабильность и надёжность системы (таблица 15).

Таблица 15 – Результаты выбора и проверки ограничителей перенапряжения

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные
«РУ-110 кВ: ограничители перенапряжения нелинейные типа ОПНп-110/800/146-10-III-УХЛ1» [18]	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 34,58 \text{ А}$	$I_{ном} = 800 \text{ А}$
	$i_y \leq i_{дин}$	$i_y = 23,67 \text{ кА}$	$i_{дин} = 146 \text{ кА}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T$	$I_T^2 \cdot t_T = 9,3^2 \cdot 3 = 259,47 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 146^2 \cdot 3 = 63948 \text{ кА}^2\text{с}$
«РУ-10 кВ: ограничители перенапряжения нелинейные типа ОПН-П-10/12,7/10/1,1» [18]	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 249,16 \text{ А}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А}$
	$i_y \leq i_{дин}$	$i_y = 10,22 \text{ кА}$	$i_{дин} = 12,7 \text{ кА}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T$	$I_T^2 \cdot t_T = 5,78^2 \cdot 3 = 100,23 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 12,7^2 \cdot 3 = 483,87 \text{ кА}^2\text{с}$

Выбранное оборудование представлено в графической части работы.

Выводы по разделу.

В результате проведения реконструкции схемы объекта исследования, для питания ЩР и потребителей цеха сварочного производства машиностроительного предприятия, выбраны четырёхжильные кабели АВВГ 3×70+1×35, проложенные открыто в лотках.

Для питания сети 10 кВ выбраны кабели марки АСБ различных сечений, проложенные в земляной траншее.

Для обеспечения защиты и коммутации сети цеха сварочного производства машиностроительного предприятия машиностроительного предприятия, выбраны автоматические выключатели марки ВА различных типономиналов.

Для применения на питающей ГПП-110/10 кВ, выбраны следующие типы современных распределительных устройств и ячеек:

- на стороне «110 кВ ГПП-110/10 кВ предусматривается внедрение КРУЭ–110 кВ с ячейками марки ЯТЭ 110Л/2500 У2, произведенное ЗАО «ЗЭТО» (Великолукский завод электротехнического оборудования)» [7];
- «на стороне 10 кВ выбрано для внедрения вакуумное комплектное распределительное устройство закрытого типа с выкатным элементом КРУ-ZETO-10, также произведенное ЗАО «ЗЭТО»» [8].

Выбрано и проверено основное оборудование для комплектования данных ячеек РУ (выключатели, разъединители, измерительные ТТ и ТН, а также ОПН).

Установлено, что всё выбранное оборудование напряжением 110 кВ и 10 кВ подходит для применения на ГПП-110/10 кВ объекта исследования.

5 Расчёт заземления ТП-10/0,4 кВ цеха сварочного производства

Далее в работе проводится расчёт заземления питающей ТП-10/0,4 кВ реконструируемого цеха сварочного производства машиностроительного предприятия.

Заземление на цеховой трансформаторной подстанции выполняет критически важную функцию в обеспечении безопасности и надежности работы всей электроэнергетической системы.

Оно представляет собой систему соединений, которая обеспечивает электрическую связь определенных частей электроустановок с землей с целью защиты от поражения электрическим током, обеспечения корректной работы защитной аппаратуры и повышения надежности электроснабжения.

В контексте технической эксплуатации цеховой трансформаторной подстанции заземление обеспечивает равномерное распределение потенциала земли по всей территории подстанции, что минимизирует риск поражения электрическим током персонала.

Также заземление играет важную роль в обеспечении корректной работы системы электрозащиты подстанции.

Оно позволяет системам защиты адекватно реагировать на любые нештатные изменения в режимах работы электроустановок, обеспечивая их отключение от источника питания при обнаружении неполадок, таким образом предотвращая возможные аварии.

Кроме того, заземление способствует уменьшению электромагнитных помех в сети, что обеспечивает стабильность работы электрооборудования и повышает качество электроэнергии.

Таким образом, система заземления, выполненная в соответствии с техническими нормами и стандартами, является неотъемлемым элементом безопасной и эффективной эксплуатации цеховой трансформаторной подстанции.

Заземляющее устройство сооружается в первой климатической зоне России.

В качестве естественного заземлителя используется железобетонный фундамент здания КРУЭ-110 кВ площадью 336 м².

Согласно инженерно-геологических изысканий, на территории ТП-10/0,4 кВ, земля имеет двухслойную электрическую структуру, удельное сопротивление которых $\rho_1 = 250 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $\rho_2 = 150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

«Поскольку на подстанции используется электроустановки до и выше 1000 В, то к заземляющему устройству должны быть предъявлены следующие требования:

- требования сети 0,38/0,22 кВ, работающей с глухозаземлённой нейтралью $\leq 4 \text{ Ом}$;
- требования сети 10 кВ, работающей с изолированной нейтралью $\leq 10 \text{ Ом}$.

Эквивалентное удельное сопротивление земли определяется по формуле» [12]:

$$\rho_{\text{экв.}} = \frac{\kappa_c \cdot \rho_1 \cdot h_1}{\kappa_c \cdot h_1 - (\kappa_c - 1) \cdot h_c}, \quad (52)$$

где « κ_c - сезонный коэффициент двух слоёв земли; $\kappa_c = 4$;

ρ_1 - удельное сопротивление верхнего слоя, Ом·м;

h_1 - толщина верхнего слоя земли, м; $h_1 = 2 \text{ м}$;

h_c - условная толщина слоя сезонных изменений, м; $h_c = 1,6 \text{ м}$ » [12].

$$\rho_{\text{экв.}} = \frac{4 \cdot 250 \cdot 2}{4 \cdot 2 - (4 - 1) \cdot 1,6} = 625 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

«Допустимая величина сопротивления заземляющего устройства, к которому присоединяется нейтраль трансформатора с учётом удельного сопротивления земли» [12]:

$$R_{Д(0,38)} = R_{Д1} \cdot \frac{\rho_{экв}}{100}, \quad (53)$$

где $R_{Д1}$ - «допустимая величина сопротивления заземляющего устройства при значении эквивалентного сопротивления, меньшего 100 Ом» [12].

«В итоге» [12]:

$$R_{Д(0,38)} = 4 \cdot \frac{625}{100} = 25 \text{ Ом.}$$

«Это сопротивление должно быть обеспечено с учётом использования естественных заземлителей R_e , искусственных заземлителей $R_{иск.}$ и суммарного сопротивления всех заземляющих устройств питающих линий сети 0,38 кВ» [12]:

$$\frac{1}{R_{Д}} = \frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_{иск.}} + \frac{1}{R_{\sum Л}}. \quad (54)$$

«Сопротивление естественного заземляющего устройства определяется по формуле» [12]:

$$R_e = 0,5 \frac{\rho_{э}}{\sqrt{S}}, \quad (55)$$

где S – «площадь, ограниченная периметром здания, m^2 ;

$\rho_{э}$ - удельное эквивалентное сопротивление земли» [12].

«Для расчёта ρ_3 используется формула» [12]:

$$\rho_3 = \rho_1 \cdot \left(1 - e^{-\alpha \cdot \frac{h_1}{\sqrt{S}}} \right) + \rho_2 \cdot \left(1 - e^{-\beta_1 \cdot \frac{\sqrt{S}}{h_1}} \right), \quad (56)$$
$$\rho_3 = 250 \cdot \left(1 - e^{-3,6 \cdot \frac{2}{\sqrt{336}}} \right) + 150 \cdot \left(1 - e^{-0,3 \cdot \frac{\sqrt{336}}{2}} \right) = 254 \text{ Ом.}$$
$$R_e = 0,5 \cdot \frac{254}{\sqrt{336}} = 6,9 \text{ Ом.}$$

«Определяется допустимая величина суммарного сопротивления всех заземляющих устройств каждой воздушной линии 0,38 кВ с учётом удельного сопротивления земли» [12]:

$$R_{\text{сум.}} = R_{\text{общ.}} \cdot \frac{\rho}{100}, \quad (57)$$

где $R_{\text{общ.}}$ - «общее сопротивление растеканию заземлителей всех повторных заземлений нулевого рабочего провода, Ом» [12].

$$R_{\text{сум.}} = 10 \cdot \frac{254}{100} = 25,4 \text{ Ом.}$$

«Допустимая величина сопротивления каждого повторного заземления нулевого провода» [12]:

$$R_{\text{ПЗ}} = R_{\text{ПЗ1}} \cdot \frac{\rho}{100}, \quad (58)$$

«Подставив численные значения, получается» [12]:

$$R_{ПЗ} = 25 \cdot \frac{254}{100} = 63,5 \text{ Ом.}$$

«Расставив заземляющие устройства в сети 0,38 кВ, определяется суммарное сопротивление каждой отходящей линии» [12]:

$$R_{Л} = \frac{R_{ПЗ}}{N_{Л}}, \quad (59)$$

«Подставив численные значения в формулу, получается» [12]:

$$R_{Л} = \frac{63,5}{3} = 21,1 \text{ Ом.}$$

«Таким образом, принимается значение $R_{ПЗ} = 21,1 \text{ Ом}$.

Сопротивление заземляющего устройства, при прохождении расчётного тока замыкания на землю, в любое время года, с учётом сопротивления естественных заземлителей, должно быть не более» [12]:

$$R_{Д(10)} = \frac{125}{I_{ЗЗ}} \leq 10 \text{ Ом}, \quad (60)$$

где $I_{ЗЗ}$ - «расчётный ток замыкания на землю, А» [12].

«Ёмкостной ток однофазного замыкания на землю» [12]:

$$I_{ЗЗ} = \frac{U \cdot (L_{\epsilon} + 35 \cdot L_{\kappa})}{350}, \quad (61)$$

где U – «линейное напряжение сети, кВ»;

L_{ϵ} - длина всех участков воздушной линии сети с изолированной нейтралью, км; $L_{\kappa} = 3,71 \text{ км}$;

L_k - длина всех участков кабельной линии сети с изолированной нейтралью, км; $L_k=1,1$ км» [12].

«Подставляя численные значения в формулы» [12]:

$$I_{33} = \frac{10 \cdot (3,71 + 35 \cdot 1,1)}{350} = 1,53 \text{ А.}$$

$$R_{Д(10)} = \frac{125}{1,53} = 81,7 \text{ Ом.}$$

«Величина сопротивления искусственного заземлителя определяется по формуле» [12]:

$$R_{иск.(10)} = \frac{R_{Д(10)} \cdot R_e}{R_{Д(10)} - R_e}, \quad (62)$$

$$R_{иск.(10)} = \frac{81,7 \cdot 6,9}{81,7 - 6,9} = 7,54 \text{ Ом.}$$

«После сравнения полученных величин $R_{иск.(0,38)}$ и $R_{иск.(10)}$, для расчёта принимается меньшая из них: $R_{иск.} = 3,75$ Ом» [12].

«Определяется сопротивления вертикальных и горизонтальных элементов заземлителя.

Вертикальные электроды пересекут границу раздела между слоями земли.

Поэтому» [12]:

$$\rho_{экв.} = \frac{\kappa \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot l_g}{\rho_1 \cdot (t + \kappa \cdot l_g - h) + \rho_2 \cdot (h - t)}, \quad (63)$$

где « $\kappa = 1$ при $\rho_1 > \rho_2$ и $\kappa = 1,2$ при $\rho_1 < \rho_2$;

ρ_1 - удельное сопротивление верхнего слоя, Ом·м;
 ρ_2 - удельное сопротивление нижнего слоя, Ом·м;
 h - толщина верхнего слоя земли, м;
 t - глубина заложения электрода, м;
 l_g - длина вертикального электрода, м» [12].

Таким образом:

$$\rho_{\text{экв.}} = \frac{1 \cdot 250 \cdot 150 \cdot 5}{250 \cdot (0,7 + 1,5 \cdot 5 - 2) + 150 \cdot (2 - 0,7)} = 167,4 \text{ Ом.}$$

«Сопротивление вертикального заземлителя» [12]:

$$R_B = \frac{\rho_{\text{экв.}}}{2 \cdot \pi \cdot l_g^2} \cdot \left[l_g \cdot \ln \frac{4 \cdot l_g}{d} + (l_g + t) \cdot \ln \frac{l_g + t}{l_g + 2 \cdot t} + t \cdot \ln \frac{2 \cdot t}{l_g + 2 \cdot t} - 0,307 \cdot l_g \right], \quad (64)$$

где « d - диаметр стержня с круглым поперечным сечением, м» [12].

$$R_B = \frac{167,4}{2 \cdot 3,14 \cdot 5^2} \cdot \left[5 \cdot \ln \frac{4 \cdot 5}{0,01} + (5 + 0,7) \cdot \ln \frac{5 + 0,7}{5 + 2 \cdot 0,7} + \right. \\ \left. + 0,7 \cdot \ln \frac{2 \cdot 0,7}{5 + 2 \cdot 0,7} - 0,307 \cdot 5 \right] = 28,8 \text{ Ом.}$$

«Проводимость вертикальных электродов» [12]:

$$j_B = \frac{1}{R_B}, \quad (65)$$

$$j_B = \frac{1}{28,8} = 0,035 \text{ См.}$$

«Определяется предварительное количество вертикальных стержней» [12]:

$$n_B = \frac{R_B}{R_{иск.}}, \quad (66)$$

$$n_B = \frac{28,8}{3,75} = 7,68 \text{ шт.}$$

«Принимается 8 вертикальных стержней.

Сопротивление горизонтального заземлителя рассчитывается по формуле» [12]:

$$R_{Г} = \frac{\rho_{эк.з}}{2 \cdot \pi \cdot l_2} \cdot \left[\ln \frac{l_2^2}{d_{эк.} \cdot t} + \frac{2 \cdot t}{l_2} - 0,5 \cdot \left(\frac{2 \cdot t}{l_2} \right)^2 - 0,61 \right], \quad (67)$$

где l_2 - «длина горизонтального заземлителя, м;

$d_{эк.}$ - эквивалентный диаметр стальной полосы, м» [12].

«Значение эквивалентного диаметра стальной полосы определяется по формуле» [12]:

$$d_{эк.} = 0,5 \cdot b, \quad (68)$$

$$d_{эк.} = 0,5 \cdot 0,048 = 0,024 \text{ м}$$

Значит:

$$R_{Г1} = \frac{167,4}{2 \cdot 3,14 \cdot 6} \cdot \left[\ln \frac{6^2}{0,024 \cdot 0,7} + \frac{2 \cdot 0,7}{6} - 0,5 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,7}{6} \right)^2 - 0,61 \right] = 31,3 \text{ Ом.}$$

$$R_{Г1} = \frac{167,4}{2 \cdot 3,14 \cdot 7,5} \cdot \left[\ln \frac{7,5^2}{0,024 \cdot 0,7} + \frac{2 \cdot 0,7}{7,5} - 0,5 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,7}{7,5} \right)^2 - 0,61 \right] = 22,8 \text{ Ом.}$$

«Проводимость горизонтальных электродов определяется по формуле» [12]:

$$j_{\Gamma} = \frac{1}{R_{\Gamma}}, \quad (69)$$

$$j_{\Gamma 1} = \frac{1}{31,3} = 0,03 \text{ См},$$

$$j_{\Gamma 2} = \frac{1}{22,8} = 0,04 \text{ См}.$$

«Сопротивление заземляющего контура определяется» [12]:

$$R_{\text{иск.}} = \frac{1}{\eta} \cdot \sum_{i=1}^{n_B} \Lambda_i = \frac{1}{\eta} \cdot (n_B \cdot j_B + 2 \cdot j_{\Gamma 1} + 2 \cdot j_{\Gamma 2}), \quad (70)$$

где η - «коэффициент использования» [12].

$$R_{\text{иск.}} = \frac{1}{0,586} \cdot (7,68 \cdot 0,035 + 2 \cdot 0,03 + 2 \cdot 0,04) = 0,07 \text{ Ом}.$$

Таким образом, расчётное сопротивление спроектированного контура заземления питающей ТП-10/0,4 кВ реконструируемого цеха сварочного производства машиностроительного предприятия, равное 0,07 Ом, меньше, чем максимально допустимое значение в сети 0,38/0,22 кВ, равное 4 Ом, и меньше, чем максимально допустимое значение в сети 10 кВ, равное 10 Ом.

Следовательно, расчёт заземления проведён верно.

Выводы по разделу.

В работе проведён расчёт контура заземления цеховой ТП, в результате чего определено, что в данном контуре заземления рекомендовано использовать восемь вертикальных электродов.

Установлено, что расчётное сопротивление спроектированного контура заземления питающей ТП-10/0,4 кВ реконструируемого цеха сварочного производства машиностроительного предприятия, равное 0,07 Ом, меньше, чем максимально допустимое значение в сети 0,38/0,22 кВ, равное 4 Ом, и меньше, чем максимально допустимое значение в сети 10 кВ, равное 10 Ом.

Заключение

В работе осуществлена разработка мероприятий по реконструкции системы электроснабжения цеха сварочного производства машиностроительного предприятия с последовательной проверкой основных решений. Данная реконструкция обусловлена вводом в эксплуатацию новых потребителей цеха сварочного производства данного предприятия.

Проведён анализ исходных технических и технологических данных на выполнение работы.

Рассмотрен состав машиностроительного предприятия. Установлено, что в него входит комплекс, состоящий из одиннадцати цехов и подразделений. Приведено краткое описание функций перечисленных подразделений. Установлено, что каждый из цехов завода выполняет уникальный набор задач, обеспечивая полный цикл производства от литья и обработки до сборки и испытания готовой продукции.

Определено, что в состав машиностроительного завода входят два приемники напряжением 10 кВ. Это – высоковольтные электродвигатели литейного цеха черных металлов. Остальные приёмники предприятия работают на напряжении 0,38/0,22 кВ. Данные аспекты необходимо учесть в работе далее. Показано, что в работе, согласно заданию, необходимо провести разработку проекта реконструкции системы электроснабжения цеха сварочного производства машиностроительного предприятия.

Поэтому среди всего оборудования также присутствует новое, которое вводится в эксплуатацию в существующей схеме цеха сварочного производства. Для этого в работе необходимо выбрать рациональные решения. Проведено детальное описание технологий и назначения данного цеха, так как он является основным объектом исследования в работе.

В результате проведения анализа исходных данных и состояния оборудования цеха сварочного производства, установлено следующее:

- электроприемники в цехе по надежности электроснабжения относятся ко второй категории;
- все потребители цеха рассчитаны на переменный ток напряжением 380/220 В;
- все потребители цеха устанавливаются стационарно и по площади цеха распределены равномерно;
- в цехе имеются электроприемники, работающие в повторно-кратковременном режиме, это – кран-балки;
- окружающая среда в цехе нормальная, температура 25°С.

В работе приняты соответствующие схемные решения. Проведена проверка схемы электроснабжения предприятия и обоснование реконструкции схемы цеха сварочного производства. Установлено, что схема электроснабжения машиностроительного предприятия соответствует требованиям нормативных документов и в реконструкции не нуждается. Таким образом, в работе необходимо проверить выбранные решения в схеме ЭС завода в связи с введением в эксплуатацию дополнительной нагрузки цеха сварочного производства предприятия. Рассмотрены схемные решения в системе внутреннего электроснабжения цеха сварочного производства машиностроительного предприятия. Установлено, что данная реконструкция определена вводом новых потребителей в существующую схему данного цеха.

К ним относятся:

- сварочные посты – 5 единиц мощностью 20 кВт каждый (итого – 100 кВт);
- устройства дуговой сварки – одно устройство мощностью 10 кВт;
- устройства аргодуговой сварки – одно устройство мощностью 40 кВт.

Таким образом, мощность новых потребителей цеха сварочного производства составляет 150 кВт. В цеху предусмотрены три распределительных щита (далее – РЩ) напряжением 0,38/0,22 кВ, от которых получают питание существующие потребители цеха. Предлагается новые

потребители подключить отдельной питающей кабельной линией 0,38/0,22 кВ к новому РЩ4. Такая схема удовлетворяет требованиям нормативных документов и реализуется в работе.

Рассчитаны электрические нагрузки детально рассматриваемого цеха сварочного производства машиностроительного предприятия, а также освещения, силовой и суммарной нагрузки системы электроснабжения машиностроительного предприятия.

Исходя из полученных данных, для установки на питающей ГПП-110/10 кВ окончательно приняты два силовых трансформатора типа ТМН-4000/110, которые удовлетворяют условиям выбора и полностью совпадают с трансформаторами, установленными на главной понизительной подстанции машиностроительного предприятия ранее. Оба трансформатора в нормальном режиме включены на существующую нагрузку подстанции. В аварийном режиме один трансформатор сможет обеспечить питание всей нагрузки I и II категории надёжности всего предприятия.

Рассчитан центр электрических нагрузок предприятия. Определено, что питающая ГПП-110/10 кВ машиностроительного предприятия находится в непосредственной близости к ЦЭН.

Для питания нагрузки цехов на напряжении 0,38/0,22 кВ, выбраны четыре двухтрансформаторные подстанции 10/0,4 кВ с силовыми трансформаторами марки ТМ-1600/10 (на всех четырёх ЦТП). Предложено все цеховые ТП-10/0,4 кВ выполнить в виде комплектных подстанций, которые удобнее, компактнее и надёжнее закрытых и открытых типов подстанций. Выбраны проводники и электрические аппараты.

В результате проведения реконструкции схемы объекта исследования, для питания ЩР и потребителей цеха сварочного производства машиностроительного предприятия, выбраны четырёхжильные кабели АВВГ 3×70+1×35, проложенные открыто в лотках.

Для питания сети 10 кВ выбраны кабели марки АСБ различных сечений, проложенные в земляной траншее.

Для обеспечения защиты и коммутации сети цеха сварочного производства машиностроительного предприятия машиностроительного предприятия, выбраны автоматические выключатели марки ВА различных типоминалов. Для применения на питающей ГПП-110/10 кВ, выбраны следующие типы современных распределительных устройств и ячеек:

- на стороне 110 кВ ГПП-110/10 кВ предусматривается внедрение КРУЭ–110 кВ с ячейками марки ЯТЭ 110Л/2500 У2, произведенное ЗАО «ЗЭТО» (Великолукский завод электротехнического оборудования);
- на стороне 10 кВ выбрано для внедрения вакуумное комплектное распределительное устройство закрытого типа с выкатным элементом КРУ-ZETO-10, также произведенное ЗАО «ЗЭТО».

Выбрано и проверено основное оборудование для комплектования данных ячеек РУ (выключатели, разъединители, измерительные ТТ и ТН, а также ОПН). Установлено, что всё выбранное оборудование напряжением 110 кВ и 10 кВ подходит для применения на ГПП-110/10 кВ объекта исследования.

В работе проведён расчёт контура заземления цеховой ТП, в результате чего определено, что в данном контуре заземления рекомендовано использовать восемь вертикальных электродов. Установлено, что расчётное сопротивление спроектированного контура заземления питающей ТП-10/0,4 кВ реконструируемого цеха сварочного производства машиностроительного предприятия, равное 0,07 Ом, меньше, чем максимально допустимое значение в сети 0,38/0,22 кВ, равное 4 Ом, и меньше, чем максимально допустимое значение в сети 10 кВ, равное 10 Ом. Следовательно, расчёт заземления проведён верно.

Таким образом, по результатам расчётов можно сделать вывод, что предложенные мероприятия по реконструкции схемы электрических соединений цеха сварочного производства системы электроснабжения машиностроительного предприятия, являются технически обоснованными.

Список используемых источников

1. ВА 88 (88-32, 88-33, 88-35, 88-37, 88-40, 88-43). [Электронный ресурс]: URL: <https://m-energo-spb.ru/va-88-88-32-88-33-88-35-88-37-88-40-88-43> (дата обращения: 10.04.2024).
2. ГОСТ Р 59279-2020 «Схемы принципиальные электрические распределительных устройств от 35 до 750 кВ подстанций». [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200177281> (дата обращения: 10.04.2024).
3. Длительно допустимый ток кабелей АСБ. [Электронный ресурс]: URL: <https://ru.pinterest.com/pin/463870830372952509/> (дата обращения: 10.04.2024).
4. Камбарский машиностроительный завод. Заготовительно-сварочное производство. [Электронный ресурс]: URL: <https://zavod-kmz.ru/about-us/> (дата обращения: 10.04.2024).
5. Киреева Э.В. Электроснабжение и электрооборудование организаций и учреждений. М.: Кнорус, 2019. 236 с.
6. Комплектное распределительное устройство КРУ ZETO-6(10) кВ. [Электронный ресурс]: URL: <https://zeto.ru/kru-zeto-na-6-10-i-20-kv/> (дата обращения: 10.04.2024).
7. Комплектное распределительное устройство КРУЭ–110 кВ. [Электронный ресурс]: URL: <https://zeto.ru/kru-e-110/> (дата обращения: 28.02.2024).
8. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. М.: Академия, 2021. 400 с.
9. Куксин А.В. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебное пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.
10. Немировский А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций. М.: Инфра-Инженерия, 2020. 174 с.
11. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей.

Изд-во ДЕАН, 2022. 192 с.

12. Правила устройства электроустановок. 7-е издание. Изд-во ЦентрМаг, 2022. 584 с.

13. Сварочное производство на предприятии: особенности, технология и функции проведения сварочных работ [Электронный ресурс]: URL: <https://svar-go.ru/stati/svarochnoe-proizvodstvo-na-predpriyatii-osobennosti-tekhnologiya-i-funktsii-provedeniya-svarochnykh-rabot> (дата обращения: 10.04.2024).

14. Сибикин Ю.Д. Пособие к курсовому и дипломному проектированию электроснабжения промышленных, сельскохозяйственных и городских объектов. Учебное пособие. М.: Форум, 2021. 383 с.

15. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий. Учебное пособие. М.: Форум, Инфра-М, 2022. 406 с.

16. СП 440.1325800.2018 Проектирование естественного и искусственного освещения. [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/554819713> (дата обращения: 10.04.2024).

17. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 29.07.2017) «Об энергосбережении, повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями на 13 июня 2023 года). [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/902186281> (дата обращения: 10.04.2024).

18. Фризен В.Э., Назаров С. Л. Расчет и выбор электрооборудования низковольтных распределительных сетей промышленных предприятий. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2021. 184 с.

19. Щербаков Е. Ф., Александров Д. С. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях. М.: Форум, Инфра-М, 2019. 495 с.

20. Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 года. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р. Москва: Министерство энергетики, 2020. 142 с.