

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 цеха
машиностроительного завода

Обучающийся

А. В. Липатников

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., О. В. Самолина

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

Тольятти 2024

Аннотация

В работе разработан проект по реконструкции системы электроснабжения сварочного цеха машиностроительного завода.

Определено, что необходимость реконструкции возникла из-за предстоящего подключения новых потребителей, которые планируется ввести в эксплуатацию в этом году.

В рамках исследования решены следующие основные задачи:

- определены цели и задачи реконструкции;
- выполнена реконструкция основных элементов схемы системы электроснабжения цеха;
- выбрана новая и современная система релейной защиты;
- рассчитаны параметры молниезащиты и заземления для питающей трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ сварочного цеха.

Таким образом, изменения в схеме электрических соединений сварочного цеха привели к значительному улучшению ключевых характеристик надёжности, экономичности и безопасности электроснабжения.

Кроме того, удалось повысить стабильность подачи электроэнергии, а система защиты стала более селективной и быстрой, что обеспечивает более эффективное функционирование системы электроснабжения цеха и предприятия в целом.

Содержание

Введение.....	4
1 Анализ исходных данных по электроснабжению потребителей предприятия	6
1.1 Общие сведения о предприятии	6
1.2 Анализ исходных данных по электроснабжению сварочного цеха	9
2 Расчет электрических нагрузок цеха.....	20
3 Выбор и расчёт числа и мощности трансформаторов.....	26
4 Расчет токов короткого замыкания	29
5 Выбор и расчёт электрических аппаратов и проводников	37
5.1 Выбор сечения проводников системы электроснабжения сварочного цеха	37
5.2 Выбор электрических аппаратов	42
6 Выбор устройств релейной защиты и автоматики	54
7 Расчёт заземления и молниезащиты.....	60
7.1 Расчёт контура заземления.....	60
7.2 Расчёт молниезащиты.....	64
Заключение	69
Список используемой литературы	74

Введение

Реконструкция систем электроснабжения цехов промышленных предприятий в Российской Федерации представляет собой важную и актуальную задачу, обусловленную рядом факторов, связанных с модернизацией производственных мощностей и повышением требований к энергетической эффективности. В современных условиях, когда промышленные предприятия сталкиваются с увеличением объемов производства и необходимостью внедрения энергоёмкого оборудования, реконструкция систем электроснабжения становится ключевым элементом в обеспечении надежности и устойчивости работы предприятия.

Актуальность данного направления усиливается в связи с необходимостью соответствия современным стандартам энергосбережения и минимизации эксплуатационных затрат.

Перспективы реконструкции систем электроснабжения промышленных цехов связаны с внедрением новых технологий и инновационных решений, таких как интеллектуальные системы управления энергопотреблением и автоматизация процессов контроля за состоянием оборудования.

Указанные мероприятия не только способствуют снижению потерь электроэнергии, но и позволяют оперативно реагировать на изменения в производственных нагрузках, обеспечивая тем самым гибкость и адаптивность системы электроснабжения.

Таким образом, реконструкция систем электроснабжения цехов промышленных предприятий в России имеет значительные перспективы для улучшения энергетической эффективности и надёжности производственных процессов. Данное направление требует внимательного подхода к проектированию и реализации, учитывая как технические аспекты, так и экономические обоснования, что позволит достичь оптимального баланса между затратами на модернизацию и получаемыми преимуществами.

Таким образом, данные мероприятия по реконструкции схем и

модернизации оборудования направлены на повышение надёжности, безопасности и эффективности электроснабжения, что в конечном итоге способствует устойчивому развитию и повышению конкурентоспособности отечественной промышленности [20].

Основной целью настоящей работы является разработка проекта реконструкции системы электроснабжения сварочного цеха машиностроительного завода, в котором будут реализованы необходимые и достаточные условия по надёжности, эффективности и безопасности.

Определено, что необходимость реконструкции возникла из-за предстоящего подключения новых потребителей, которые планируется ввести в эксплуатацию в этом году.

В работе необходимо решить следующие основные задачи:

- определить цели и задачи реконструкции объекта исследования;
- выполнить обозначенную реконструкцию основных элементов схемы системы электроснабжения цеха, которая необходима для надёжного функционирования системы электроснабжения объекта реконструкции;
- выбрать новую и современную систему релейной защиты питающей линии 10 кВ сварочного цеха;
- рассчитать параметры молниезащиты и заземления для питающей трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ сварочного цеха.

Таким образом предполагается, что внесённые изменения в схему электрических соединений сварочного цеха, а также внедрение новой и современной системы релейной защиты питающей линии 10 кВ, приведут к значительному улучшению ключевых характеристик надёжности, экономичности и безопасности электроснабжения на объекте реконструкции.

Кроме того, таким образом планируется повысить стабильность подачи электроэнергии, а систему защиты сделать более селективной и быстрой, что обеспечит более эффективное функционирование системы электроснабжения сварочного цеха и машиностроительного завода в целом.

1 Анализ исходных данных по электроснабжению потребителей предприятия

1.1 Общие сведения о предприятии

Согласно заданию, в работе проводится определение целей и задач реконструкции системы электроснабжения сварочного цеха машиностроительного завода. В качестве объекта исследования выбран сварочный цех машиностроительного завода ОАО «Демиховский машиностроительный завод» [11].

Как известно, ОАО «Демиховский машиностроительный завод» (далее – ДМЗ) является одним из ведущих российских предприятий в области машиностроения, специализирующимся на производстве подвижного состава для железнодорожного транспорта. Он расположен в деревне Демихово Орехово-Зуевского района Московской области [11].

Расположение ОАО «Демиховский машиностроительный завод» на карте местности деревни Демихово Орехово-Зуевского района Московской области показано на рисунке 1.

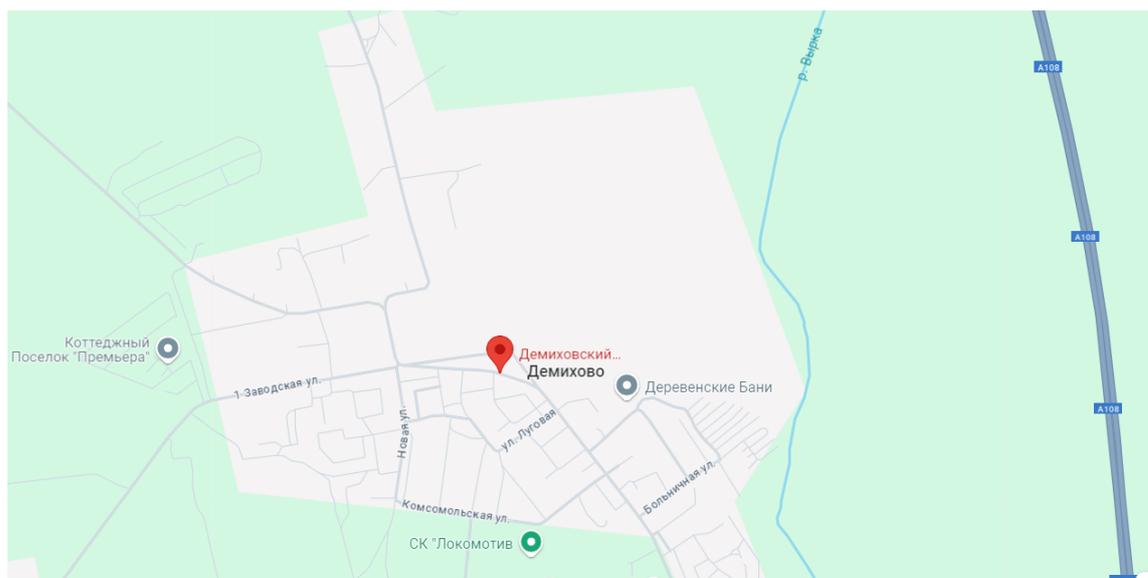


Рисунок 1 – Расположение ОАО «Демиховский машиностроительный завод» на карте местности деревни Демихово Орехово-Зуевского района Московской области

История ДМЗ насчитывает более века, и за это время предприятие превратилось из небольшого механического завода в крупного производителя электропоездов и другой железнодорожной техники, активно развивающегося и модернизирующего свои производственные мощности в соответствии с современными требованиями.

На сегодняшний день Демиховский машиностроительный завод является одним из крупнейших производителей электропоездов для пригородных железнодорожных сообщений в России и странах СНГ.

Завод выпускает широкий спектр продукции, включая электропоезда постоянного и переменного тока, дизельные поезда, а также различные модификации вагонов.

ДМЗ располагает мощной производственной базой, включающей несколько цехов и участков, оснащенных современным оборудованием и технологическими линиями.

Завод осуществляет полный цикл производства, начиная от проектирования и разработки конструкторской документации до выпуска готовой продукции и её последующего сервисного обслуживания.

Большое внимание уделяется научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, что позволяет предприятию разрабатывать и внедрять в производство новые модели подвижного состава, соответствующие мировым стандартам.

Важным аспектом работы завода является внедрение инновационных решений и новых технологий в производство. ДМЗ активно использует цифровые технологии, автоматизацию производственных процессов и робототехнику, что позволяет значительно повысить эффективность работы и снизить издержки.

Предприятие сотрудничает с ведущими научно-исследовательскими институтами и конструкторскими бюро, что способствует постоянному совершенствованию выпускаемой продукции и разработке новых моделей подвижного состава, отвечающих требованиям времени.

Завод также активно участвует в программах модернизации и обновления железнодорожного транспорта в России. Продукция ДМЗ востребована не только на внутреннем рынке, но и за рубежом, что свидетельствует о высоком уровне доверия к качеству и надежности выпускаемых изделий. В условиях растущей конкуренции на международном рынке железнодорожной техники, Демиховский машиностроительный завод продолжает расширять географию своих поставок и укреплять свои позиции на международной арене [11].

Экономические показатели предприятия демонстрируют стабильный рост, что является результатом эффективной стратегии управления и ориентированности на удовлетворение потребностей заказчиков. Завод последовательно инвестирует в модернизацию своих производственных мощностей, что позволяет ему оставаться конкурентоспособным и гибко реагировать на изменения рыночной конъюнктуры.

Высокий профессионализм и опыт коллектива, состоящего из квалифицированных инженеров, технологов и рабочих, обеспечивают высокое качество и надежность выпускаемой продукции.

ОАО «Демиховский машиностроительный завод» играет важную роль в развитии железнодорожной отрасли России и СНГ, внося значительный вклад в модернизацию и обновление подвижного состава. В перспективе предприятие планирует продолжить развитие своих производственных мощностей, расширение ассортимента выпускаемой продукции и внедрение новых технологий, что позволит ему сохранить лидирующие позиции на рынке и обеспечить устойчивое развитие в будущем.

Завод ориентирован на дальнейшее укрепление партнерских отношений с ведущими железнодорожными операторами и расширение присутствия на международных рынках, что является залогом его успешного развития и роста.

Таким образом, ОАО «Демиховский машиностроительный завод» является ярким примером успешного предприятия, которое, опираясь на

традиции и инновации, уверенно движется вперед, укрепляя свои позиции на рынке и внося значительный вклад в развитие машиностроительной отрасли России.

В перспективе завод планирует продолжить развитие и модернизацию своих производственных мощностей, расширение продуктовой линейки и выход на новые рынки, что позволит ему сохранить лидирующие позиции и обеспечить устойчивый рост в будущем.

В связи с этим, проводится расширение производства с плановым увеличением производственных мощностей основных цехов предприятия, одним из которых является сварочный цех, реконструкция которого проводится в настоящей работе.

В связи с этим, далее в работе проводится анализ исходных данных по электроснабжению сварочного цеха ОАО «Демиховский машиностроительный завод», который является объектом исследования.

1.2 Анализ исходных данных по электроснабжению сварочного цеха

Сварочный цех ОАО «Демиховский машиностроительный завод» является современным необходимым производственным звеном на данном машиностроительном заводе.

«Питание системы электроснабжения сварочного цеха ОАО «Демиховский машиностроительный завод» осуществляется от цеховой понизительной трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ (далее - ТП-10/0,4 кВ), которая, в свою очередь, получает питание от главной понизительной подстанции завода (далее – ГПП-110/10 кВ).

Так как сварочный цех относится к пожароопасным и взрывоопасным объектам, на рассматриваемой цеховой ТП-10/0,4 кВ» [11] установлено два силовых трансформатора сухого типа марки ТСЗ-1000/10/0,4.

Они питают две секции сборных шин 0,38/0,22 кВ на низком

напряжении, от которых получают питание потребители цеха с помощью двух шинопроводов.

На подстанции в настоящее время применяется схема «Одна, секционированная выключателем, система сборных шин». Данная конфигурация предусматривает разделение системы сборных шин [14] на секции с использованием шинных мостов для соединения и обеспечения связи между ними.

Резервирование в данной схеме реализовано с помощью секционного автоматического выключателя, который в нормальных условиях находится в отключённом состоянии.

В случае аварии включение резервного питания осуществляется автоматически благодаря установленной на секционном выключателе системе автоматического включения резерва (АВР).

Данная схема электрических соединений обладает множеством значительных преимуществ.

Ключевым достоинством является её высокая надёжность и гибкость.

Секционирование сборных шин посредством выключателя позволяет оптимально управлять потоками электроэнергии и проводить техническое обслуживание без полного отключения подстанции.

Это особенно важно для поддержания непрерывного электроснабжения: одна секция может оставаться в рабочем состоянии, пока другая находится в процессе ремонта или проверки.

Благодаря такому подходу, создаются условия для эффективного резервирования электроснабжения, что минимизирует риски отключения потребителей при аварийных ситуациях.

Система АВР обеспечивает быстрое восстановление питания в случае аварии, что повышает общую надёжность работы подстанции.

Кроме того, данная схема способствует увеличению эксплуатационной гибкости, так как позволяет оперативно переключать нагрузку между секциями, обеспечивая тем самым стабильную работу всей системы.

Таким образом, применяемая на подстанции схема секционированной системы сборных шин обеспечивает необходимые и достаточные условия для надёжного резервирования и эффективного управления потоками электроэнергии, что значительно улучшает эксплуатационные характеристики подстанции и повышает надёжность электроснабжения потребителей.

На стороне 10 кВ цеховой подстанции ТП-10/0,4 кВ установлены следующие коммутационные и защитные аппараты:

- выключатели нагрузки марки ВНА-10/630У1– 2 единицы;
- предохранители плавкие марки ПКТ103-10-80-20У1– 2 единицы.

Кроме того, в двух ячейках на питающей ГПП-110/10 кВ предприятия, откуда получает питание рассматриваемая ТП-10/0,4 кВ, установлены высоковольтные выключатели марки ВБЭ-10-20/1000 УХЛ2, трансформаторы тока ТОЛ-СВЭЛ-10 и ограничители перенапряжения марки ОПНп-10/11,5/10/550 УХЛ1.

Все перечисленные аппараты 10 кВ – новые и современные, они не нуждаются в замене (кроме устаревшей системы релейной защиты и автоматики).

На стороне 0,38/0,22 кВ ТП-10/0,4 кВ установлены выключатели автоматические марки ВА различных назначений (вводные, секционный и линейные) и типономиналов.

От секций сборных шин 0,4 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ получают питание с помощью двух шинопроводов основное оборудование (потребители) на номинальном напряжении 0,38/0,22 кВ.

Основное оборудование сварочного цеха – новое и современное, оно включает в себя следующие устройства и механизмы, необходимые для выполнения различных задач по сварке и сборке металлических конструкций и компонентов подвижного состава [11]:

- сварочные аппараты для ручной дуговой сварки: используются для сварки металлов с помощью покрытых электродов. Данные

- устройства позволяют выполнять качественные сварочные швы на различных металлах, включая углеродистые и низколегированные стали. Сварочные аппараты обеспечивают высокую прочность соединений и часто применяются для сварки толстых металлов;
- полуавтоматические сварочные аппараты: применяются для сварки металлов в защитной среде газа (аргон или углекислый газ), что позволяет получать высококачественные сварные швы. Такие аппараты широко используются для сварки листового металла и деталей, требующих высокой производительности и качества;
 - аппараты для аргонодуговой сварки;
 - плазменные резаки: используются для резки металлических листов и труб. Данные устройства позволяют производить точную и чистую резку металлов различной толщины с минимальными деформациями, что важно для подготовки деталей к сварке;
 - роботизированные сварочные комплексы: это – системы автоматизированной сварки, оснащенные промышленными роботами, обеспечивают высокую точность и повторяемость сварных соединений. Такие устройства используются для сварки больших объемов продукции и позволяют значительно повысить производительность труда;
 - технологические столы и сварочные станды: специальные рабочие поверхности, оснащенные зажимами и фиксаторами для удержания сварочных заготовок. Сварочные столы и станды обеспечивают удобство работы и позволяют производить точную сборку и фиксацию деталей перед сваркой;
 - системы вентиляции и удаления дыма: необходимы для обеспечения безопасности и комфорта работы в цеху. Данные технологические системы удаляют сварочный дым, газы и другие вредные вещества, образующиеся в процессе сварки, обеспечивая чистоту воздуха в рабочей зоне;

- контактные сварочные аппараты: используются для точечной и шовной сварки листовых металлических конструкций. Такое оборудование позволяет производить высокопрочные соединения без необходимости в использовании дополнительных материалов (электродов или проволоки);
- оборудование для сварки трением: применяется для сварки сложных деталей и узлов, особенно в тех случаях, когда требуется высокая точность и прочность соединений. Метод сварки трением используется для соединения алюминиевых и медных деталей, а также материалов с различными физико-механическими свойствами;
- пескоструйные аппараты и камеры: оборудование для очистки поверхности металлов перед сваркой. Пескоструйные аппараты используются для удаления ржавчины, окалины и загрязнений, что повышает качество сварных соединений и долговечность готовой продукции;
- термические печи для подогрева и отпуска сварных конструкций: оборудование, используемое для термической обработки сварных изделий. Подогрев перед сваркой и отпуск после сварки позволяют улучшить структуру металла и снизить остаточные напряжения, повышая прочность и долговечность сварных конструкций;
- оборудование для ультразвукового контроля сварных швов: к ним относятся системы неразрушающего контроля, предназначенные для проверки качества сварных соединений. Ультразвуковой контроль позволяет выявлять дефекты внутри сварных швов, такие как поры, трещины или включения, обеспечивая высокое качество продукции;
- системы лазерной сварки и резки: используются для высокоточной сварки и резки металлических деталей с минимальными деформациями. Лазерная сварка обеспечивает высокую скорость и качество соединений, особенно при работе с тонкими и сложными по профилю деталями.

Такое разнообразие оборудования позволяет сварочному цеху ОАО «Демиховский машиностроительный завод» выполнять широкий спектр производственных задач, обеспечивая высокое качество сварных соединений и сборочных операций при производстве и ремонте подвижного состава.

Всё перечисленное оборудование сварочного цеха – новое и современное.

Кроме того, в качестве новейшего оборудования, необходимого для расширения производственных задач, в сварочном цеху планируется установить:

- аддитивные сварочные комплексы, позволяющие создавать металлические конструкции методом наплавки. Аддитивная сварка используется для восстановления изношенных деталей, а также для изготовления сложных геометрических форм, что значительно сокращает время и затраты на производство;
- установки для микросварки и пайки, необходимое для выполнения точечных и микросварочных операций на миниатюрных деталях и электронных компонентах. Данные установки используются для высокоточной сборки и ремонта мелких металлических изделий и компонентов.

Такие современные решения позволят существенно улучшить производительность сварочного цеха, обеспечивая высокое качество сварных соединений, оптимизацию производственных процессов и сокращение затрат.

Данные аспекты также обуславливают актуальность и практическую ценность работы.

Исходные данные основных потребителей сварочного цеха, включая новые потребители, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные основных потребителей сварочного цеха ОАО «Демиховский машиностроительный завод», включая новые потребители, обусловленные технологическим процессом

Наименование потребителя	Номер потребителя по плану	Максимальная мощность потребителя, $P_{м.}$, кВт	Категория надёжности
Существующая нагрузка 0,38/0,22 кВ			
СШ1-0,38/0,22 кВ			
Сварочный аппарат ручной дуговой сварки №1	1	15,0	2
Насос ёмкости дренажной	2	11,0	2
Роботизированный сварочный комплекс №1	3	55,0	2
Полуавтоматический сварочный аппарат №1	4	25,0	2
Полуавтоматический сварочный аппарат №2	5	25,0	2
Роботизированный сварочный комплекс №2	6	65,0	1
Роботизированный сварочный комплекс №3	7	66,0	2
Термическая печь для подогрева и отпуски сварных конструкций	8	230,0	2
Сварочный пост для аргонодуговой сварки №1	9	3,0	1
Сварочный стенд №1	10	2,2	1
Система вентиляции и удаления дыма №1	11	0,25	1
Система вентиляции и удаления дыма №2	12	0,25	1
Оборудование для ультразвукового контроля сварных швов	13	1,1	1
Сварочный пост для аргонодуговой сварки №2	14	3,0	1
Контактный сварочный аппарат №1	15	11,0	1
Контактный сварочный аппарат №2	16	11,0	1
Технологический сварочный стол №1	17	7,5	1
Сварочный аппарат ручной дуговой сварки №2	18	15,0	2
Щит аварийного освещения ЩАО	19	0,69	2
Питание запорной арматуры	20	6,4	2
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №1	21	16,0	2
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №2	22	16,0	2
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №3	23	31,0	2
Полуавтоматический сварочный аппарат №3	24	26,3	2
Всего по СШ-1-0,38/0,22 кВ	-	642,69	1,2
СШ2-0,38/0,22 кВ			
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №4	25	43,3	2
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №5	26	32,6	2
Электродвигатель насоса ёмкости дренажной	27	1,5	1
Насос производственных стоков №1	28	30,0	2
Система лазерной сварки и резки №1	29	26,3	2
Сварочный аппарат ручной дуговой сварки №3	30	15,0	2
Технологический сварочный стол №2	31	5,6	2

Продолжение таблицы 1

Наименование потребителя	Номер потребителя по плану	Максимальная мощность потребителя, $P_{м.}$, кВт	Категория надёжности
Насос технической воды №1	32	10,0	2
Насос технической воды №2	33	10,0	2
Насос технической воды №3	34	10,0	2
Сварочный стенд №2	35	6,9	2
Система лазерной сварки и резки №2	36	34,2	2
Компрессор воздушный производственный №1	37	66,0	1
Компрессор воздушный производственный №2	38	65,0	2
Пескоструйный аппарат и камера	39	25,0	2
Плазменный резак	40	55,0	1
Контактный сварочный аппарат №3	41	11,0	
Контактный сварочный аппарат №4	42	11,0	1
Система вентиляции и удаления дыма №3	43	0,25	1
Система вентиляции и удаления дыма №4	44	0,25	1
Оборудование для сварки трением	45	2,2	1
Всего по СШ-2-0,38/0,22 кВ	-	461,1	1,2
Всего существующей нагрузки 0,38/0,22	-	1103,79	1,2
Перспективная нагрузка 0,38/0,22 кВ			
Аддитивный сварочный комплекс №1	46	11,0	2
Аддитивный сварочный комплекс №2	47	11,0	2
Аддитивный сварочный комплекс №3	48	11,0	2
Аддитивный сварочный комплекс №4	49	11,0	2
Аддитивный сварочный комплекс №5	50	11,0	2
Аддитивный сварочный комплекс №6	51	11,0	2
Аддитивный сварочный комплекс №7	52	11,0	2
Аддитивный сварочный комплекс №8	53	11,0	2
Аддитивный сварочный комплекс №9	54	11,0	2
Установка для микросварки и пайки №1	55	3,0	2
Установка для микросварки и пайки №2	56	3,0	2
Установка для микросварки и пайки №3	57	3,0	2
Всего перспективной нагрузки 0,38/0,22 кВ	58	108,0	2
Всего нагрузки по сварочному цеху	-	1211,79	1,2

Анализ исходных данных потребителей реконструируемой системы электроснабжения сварочного цеха ОАО «Демиховский машиностроительный завод» показал, что новыми потребителями на объекте выступают аддитивные сварочные комплексы в количестве 9 единиц, каждый из которых потребляет 11 кВт, и установки для микросварки и пайки в количестве 3 единиц с потреблением по 3 кВт каждая. Таким образом

установлено, что суммарная установленная мощность перспективной нагрузки сварочного цеха составляет 108 кВт.

Определено, что нагрузка второй секции сборных шин 0,38/0,22 кВ на ТП-10/0,4 кВ реконструируемой системы электроснабжения сварочного цеха на 181,59 кВт меньше нагрузки первой секции сборных шин того же уровня напряжения на подстанции. В связи с этим, предложено подключить перспективную нагрузку ко второй секции сборных шин данной подстанции, чтобы выровнять распределение нагрузки на секциях сборных шин 0,38/0,22 кВ цеховой подстанции.

С учётом предложенного распределения, суммарная нагрузка секций сборных шин 0,38/0,22 кВ на цеховой ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха будет распределена следующим образом:

- первая секция (СШ-1) 0,38/0,22 кВ останется без изменений и составит 642,69 кВт;
- вторая секция (СШ-2) 0,38/0,22 кВ будет включать перспективную нагрузку, и её суммарная мощность составит 569,1 кВт (461,1 кВт текущей нагрузки плюс 108 кВт перспективной нагрузки).

Таким образом, с учётом подключаемой перспективной нагрузки, общая установленная мощность системы электроснабжения сварочного цеха после реконструкции составит 1211,79 кВт.

Выводы по разделу.

В результате проведения анализа существующей системы электроснабжения сварочного цеха машиностроительного завода, установлено следующее:

- рассматриваемый в работе сварочный цех ОАО «Демиховский машиностроительный завод» является важнейшим производственным участком с современным оборудованием, включающем 45 позиций основного технологического оборудования;
- определено, что сварочный цех получает питание от цеховой ТП-10/0,4 кВ, на которой установлены два силовых трансформатора

сухого типа марки ТСЗ-1000/10/0,4, питающих две секции сборных шин 0,38/0,22 кВ на низком напряжении. Оба трансформатора находятся в работе;

- определено, что используемая на ТП-10/0,4 кВ схема «Одна, секционированная выключателем, система сборных шин» на данной подстанции является надёжной, экономичной, обеспечивая необходимый уровень резервирования для потребителей 1 и 2 категорий надёжности, получающих от неё питание. Таким образом, необходимости в применении кардинально нового типа схемы нет;
- установлено, что все аппараты напряжением 10 кВ и 0,38/0,22 кВ, используемые на подстанции – новые и современные, следовательно, они не нуждаются в замене.

Анализ исходных данных потребителей реконструируемой системы электроснабжения сварочного цеха ОАО «Демиховский машиностроительный завод» показал, что новыми потребителями на объекте выступают аддитивные сварочные комплексы в количестве 9 единиц, каждый из которых потребляет 11 кВт, и установки для микросварки и пайки в количестве 3 единиц с потреблением по 3 кВт каждая.

Таким образом установлено, что суммарная установленная мощность перспективной нагрузки сварочного цеха составляет 108 кВт.

Определено, что нагрузка второй секции сборных шин 0,38/0,22 кВ на ТП-10/0,4 кВ реконструируемой системы электроснабжения сварочного цеха на 181,59 кВт меньше нагрузки первой секции сборных шин того же уровня напряжения на подстанции. В связи с этим, предложено подключить перспективную нагрузку ко второй секции сборных шин данной подстанции, чтобы выровнять распределение нагрузки на секциях сборных шин 0,38/0,22 кВ цеховой подстанции 10/0,4 кВ.

С учётом предложенного распределения, суммарная нагрузка секций сборных шин 0,38/0,22 кВ на цеховой ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха будет распределена следующим образом:

- первая секция (СШ-1) 0,38/0,22 кВ останется без изменений и составит 642,69 кВт;
- вторая секция (СШ-2) 0,38/0,22 кВ будет включать перспективную нагрузку, и её суммарная мощность составит 569,1 кВт (461,1 кВт текущей нагрузки плюс 108 кВт перспективной нагрузки).

Следовательно, с учётом подключаемой перспективной нагрузки, общая установленная мощность системы электроснабжения сварочного цеха после реконструкции составит 1211,79 кВт.

Таким образом, сделан вывод, что реконструкция системы электроснабжения сварочного цеха машиностроительного завода заключается в подключении новых потребителей ко второй существующей секции сборных шин 0,38/0,22 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ. Установлено, что данный факт приведёт к изменению схемы электрических соединений объекта исследования, а, следовательно – к её реконструкции. Следовательно, поставленная основная цель работы, обоснована.

Также в работе предложено провести реконструкцию схемы и устройств релейной защиты и автоматики путём выбора новых конструктивных и схемных решений.

2 Расчет электрических нагрузок цеха

Для предприятий машиностроительной отрасли, таких как ОАО «Демиховский машиностроительный завод», точный и обоснованный расчёт электрических нагрузок имеет важнейшее значение.

Известно, что данный завод специализируется на производстве сложного машиностроительного оборудования, подвижного состава и других металлических конструкций, требующих высоких энергетических затрат.

В этом контексте расчет электрических нагрузок позволяет оптимизировать распределение энергии внутри цехов, обеспечить надежную и бесперебойную работу оборудования, а также снизить операционные издержки за счёт эффективного управления энергоресурсами.

Актуальность расчета электрических нагрузок обусловлена также необходимостью соблюдения современных стандартов электробезопасности и энергосбережения.

При внедрении новых технологий и модернизации существующих систем электроснабжения необходимо учитывать не только «текущие потребности в энергии, но и перспективные изменения, связанные с ростом производственных мощностей и расширением ассортимента выпускаемой продукции.

Решение данного вопроса требует проведения всестороннего анализа текущих и прогнозируемых нагрузок, а также разработки комплексных решений» [14] по управлению ними.

Кроме того, расчёт электрических нагрузок способствует улучшению эксплуатационных характеристик систем электроснабжения.

На основе этих данных могут быть приняты решения о выборе оптимальных параметров электротехнического оборудования и обеспечить высокую надёжность работы предприятия.

Энергетическая безопасность и эффективность производства являются одними из ключевых приоритетов для ОАО «Демиховский машиностроительный завод».

Поэтому проведение расчёта электрических нагрузок позволяет предприятию гибко реагировать на изменения в технологических процессах, адаптировать систему электроснабжения к новым условиям и обеспечивать устойчивую работу всех подразделений.

Таким образом, данный процесс является неотъемлемой частью стратегического планирования и управления ресурсами предприятия, что способствует его устойчивому развитию и конкурентоспособности на рынке.

В работе проводится расчёт электрических нагрузок присоединений потребителей реконструируемой системы электроснабжения сварочного цеха.

На данном этапе необходимо определить расчётные значения активной, реактивной и полной нагрузок для каждого отдельного присоединения потребителей (включая новые присоединения перспективной нагрузки).

Расчётная активная нагрузка потребителей системы электроснабжения сварочного цеха [8]:

$$P_p = P_m, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где P_m – максимальная мощность потребителя системы электроснабжения сварочного цеха, кВт (таблица 1).

«Расчётная реактивная нагрузка» [8] потребителей системы электроснабжения сварочного цеха:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

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

«Расчётная полная нагрузка» [8] потребителей системы электроснабжения сварочного цеха:

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

«Расчётный ток нормального режима» потребителей системы электроснабжения сварочного цеха [8]:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.}}, \quad (4)$$

где S_{np} – полная мощность присоединения потребителя цеха, кВА;

$U_{ном.}$ – номинальное напряжение присоединения, кВ.

Расчёт нагрузок потребителей системы электроснабжения сварочного цеха проводится на примере первого присоединения СШ-1 0,38/0,22 кВ (сварочный аппарат ручной дуговой сварки №1) по условиям (1) – (4):

$$P_p = 15 \text{ кВт.}$$

$$Q_p = 15 \cdot 0,4 = 6,0 \text{ квар.}$$

$$S_{np} = \sqrt{15^2 + 6^2} = 16,2 \text{ кВА.}$$

$$I_p = \frac{16,2}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 24,6 \text{ А.}$$

«Суммарная расчётная нагрузка секций сборных шин 0,38/0,22 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха» [8]:

$$P_{\Sigma} = K_0 \sum_{i=1}^n P_{np}, \quad (5)$$

$$Q_{\Sigma} = K_0 \sum_{i=1}^n Q_{np}, \quad (6)$$

где « K_0 – коэффициент одновременности» [8].

$$\sum_{i=1}^n P_{np} - \text{«суммарная активная нагрузка присоединений, кВт» [8];}$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{np} - \text{«суммарная реактивная нагрузка присоединений, квар» [8].}$$

«Значение полной расчётной нагрузки секций сборных шин 0,38/0,22 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха» [8]:

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

«Значение расчётного рабочего тока нормального режима секций сборных шин 0,38/0,22 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха» [8]:

$$I_{\Sigma} = \frac{S_{\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.}}. \quad (8)$$

При выполнении расчётов учитывается, что новая нагрузка будет подключена к системе сборных шин цеховой подстанции 10/0,4 кВ СШ-2 0,38/0,22 кВ.

Наличие данного фактора позволит сбалансировать нагрузку в системе электроснабжения сварочного цеха.

Итоговые результаты расчёта электрических нагрузок системы электроснабжения сварочного цеха приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Итоговые результаты расчёта электрических нагрузок системы электроснабжения сварочного цеха

Наименование потребителя	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , А
СШ1-0,38/0,22 кВ				
Сварочный аппарат ручной дуговой сварки №1	15,0	6	16,2	24,6
Насос ёмкости дренажной	11,0	4,4	11,8	18,0
Роботизированный сварочный комплекс №1	55,0	22	59,2	90,0
Полуавтоматический сварочный аппарат №1	25,0	10	26,9	40,9
Полуавтоматический сварочный аппарат №2	25,0	10	26,9	40,9
Роботизированный сварочный комплекс №2	65,0	26	70,0	106,4
Роботизированный сварочный комплекс №3	66,0	26,4	71,1	108,0
Термическая печь для подогрева и отпуска сварных конструкций	230,0	92	247,7	376,5
Сварочный пост для аргонодуговой сварки №1	3,0	1,2	3,2	4,9
Сварочный стенд №1	2,2	0,88	2,4	3,6
Система вентиляции и удаления дыма №1	0,25	0,1	0,3	0,4
Система вентиляции и удаления дыма №2	0,25	0,1	0,3	0,4
Оборудование для ультразвукового контроля сварных швов	1,1	0,44	1,2	1,8
Сварочный пост для аргонодуговой сварки №2	3,0	1,2	3,2	4,9
Контактный сварочный аппарат №1	11,0	4,4	11,8	18,0
Контактный сварочный аппарат №2	11,0	4,4	11,8	18,0
Технологический сварочный стол №1	7,5	3	8,1	12,3
Сварочный аппарат ручной дуговой сварки №2	15,0	6	16,2	24,6
Щит аварийного освещения ЩАО	0,69	0,276	0,7	1,1
Питание запорной арматуры	6,4	2,56	6,9	10,5
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №1	16,0	6,4	17,2	26,2
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №2	16,0	6,4	17,2	26,2
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №3	31,0	12,4	33,4	50,7
Полуавтоматический сварочный аппарат №3	26,3	10,52	28,3	43,0
Всего по СШ1-0,38/0,22 кВ ($K_0 = 0,8$)	514,2	205,7	553,8	841,6
СШ2-0,38/0,22 кВ				
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №4	43,3	17,3	46,6	70,9
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №5	32,6	13,0	35,1	53,4
Электродвигатель насоса ёмкости дренажной	1,5	0,6	1,6	2,5
Насос производственных стоков №1	30,0	12,0	32,3	49,1
Система лазерной сварки и резки №1	26,3	10,52	28,3	43,0
Сварочный аппарат ручной дуговой сварки №3	15,0	6,0	16,2	24,6
Технологический сварочный стол №2	5,6	2,2	6,0	9,2
Насос технической воды №1	10,0	4,0	10,8	16,4
Насос технической воды №2	10,0	4	10,8	16,4
Насос технической воды №3	10,0	4	10,8	16,4
Сварочный стенд №2	6,9	2,76	7,4	11,3
Система лазерной сварки и резки №2	34,2	13,68	36,8	56,0
Компрессор воздушный производственный №1	66,0	26,4	71,1	108,0
Компрессор воздушный производственный №2	65,0	26,0	70,0	106,4

Продолжение таблицы 2

Наименование потребителя	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , А
Пескоструйный аппарат и камера	25,0	10,0	26,9	40,9
Плазменный резак	55,0	22,0	59,2	90,0
Контактный сварочный аппарат №3	11,0	4,4	11,8	18,0
Контактный сварочный аппарат №4	11,0	4,4	11,8	18,0
Система вентиляции и удаления дыма №3	0,25	0,1	0,3	0,4
Система вентиляции и удаления дыма №4	0,25	0,1	0,3	0,4
Оборудование для сварки трением	2,2	0,9	2,4	3,6
Аддитивный сварочный комплекс №1	11,0	4,4	11,8	18,0
Аддитивный сварочный комплекс №2	11,0	4,4	11,8	18,0
Аддитивный сварочный комплекс №3	11,0	4,4	11,8	18,0
Аддитивный сварочный комплекс №4	11,0	4,4	11,8	18,0
Аддитивный сварочный комплекс №5	11,0	4,4	11,8	18,0
Аддитивный сварочный комплекс №6	11,0	4,4	11,8	18,0
Аддитивный сварочный комплекс №7	11,0	4,4	11,8	18,0
Аддитивный сварочный комплекс №8	11,0	4,4	11,8	18,0
Аддитивный сварочный комплекс №9	11,0	4,4	11,8	18,0
Установка для микросварки и пайки №1	3,0	1,2	3,2	4,9
Установка для микросварки и пайки №2	3,0	1,2	3,2	4,9
Установка для микросварки и пайки №3	3,0	1,2	3,2	4,9
Всего по СШ-2-0,4 кВ ($K_o = 0,8$)	455,3	182,1	490,4	745,2
Всего нагрузки по ТП-10/0,4 кВ	969,5	387,8	1044,2	1586,9

Полученные результаты используются в работе далее.

Выводы по разделу.

По итогам расчёта электрических нагрузок для отдельных присоединений потребителей и секций сборных шин 0,38/0,22 кВ системы электроснабжения сварочного цеха, были определены ключевые результаты, которые используются в работе при выборе оборудования.

3 Выбор и расчёт числа и мощности трансформаторов

Ранее в результате анализа исходных данных объекта исследования было установлено, что в системе электроснабжения сварочного цеха используются два силовых трансформатора сухого типа марки ТСЗ-1000/10/0,4. Они обеспечивают непосредственное питание двух секций сборных шин с низким напряжением 0,38/0,22 кВ. В связи с реконструкцией системы электроснабжения, вызванной подключением новой нагрузки к второй секции сборных шин СШ-2 0,38/0,22 кВ питающей подстанции ТП-10/0,4 кВ, наблюдается увеличение её нагрузки. Поэтому, учитывая эти изменения, далее в работе необходимо провести проверку соответствия силовых трансформаторов подстанции возросшей нагрузке.

«Мощность силовых трансформаторов цеховой ТП-10/0,4 кВ определяется с учётом её загрузки активной мощностью» [16]:

$$S_{ном.Т} \geq \frac{P_p}{2 \cdot \beta_m}, \quad (9)$$

где « $\beta_m=0,8$ (для питания потребителей преимущественно II категории надёжности)» [16].

Предварительная проверка трансформаторов цеховой ТП-10/0,4 кВ по номинальной мощности выполняется:

$$1000 \text{ кВА} \geq \frac{969,5}{2 \cdot 0,8} = 605,9 \text{ кВА}.$$

Далее выполняются проверки выбранного типа трансформатора, основное внимание в которых уделяется его перегрузочной способности.

Проверка перегрузочной способности трансформаторов подстанции является ключевым элементом их эксплуатации и гарантии надёжности.

Указанный процесс направлен на оценку того, насколько силовой трансформатор способен выдерживать нагрузки, превышающие его номинальные параметры в послеаварийном режиме работы, без ухудшения своих эксплуатационных характеристик и без риска повреждений.

Установлено, что в процессе работы силовые трансформаторы подстанций подвергаются значительным электрическим и тепловым нагрузкам, что может привести к повреждениям обмоток и других критически важных компонентов. Регулярное проведение таких проверок необходимо для обеспечения надёжной и безопасной работы системы электроснабжения сварочного цеха, а также минимизации рисков аварий и продления срока службы оборудования.

Загрузка каждого трансформатора в нормальном режиме [4]:

$$K_3^n = \frac{0,5 \cdot S_p}{S_{ном.т}} \leq 0,8. \quad (10)$$

«Условия данной проверки выполняются» [4]:

$$K_3^n = \frac{1044,2}{1000 \cdot 2} = 0,52 \leq 0,8.$$

«Проверка в максимальном режиме работы цеховой ТП-10/0,4 кВ» [4]:

$$K_3^{n.ав} = \frac{S_p}{S_{ном.т}} \leq 1,6. \quad (11)$$

«Условия этой проверки также выполняются» [4]:

$$K_3^{n.ав} = \frac{1044,2}{1000} = 1,044 \leq 1,6.$$

Таким образом, исходя из полученного результата установлено, что для системы электроснабжения сварочного цеха два силовых трансформатора сухого типа марки ТСЗ-1000/10/0,4 подходят для питания нагрузки потребителей (с учётом ввода в эксплуатацию новой нагрузки).

Выводы по разделу.

На основании проведённого анализа установлено, что два силовых трансформатора сухого типа марки ТСЗ-1000/10/0,4, используемые в системе электроснабжения сварочного цеха до реконструкции схемы, подходят для питания существующей и вновь вводимой нагрузки.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что использование силовых трансформаторов сухого типа ТСЗ-1000/10/0,4 является оптимальным решением для реконструируемой системы электроснабжения.

Применение этих трансформаторов способствует повышению общей надёжности и эффективности электроснабжения объекта, особенно в условиях подключения новых потребителей.

4 Расчет токов короткого замыкания

Расчёт токов короткого замыкания в системе электроснабжения сварочного цеха является одной из ключевых задач при проектировании и эксплуатации энергетических систем промышленных предприятий. Актуальность данного расчёта обусловлена необходимостью обеспечения надёжной и безопасной работы электросетей, особенно в условиях повышенной нагрузки и потенциальных рисков возникновения аварийных ситуаций.

Сварочный цех, как энергозатратное подразделение машиностроительного завода, предъявляет особые требования к качеству электроснабжения, что делает расчёт токов КЗ критически важным этапом в процессе проектирования, модернизации и реконструкции всей системы электроснабжения.

«Основной целью расчёта токов короткого замыкания (далее – КЗ) является определение максимальных значений токов, которые могут возникнуть в различных точках системы при аварийных режимах. Такой подход важен и необходим для правильного выбора оборудования и настройки защитных устройств. Результаты расчётов токов КЗ» [15] также позволяют минимизировать риск повреждения оборудования и предотвратить возможные последствия короткого замыкания, такие как перегрев кабелей, возгорание, механические разрушения и отключение электроснабжения.

Кроме того, расчёт токов короткого замыкания играет важную роль в обеспечении электробезопасности персонала, обслуживающего систему электроснабжения.

Определение величин токов короткого замыкания позволяет подобрать соответствующие средства защиты и разработать меры предосторожности, направленные на предотвращение травматизма и ущерба здоровью работников в случае аварийных ситуаций.

В условиях современного производства, где безопасность труда и надёжность оборудования являются приоритетными задачами, данная мера приобретает особое значение.

Также расчёт токов короткого замыкания способствует оптимизации экономических затрат на эксплуатацию системы электроснабжения.

Правильный выбор оборудования, рассчитанного на возможные максимальные токи КЗ, в полной мере позволяет снизить издержки на ремонт и замену повреждённых компонентов, а также увеличить срок службы электротехнических устройств.

В условиях растущей конкуренции и необходимости повышения энергоэффективности промышленных процессов, данный фактор является важным фактором для обеспечения устойчивого развития предприятия.

Следовательно, проведение расчётов токов короткого замыкания в системе электроснабжения сварочного цеха не только обеспечивает надёжность и безопасность работы, но и способствует оптимизации производственных процессов, снижению затрат и увеличению эффективности использования энергетических ресурсов.

Таким образом, этот процесс является неотъемлемой частью комплексного подхода к управлению и развитию энергетических систем на промышленных предприятиях.

«На первом этапе необходимо составить расчётную схему электрической сети для расчёта токов КЗ.

На ней определяются основные расчётные точки КЗ, в которых требуется провести расчёт максимального тока КЗ в послеаварийном режиме (питание цеховой ТП-10/0,4 кВ при этом будет осуществляться по одной линии 10 кВ от заводской ГПП-110/10 кВ).

Схема для расчёта токов КЗ на выводах трансформатора цеховой ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения сварочного цеха» [15] приведена в работе на рисунке 2.

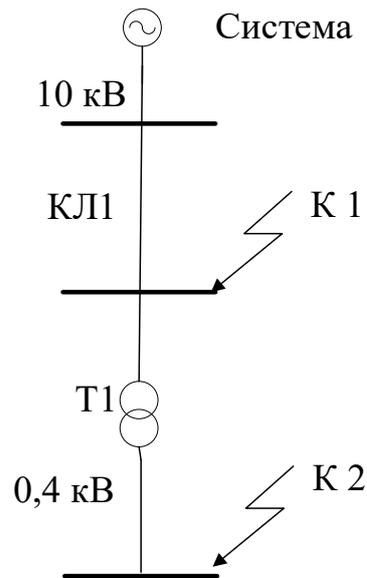


Рисунок 2 – Схема для расчёта токов КЗ на выводах трансформатора цеховой ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения сварочного цеха

«Эквивалентная схема замещения для расчёта токов КЗ на выводах трансформатора цеховой ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения сварочного цеха» [15] представлена на рисунке 3.

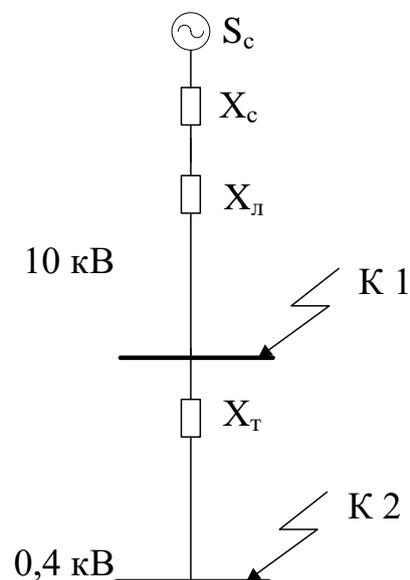


Рисунок 3 – Эквивалентная схема замещения для расчёта токов КЗ на выводах трансформатора цеховой ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения сварочного цеха

Рассчитываются параметры схемы замещения.

«Базисные условия» [15]:

$$\begin{aligned}S_{\bar{o}} &= S_c = 1000 \text{ МВА}, \\U_{\bar{o}} &= 10,5 \text{ кВ}, \\I_{\bar{o}} &= \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{o}}}, \text{ кА}, \\I_{\bar{o}} &= \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55 \text{ кА}.\end{aligned}\tag{12}$$

«Сопротивления схемы замещения» [15]:

$$x_c = \frac{S_{\bar{o}}}{S_c}.\tag{13}$$

$$x_c = 1.$$

$$r_c = \frac{x_c}{50},\tag{14}$$

$$r_c = \frac{1}{50} = 0,02.$$

«Сопротивления питающей кабельной линии 10 кВ» [15]:

$$x_n = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2},\tag{15}$$

$$x_n = 0,08 \cdot 2 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 1,45,$$

$$r_n = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2},\tag{16}$$

$$r_n = 0,043 \cdot 2 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 8,04.$$

«Активное сопротивление трансформатора цеховой ТП-10/0,4 кВ» [15]:

$$r_m = \frac{\Delta P_{\kappa} \cdot U_n^2}{S_{\text{ном.т.}}^2}, \quad (17)$$

где ΔP_{κ} - «потери короткого замыкания силового трансформатора (справочные данные), кВт» [15];

$S_{\text{ном.т.}}$ - «номинальная (паспортная) мощность силового трансформатора, принятого для установки на цеховой ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения» [15] сварочного цеха, кВА.

$$r_m = \frac{20000 \cdot 10^2}{1000^2} = 2.$$

«Индуктивное сопротивление трансформатора» [15]:

$$x_m = \frac{U_{\kappa} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{\text{ном.т.}}^2}, \quad (18)$$

где U_{κ} - напряжение короткого замыкания силового трансформатора (справочные данные), %.

$$x_m = \frac{6,5 \cdot 10^2}{100 \cdot 1000^2} = 0,065.$$

«Суммарное полное сопротивление трансформатора» [15]:

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}, \quad (19)$$

$$Z_m = \sqrt{2^2 + 0,065^2} \approx 2,00.$$

«Суммарные сопротивления к точке К1» [15]:

$$x_{\Sigma} = x_c + x_n, \quad (20)$$

$$x_{\Sigma} = 1 + 1,45 = 2,45,$$

$$r_{\Sigma} = r_c + r_n, \quad (21)$$

$$r_{\Sigma} = 0,02 + 8,04 = 8,06,$$

$$z = \sqrt{x_{\Sigma}^2 - r_{\Sigma}^2}, \quad (22)$$

$$z = \sqrt{2,45^2 - 8,06^2} = 8,42.$$

«Ток КЗ в точке К1» [15]:

$$I_{\Pi 1}^{(3)} = \frac{I_6}{z}, \text{ кА}, \quad (23)$$

$$I_{\Pi 1}^{(3)} = \frac{55}{8,42} = 6,5 \text{ кА}.$$

«Ударный ток КЗ в точке К1» [15]:

$$i_{y\partial K1} = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi 1}^{(3)} \cdot K_y, \text{ кА}, \quad (24)$$

где « K_y – ударный коэффициент» [15].

«Так как на шинах питающей энергосистемы $\beta'' = 1$, поэтому» [15]:

$$I_{\infty} = I'' = I_n. \quad (25)$$

«Следовательно, ударный коэффициент можно принять равным единице» [15]:

$$i_{y\partial K1} = \sqrt{2} \cdot 6,5 \cdot 1 = 9,2 \text{ кА}.$$

«Суммарные сопротивления к точке К2» [15]:

$$x_{\Sigma} = x_c + x_n + x_m, \quad (26)$$

$$x_{\Sigma} = 1 + 1,45 + 0,065 \approx 2,52,$$

$$r_{\Sigma} = r_c + r_n + r_m, \quad (27)$$

$$r_{\Sigma} = 0,02 + 8,04 + 2 = 10,06,$$

$$z = \sqrt{x_{\Sigma}^2 - r_{\Sigma}^2}, \quad (28)$$

$$z = \sqrt{2,52^2 + 10,06^2} = 10,37.$$

«Ток КЗ в точке К2» [15]:

$$I_{II2}^{(3)} = \frac{I_{\sigma}}{z}, \text{ кА}, \quad (29)$$

$$I_{II2}^{(3)} = \frac{55}{10,37} = 5,3 \text{ кА}.$$

«Ударный ток КЗ в точке К2» [15]:

$$i_{y\partial K2} = \sqrt{2} \cdot I_{II2}^{(3)} \cdot K_y, \text{ кА}, \quad (30)$$

где « K_y – ударный коэффициент» [15].

«Так как на шинах питающей энергосистемы $\beta'' = 1$ » [15]:

$$I_{\infty} = I'' = I_n. \quad (31)$$

«Ударный коэффициент можно принять равным единице» [15]:

$$i_{y\partial K2} = \sqrt{2} \cdot 5,3 \cdot 1 = 7,5 \text{ кА}.$$

Результаты расчётов токов КЗ на выводах трансформатора цеховой ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения сварочного цеха представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчётов токов КЗ на выводах трансформатора цеховой ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения сварочного цеха

Параметр	Числовое значение параметра, кА	
	Точка К1	Точка К2
$I_{Pi}^{(3)}$	6,5	5,3
$i_{уд.К}$	9,2	7,5

Полученные результаты токов КЗ на выводах трансформатора цеховой ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения сварочного цеха будут использованы в работе далее.

Выводы по разделу.

В результате проведения расчёта токов короткого замыкания в системе электроснабжения сварочного цеха, получены основные результаты, которые применяются в работе при проверке оборудования на объекте реконструкции.

5 Выбор и расчёт электрических аппаратов и проводников

5.1 Выбор сечения проводников системы электроснабжения сварочного цеха

Известно, что для электроснабжения объектов, относящихся к взрывоопасным и пожароопасным категориям, рекомендуется использование только скрытую прокладку изолированных проводников с двойной изоляцией [14].

В связи с этим, в работе рекомендуется применить скрытую прокладку проводников для питания подстанции ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха на напряжении 10 кВ, а также для её потребителей на напряжении 0,38/0,22 кВ. Такой подход обеспечивает дополнительную защиту, повышает надёжность и уровень электробезопасности.

С учётом вышеуказанных требований, для передачи электроэнергии в системе электроснабжения сварочного цеха выбираются соответствующие кабельные линии.

В условиях наличия взрывоопасных и пожароопасных материалов в сварочном цехе, рекомендуется использовать в качестве питающей кабельной линии, кабели с пониженным дымо- и газовыделением, марки АПвКВнг(А)-LS [5].

Проводится проверка кабельной линии 10 кВ, состоящей из двух силовых кабелей марки АПвКВнг(А)-LS 3×35/16, которые использовались для питания ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха до реконструкции.

«По экономической плотности тока» [7]:

$$F_3 = \frac{I_p}{j_3}, \quad (32)$$

где I_p - значение расчётного тока кабельной линии в нормальном режиме на стороне 10 кВ;

« $j_э$ – экономическая плотность тока, А/мм²» [14].

«Значение расчётного тока кабельной линии в нормальном режиме на стороне 10 кВ принимается равным току на стороне ТП-10/0,4 кВ» [14]:

$$I_{p.} = \frac{S_{ном.т}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.}}, \quad (33)$$

где $S_{ном.т}$ - номинальная мощность трансформатора ТП-10/0,4 кВ, кВА.

Для питающего кабеля 10 кВ сварочного цеха:

$$I_{p.} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 57,7 \text{ А.}$$

Сечение питающего кабеля 10 кВ сварочного цеха:

$$F_э = \frac{57,7}{1,4} = 41,2 \text{ мм}^2.$$

«Проверка выбранного сечения кабеля в нормальном режиме» [10]:

$$I_{доп} \geq I_{p.}, \quad (34)$$

где « $I_{доп}$ – допустимый ток кабельной линии, А» [10].

«Для питающего кабеля 10 кВ сварочного цеха проверка выполнена» [14]:

$$112 \text{ А} \geq 57,7 \text{ А.}$$

«Проверка КЛ в послеаварийном режиме работы» [10]:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{p.\text{max}}, \quad (35)$$

где « $I_{p.\text{max}}$ – максимальный ток, А» [10].

Ток КЛ в послеаварийном режиме:

$$I_{p.\text{max}} = K_p \cdot I_p, \quad (36)$$

где « K_p – коэффициент резервирования (с учётом существующего резервирования для потребителей 2 категории надёжности, принимается значение $K_p = 1,4$)» [11].

Для питающего кабеля 10 кВ сварочного цеха проверка выполнена:

$$112 \text{ А} \geq 57,7 \cdot 1,4 = 80,8 \text{ А}.$$

«Проверка кабеля по механическим условиям» [10]:

$$F_{\text{ст}} \geq F_{\text{мин}}, \text{ мм}^2. \quad (37)$$

Для питающего кабеля 10 кВ проверка выполнена:

$$35 \text{ мм}^2 \geq 25 \text{ мм}^2.$$

Следовательно, применение силовых кабелей марки АПвКВнг(А)-LS 3×35/16 для питания системы электроснабжения сварочного цеха на напряжении 10 кВ, обосновано.

Выбор остальных кабельных линий системы электроснабжения сварочного цеха проведён аналогично с приведением полученных результатов в таблице 4. Для сети 0,38/0,22 кВ сварочного цеха выбираются новейшие кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена марки АПвПБШв [6].

Таблица 4 – Результаты выбора кабельных линий 10 кВ и 0,38/0,22 кВ системы электроснабжения сварочного цеха

Линия	I_p , А	Марка кабеля (скрытая прокладка в земле)	$I_{доп.}$, А
Питающая сеть 10 кВ			
Питающая КЛ-10 кВ (от ГПП) – ввод 1	57,7	АПвКВнг(А)-LS 3×35/16	112
Питающая КЛ-10 кВ (от ГПП) – ввод 2	57,7	АПвКВнг(А)-LS 3×35/16	112
Распределительная сеть 0,38/0,22 кВ			
СШ1-0,38/0,22 кВ			
Сварочный аппарат ручной дуговой сварки №1	24,6	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Насос ёмкости дренажной	18,0	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Роботизированный сварочный комплекс №1	90,0	АПвПбШв 5×16	94,0
Полуавтоматический сварочный аппарат №1	40,9	АПвПбШв 5×4	45,0
Полуавтоматический сварочный аппарат №2	40,9	АПвПбШв 5×4	45,0
Роботизированный сварочный комплекс №2	106,4	АПвПбШв 5×25	121,0
Роботизированный сварочный комплекс №3	108,0	АПвПбШв 5×25	121,0
Термическая печь для подогрева и отпуска сварных конструкций	376,5	АПвПбШв 2× (5×70)	2×212= =424
Сварочный пост для аргонодуговой сварки №1	4,9	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Сварочный стенд №1	3,6	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Система вентиляции и удаления дыма №1	0,4	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Система вентиляции и удаления дыма №2	0,4	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Оборудование для ультразвукового контроля сварных швов	1,8	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Сварочный пост для аргонодуговой сварки №2	4,9	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Контактный сварочный аппарат №1	18,0	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Контактный сварочный аппарат №2	18,0	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Технологический сварочный стол №1	12,3	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Сварочный аппарат ручной дуговой сварки №2	24,6	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Щит аварийного освещения ЩАО	1,1	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Питание запорной арматуры	10,5	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №1	26,2	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №2	26,2	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №3	50,7	АПвПбШв 5×6	54,0
Полуавтоматический сварочный аппарат №3	43,0	АПвПбШв 5×4	45,0
СШ2-0,38/0,22 кВ			
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №4	70,9	АПвПбШв 5×10	72,0
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №5	53,4	АПвПбШв 5×6	54,0
Электродвигатель насоса ёмкости дренажной	2,5	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Насос производственных стоков №1	49,1	АПвПбШв 5×6	54,0

Продолжение таблицы 4

Линия	$I_{р.}$, А	Марка кабеля (скрытая прокладка в земле)	$I_{доп.}$, А
Система лазерной сварки и резки №1	43,0	АПвПбШв 5×4	45,0
Сварочный аппарат ручной дуговой сварки №3	24,6	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Технологический сварочный стол №2	9,2	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Насос технической воды №1	16,4	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Насос технической воды №2	16,4	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Насос технической воды №3	16,4	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Сварочный стенд №2	11,3	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Система лазерной сварки и резки №2	56,0	АПвПбШв 5×10	72,0
Компрессор воздушный производственный №1	108,0	АПвПбШв 5×25	121,0
Компрессор воздушный производственный №2	106,4	АПвПбШв 5×25	121,0
Пескоструйный аппарат и камера	40,9	АПвПбШв 5×4	45,0
Плазменный резак	90,0	АПвПбШв 5×16	94,0
Контактный сварочный аппарат №3	18,0	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Контактный сварочный аппарат №4	18,0	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Система вентиляции и удаления дыма №3	0,4	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Система вентиляции и удаления дыма №4	0,4	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Оборудование для сварки трением	3,6	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Аддитивный сварочный комплекс №1	18,0	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Аддитивный сварочный комплекс №2	18,0	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Аддитивный сварочный комплекс №3	18,0	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Аддитивный сварочный комплекс №4	18,0	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Аддитивный сварочный комплекс №5	18,0	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Аддитивный сварочный комплекс №6	18,0	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Аддитивный сварочный комплекс №7	18,0	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Аддитивный сварочный комплекс №8	18,0	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Аддитивный сварочный комплекс №9	18,0	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Установка для микросварки и пайки №1	4,9	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Установка для микросварки и пайки №2	4,9	АПвПбШв 5×2,5	34,0
Установка для микросварки и пайки №3	4,9	АПвПбШв 5×2,5	34,0

Таким образом, в результате проведения выбора кабельных линий 10 кВ и 0,38/0,22 кВ в системе электроснабжения сварочного цеха, были получены следующие результаты:

- подтверждено и обосновано применение двух силовых кабелей марки АПвКВнг(А)-LS 3×35/16 для питания системы электроснабжения сварочного цеха на напряжении 10 кВ;

- в качестве проводников для питания новых потребителей, подтверждено и обосновано применение кабельных линий 0,38/0,322 кВ марки АПвПбШв 5×2,5 (12 отходящих линий);
- проверены и расчётным путём подтверждены сечения всех существующих проводников кабельных линий 0,38/0,22 кВ (кабели марки АПвПбШв разных сечений).

5.2 Выбор электрических аппаратов

Установлено, что для обеспечения надёжной и безопасной работы системы электроснабжения сварочного цеха в условиях возросшей электрической нагрузки, необходимо тщательно подойти к выбору и проверке электрических аппаратов, используемых на уровнях напряжения 10 кВ и 0,38/0,22 кВ.

Ранее было установлено, что на стороне 10 кВ подстанции установлены следующие коммутационные и защитные аппараты:

- выключатели нагрузки марки ВНА-10/630У1 в количестве 2 единиц (трёхфазный аппарат);
- плавкие предохранители марки ПКТ103-10-80-20У1 в количестве 6 единиц (однофазный аппарат).

Указанные аппараты размещены в двух ячейках марки КСО 307 цеховой ТП-10/0,4 кВ. В ходе работы необходимо проверить их соответствие расчётным параметрам электрической сети, учитывая увеличение нагрузки от новых потребителей цеха.

Дополнительно требуется провести проверку высоковольтных вакуумных выключателей марки ВБЭ-10-20/1000 УХЛ2, ограничителей перенапряжения марки ОПНп-10/11,5/10/550 УХЛ1, а также трансформаторов тока ТОЛ-СВЭЛ-10, которые установлены в ячейках 10 кВ главной понизительной подстанции (ГПП) 110/10 кВ машиностроительного завода.

Именно от этой подстанции питается цеховая трансформаторная подстанция ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха.

В работе также приводится методика выбора электрических аппаратов напряжением выше 1 кВ, которая будет применяться в системе электроснабжения сварочного цеха для обеспечения надёжности и безопасности электроснабжения.

«Выбор ЭА по номинальному напряжению и току» [9]:

$$U_{ном.а} \geq U_{ном.с}, кВ, \quad (38)$$

где « $U_{ном.а}$ – номинальное значение напряжения ЭА, кВ;

$U_{ном.с}$ – номинальное значение напряжения, кВ» [9].

$$I_{ном.а} \geq I_p, А, \quad (39)$$

где « $I_{ном.а}$ – номинальный ток ЭА;

I_p – расчётный ток сети» [9].

«Проверка ЭА на коммутационную отключающую способность» [9]:

$$I_{откл} \geq I_K, кА. \quad (40)$$

«Проверка на термическую и электродинамическую стойкость» [9]:

$$i_{дин} \geq i_y, А, \quad (41)$$

$$I_T^2 t_T \geq I_K^2 t, А^2 \cdot с. \quad (42)$$

Результаты проверки выключателей высокого напряжения марки ВБЭ-10-20/1000 УХЛ2 для установки в ячейках 10 кВ ГПП-110/10 кВ машиностроительного завода сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты проверки выключателей высокого напряжения марки ВБЭ-10-20/1000 УХЛ2 для установки в ячейках 10 кВ ГПП-110/10 кВ машиностроительного завода

Наименование и марка аппарата (модуля)	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные аппарата (модуля)
Выключатели высокого напряжения марки ВБЭ-10-20/1000 УХЛ2	$U_{\text{сети}} \leq U_{\text{ном.}}$	$U_{\text{сети}} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном.}}$	$I_{\text{max}} = 80,4 \text{ А.}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А.}$
	$I_{\text{п.т}} \leq I_{\text{отк.ном.}}$	$I_{\text{п.т}} = 6,5 \text{ кА.}$	$I_{\text{отк.ном}} = 20 \text{ кА.}$
	$i_y \leq i_{\text{дин.}}$	$i_y = 9,2 \text{ кА.}$	$i_{\text{дин.}} = 48 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$I_T^2 \cdot t_T = 9,2^2 \cdot 3 = 253,9 \text{ кА}^2\text{с.}$	$B_K = 48^2 \cdot 3 = 6912 \text{ кА}^2\text{с.}$

Выполняется выбор и проверка измерительных трансформаторов тока (ТТ). Согласно исходной схеме электрических соединений, трансформаторы тока установлены в ячейках 10 кВ на ГПП-110/10 кВ машиностроительного завода. В связи с этим осуществляется их проверка.

Результаты проверки трансформаторов тока для установки в ячейках 10 кВ ГПП-110/10 кВ машиностроительного завода приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты проверки трансформаторов тока для установки в ячейках 10 кВ ГПП-110/10 кВ машиностроительного завода

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные
Трансформаторы тока ТОЛ-СВЭЛ-10	$U_{\text{сети}} \leq U_{\text{ном.}}$	$U_{\text{сети}} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном.1}}$	$I_{\text{max}} = 80,4 \text{ А.}$	$I_{\text{ном.1}} = 200 \text{ А}$
	$S_{\text{вт.цепей}} \leq S_{\text{обм.ном}}$	$S_{\text{вт.цепей}} = 10 \text{ ВА}$	$S_{\text{обм.ном}} = 50 \text{ ВА}$
	$i_y \leq i_{\text{дин.}}$	$i_y = 9,2 \text{ кА.}$	$i_{\text{дин.}} = 20 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$I_T^2 \cdot t_T = 9,2^2 \cdot 3 = 253,9 \text{ кА}^2\text{с.}$	$B_K = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2\text{с.}$

Ограничители перенапряжения (ОПН) играют ключевую роль в защите электротехнического оборудования от перенапряжений, которые могут возникать вследствие атмосферных разрядов, таких как молнии, или при выполнении коммутационных операций.

ОПН эффективно снижают амплитуду перенапряжений до безопасного уровня, тем самым предотвращая возможные повреждения оборудования и продлевая его срок службы.

На машиностроительном заводе, где повышенные требования к надёжности и безопасности, установка ОПН в ячейках 10 кВ главной понизительной подстанции 110/10 кВ является необходимой мерой.

Данный аспект особенно важен в условиях частых грозových явлений и вероятных внутренних перенапряжений, характерных для гашения дуги с применением ранее выбранного выключателя высокого напряжения марки ВБЭ-10-20/1000 УХЛ2. Результаты проверки ограничителей перенапряжения приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты проверки ограничителей перенапряжения

Наименование и марка аппарата (модуля)	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные аппарата (модуля)
РУ-10 кВ: ОПНп-10/11,5/10/550 УХЛ1	$U_{\text{сети}} \leq U_{\text{ном}}$	$U_{\text{сети}} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}$	$I_{\text{max}} = 80,4 \text{ А.}$	$I_{\text{ном}} = 550 \text{ А}$
	$I_{\text{п.т}} \leq I_{\text{макс.проп.}}$	$I_{\text{п.т}} = 6,5 \text{ кА.}$	$I_{\text{макс.проп.}} = 11,5 \text{ кА}$
	$i_y \leq i_{\text{дин.}}$	$i_y = 9,2 \text{ кА.}$	$i_{\text{дин.}} = 10 \text{ кА.}$

Результаты проверки выключателей нагрузки по справочнику [3] для установки в распределительном устройстве РУ-10 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ машиностроительного завода изложены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты проверки выключателей нагрузки

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные
Выключатели нагрузки ВНА-10/630У1	$U_{\text{сети}} \leq U_{\text{ном}}$	$U_{\text{сети}} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}$	$I_{\text{max}} = 80,4 \text{ А.}$	$I_{\text{ном}} = 630 \text{ А.}$
	$i_y \leq i_{\text{дин.}}$	$i_y = 9,2 \text{ кА.}$	$i_{\text{дин.}} = 20 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T$	$I_T^2 \cdot t_T = 9,2^2 \cdot 3 = 253,9 \text{ кА}^2 \text{с.}$	$B_K = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \text{с.}$

Проверка предохранителей плавких, необходимых для защиты РУ-10 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ от токов короткого замыкания, сведена в таблицу 9.

Таблица 9 – Результаты проверки плавких предохранителей

Наименование аппарата	Условие выбора	Расчетные данные	Паспортные данные
Предохранители марки ПКТ103-10-80-20У1	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$.
	$1,1 - 1,5 I_{ном.т} \leq I_{ном.вст}$	$1,5 I_{ном.т} = 1,35 \times$ $\times 57,8 = 78 \text{ А}$.	$I_{ном.вст} = 80 \text{ А}$.
	$I_{ном.л} \geq I_{ном.вст}$	$I_{ном.л} = 100 \text{ А}$	$I_{ном.вст} = 80 \text{ А}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T$.	$I_T^2 \cdot t_T = 9,2^2 \cdot 3 =$ $= 253,9 \text{ кА}^2 \text{ с}$.	$B_K = 20^2 \cdot 3 =$ $= 1200 \text{ кА}^2 \text{ с}$.

Проводится выбор и проверка электрических аппаратов для коммутации и защиты электрической сети сварочного цеха на напряжении 0,38/0,22 кВ.

Ранее было установлено, что на стороне 0,38/0,22 кВ системы электроснабжения сварочного цеха установлены автоматические выключатели (вводные, секционные и линейные) марки ВА различных типонаименований, которые находятся в исправном техническом состоянии и не требуют модернизации.

С учётом реконструкции системы электроснабжения и подключения новых потребителей, связанных с технологическими потребностями цеха, возникает необходимость выбора дополнительных коммутационных и защитных аппаратов напряжением до 1 кВ.

При этом существующие аппараты, не требующие замены, должны быть проверены на соответствие обновлённым параметрам электрической сети. Для защиты сети напряжением 0,38/0,22 кВ выбираются автоматические воздушные выключатели марки ВА. Такие современные выключатели оснащены различными типами расцепителей: электромагнитными, тепловыми и нулевыми, что обеспечивает комплексную защиту электрической сети.

Номинальный ток автомата [17]:

$$I_{ном.а} \geq I_p, \quad (43)$$

где $I_{ном.а}$ - «номинальный ток автомата, А» [17];

I_p - «расчётный ток сети, А» [17].

Тепловые расцепители, входящие в состав автоматов серии ВА, реагируют на перегрузки в сети, характерные для промышленных предприятий.

Данный аспект способствует минимизации риска перегрева и последующих повреждений оборудования, продлевая его срок службы [13].

«Номинальный ток уставки теплового расцепителя» [17]:

$$I_{у.т.р} \geq [1,05 - 1,1] \cdot I_p. \quad (44)$$

где $I_{у.т.р}$ - «номинальный ток уставки теплового расцепителя, А» [17].

Электромагнитные расцепители, в свою очередь, предназначены для защиты от коротких замыканий.

Возможность регулировки уставок электромагнитных расцепителей обеспечивает быстрое и точное срабатывание, что особенно важно в условиях повышенной ответственности и критической важности непрерывности производственных процессов.

Номинальный ток уставки электромагнитного расцепителя автомата [17]:

$$I_{ном.э.р} \geq K_{то} \cdot I_p \geq I_k. \quad (45)$$

где $K_{то}$ - «коэффициент тепловой отсечки автомата, о.е.» [17];

I_k - «значение трёхфазного тока КЗ, А» [17].

«Для автомата с регулируемым электромагнитным расцепителем» [17]:

$$I_{y.э.p.} \geq K \cdot I_{y.m.p.}, \quad (46)$$

где K – «кратность тока уставки расцепителя» [17].

Ранее в качестве вводного автомата на цеховой ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха был использован автомат марки ВА53-43 с параметрами:

- $I_{ном.а} = 2000 \text{ А}$,
- $I_{y.m.p.} = 1600 \text{ А}$,
- $I_{y.э.p.} = 4800 \text{ А}$ [1].

По условию (43):

$$2000 \text{ А} \geq 1519,8 \text{ А}.$$

По условию (44):

$$1600 \text{ А} \geq 1519,8 \cdot 1,05 = 1595,7 \text{ А}.$$

По условию (46):

$$4800 \text{ А} = 3 \cdot 1600 = 4800 \text{ А}.$$

Таким образом, в качестве вводного автомата ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха, проверочным расчётом был подтверждён автомат марки ВА55-43 с параметрами [1]:

- $I_{ном.а} = 2000 \text{ А}$;
- $I_{y.m.p.} = 1600 \text{ А}$;
- $I_{y.э.p.} = 4800 \text{ А}$.

Для всех остальных присоединений системы электроснабжения сварочного цеха также выбираются автоматы серии ВА с регулируемыми расцепителями.

Автоматы серии ВА с регулируемыми тепловыми и электромагнитными расцепителями обладают рядом преимуществ, которые делают их особенно эффективными в системах электроснабжения.

Их основное преимущество заключается в высокой степени защиты, обеспечиваемой гибкими настройками уставок тепловых и электромагнитных расцепителей.

Данный факт позволяет точно регулировать параметры автоматов в зависимости от специфики нагрузки и условий эксплуатации, что значительно повышает надёжность и безопасность электрических сетей [13].

Ещё одним важным преимуществом автоматов серии ВА является их универсальность.

Возможность регулировки как тепловых, так и электромагнитных расцепителей позволяет использовать эти автоматы в широком диапазоне приложений, от бытовых до промышленных, обеспечивая надёжную защиту и эффективное управление электроэнергией.

Конструктивные особенности данной серии автоматов с лёгкостью позволяют интегрировать их в различные системы управления, улучшая общую эффективность и гибкость эксплуатации.

Таким образом, автоматы серии ВА с регулируемыми тепловыми и электромагнитными расцепителями представляют собой высокоэффективное решение для систем электроснабжения, обеспечивая высокую степень защиты, надёжность и гибкость в управлении электрическими нагрузками, что делает их незаменимыми в условиях современного производства.

Аналогично выбраны остальные автоматы для защиты и коммутации питающей и распределительной сети объекта исследования.

Результаты выбора автоматов СЭС сварочного цеха приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты выбора автоматов СЭС сварочного цеха

Потребитель	I_p, A	Марка	$I_{ном.а}, A$	$I_{у.т.р.}, A$	$I_{у.э.р.}, A$
Вводные автоматы	1519,8	BA55-43	2000	1600	4800
Секционный автомат	1519,8	BA55-43	2000	1600	4800
Линейные автоматы					
СШ-1 0,38/0,22 кВ					
Сварочный аппарат ручной дуговой сварки №1	24,6	BA57-35	100	32	96
Насос ёмкости дренажной	18,0	BA57-35	100	25	75
Роботизированный сварочный комплекс №1	90,0	BA 88-33	160	120	360
Полуавтоматический сварочный аппарат №1	40,9	BA57-35	100	63	189
Полуавтоматический сварочный аппарат №2	40,9	BA57-35	100	63	189
Роботизированный сварочный комплекс №2	106,4	BA 88-33	160	140	420
Роботизированный сварочный комплекс №3	108,0	BA 88-33	160	140	420
Термическая печь для подогрева и отпуска сварных конструкций	376,5	BA 51-39	400	400	1200
Сварочный пост для аргонодуговой сварки №1	4,9	BA57-35	100	6,3	18,9
Сварочный стенд №1	3,6	BA57-35	100	6,3	18,9
Система вентиляции и удаления дыма №1	0,4	BA57-35	100	6,3	18,9
Система вентиляции и удаления дыма №2	0,4	BA57-35	100	6,3	18,9
Оборудование для ультразвукового контроля сварных швов	1,8	BA57-35	100	6,3	18,9
Сварочный пост для аргонодуговой сварки №2	4,9	BA57-35	100	6,3	18,9
Контактный сварочный аппарат №1	18,0	BA57-35	100	25	75
Контактный сварочный аппарат №2	18,0	BA57-35	100	25	75
Технологический сварочный стол №1	12,3	BA57-35	100	16	48
Сварочный аппарат ручной дуговой сварки №2	24,6	BA57-35	100	32	96
Щит аварийного освещения ЩАО	1,1	BA57-35	100	6,3	18,9
Питание запорной арматуры	10,5	BA57-35	100	16	48
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №1	26,2	BA57-35	100	32	96
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №2	26,2	BA57-35	100	32	96
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №3	50,7	BA57-35	100	63	189
Полуавтоматический сварочный аппарат №3	43,0	BA57-35	100	50	150
СШ-2 0,38/0,22 кВ					
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №4	70,9	BA57-35	100	80	240

Продолжение таблицы 10

Потребитель	I_p, A	Марка	$I_{ном.а}, A$	$I_{у.т.р.}, A$	$I_{у.э.р.}, A$
Шкаф управления электрообогревом сварочных изделий №5	53,4	BA57-35	100	63	189
Электродвигатель насоса емкости дренажной	2,5	BA57-35	100	6,3	18,9
Насос производственных стоков №1	49,1	BA57-35	100	63	189
Система лазерной сварки и резки №1	43,0	BA57-35	100	50	150
Сварочный аппарат ручной дуговой сварки №3	24,6	BA57-35	100	32	96
Технологический сварочный стол №2	9,2	BA57-35	100	16	48
Насос технической воды №1	16,4	BA57-35	100	25	75
Насос технической воды №2	16,4	BA57-35	100	25	75
Насос технической воды №3	16,4	BA57-35	100	25	75
Сварочный стенд №2	11,3	BA57-35	100	16	48
Система лазерной сварки и резки №2	56,0	BA57-35	100	63	189
Компрессор воздушный производственный №1	108,0	BA 88-33	160	140	420
Компрессор воздушный производственный №2	106,4	BA 88-33	160	140	420
Пескоструйный аппарат и камера	40,9	BA57-35	100	50	150
Плазменный резак	90,0	BA 88-33	160	120	360
Контактный сварочный аппарат №3	18,0	BA57-35	100	25	75
Контактный сварочный аппарат №4	18,0	BA57-35	100	25	75
Система вентиляции и удаления дыма №3	0,4	BA57-35	100	6,3	18,9
Система вентиляции и удаления дыма №4	0,4	BA57-35	100	6,3	18,9
Оборудование для сварки трением	3,6	BA57-35	100	6,3	18,9
Аддитивный сварочный комплекс №1	18,0	BA57-35	100	25	75
Аддитивный сварочный комплекс №2	18,0	BA57-35	100	25	75
Аддитивный сварочный комплекс №3	18,0	BA57-35	100	25	75
Аддитивный сварочный комплекс №4	18,0	BA57-35	100	25	75
Аддитивный сварочный комплекс №5	18,0	BA57-35	100	25	75
Аддитивный сварочный комплекс №6	18,0	BA57-35	100	25	75
Аддитивный сварочный комплекс №7	18,0	BA57-35	100	25	75
Аддитивный сварочный комплекс №8	18,0	BA57-35	100	25	75
Аддитивный сварочный комплекс №9	18,0	BA57-35	100	25	75
Установка для микросварки и пайки №1	4,9	BA57-35	100	6,3	18,9
Установка для микросварки и пайки №2	4,9	BA57-35	100	6,3	18,9
Установка для микросварки и пайки №3	4,9	BA57-35	100	6,3	18,9

В результате проведения расчётов, подтверждены все установленные автоматические выключатели в сети 0,38/0,22 кВ сварочного цеха, которые не требуют замены:

- выключатели автоматические вводные и секционный, марки ВА55-43 с параметрами: $I_{ном.а} = 2000 \text{ А}$; $I_{у.т.р.} = 1600 \text{ А}$; $I_{у.э.р.} = 4800 \text{ А}$;
- выключатели автоматические линейные марки ВА различных типонаминалов (ВА57-35, ВА 88-33 и ВА 51-39).

Выбраны аппараты защиты для новых присоединений потребителей:

- выключатели автоматические с параметрами: $I_{ном.а} = 100 \text{ А}$; $I_{у.т.р.} = 25 \text{ А}$; $I_{у.э.р.} = 75 \text{ А}$ – 9 единиц;
- выключатели автоматические с параметрами: $I_{ном.а} = 100 \text{ А}$; $I_{у.т.р.} = 6,3 \text{ А}$; $I_{у.э.р.} = 18,9 \text{ А}$ – 3 единицы.

Выводы по разделу.

В результате проведения выбора кабельных линий 10 кВ и 0,38/0,22 кВ в системе электроснабжения сварочного цеха, были получены следующие результаты:

- подтверждено и обосновано применение двух силовых кабелей марки АПвКВнг(А)-LS 3×35/16 для питания системы электроснабжения сварочного цеха на напряжении 10 кВ;
- в качестве проводников для питания новых потребителей, подтверждено и обосновано применение кабельных линий 0,38/0,322 кВ марки АПвПбШв 5×2,5 (12 отходящих линий);
- проверены и расчётным путём подтверждены сечения всех существующих проводников кабельных линий 0,38/0,22 кВ (кабели марки АПвПбШв разных сечений).

Расчётным путём подтверждены все установленные аппараты в сети 10 кВ системы электроснабжения сварочного цеха, которые не требуют модернизации:

- на стороне 10 кВ в ячейках РУ-10 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ: выключатели нагрузки марки ВНА-10/630У1 – 2 единицы, предохранители плавкие марки ПКТ103-10-80-20У1 – 2 единицы;
- в ячейках 10 кВ на ГПП-110/10 кВ машиностроительного завода: вакуумные высоковольтные выключатели марки ВБЭ-10-20/1000

УХЛ2, ограничители перенапряжения марки ОПНп-10/11,5/10/550
УХЛ1 и трансформаторы тока ТОЛ-СВЭЛ-10.

В результате проведения расчётов, подтверждены все установленные автоматические выключатели в сети 0,38/0,22 кВ сварочного цеха, которые не требуют замены:

- выключатели автоматические вводные и секционный, марки ВА55-43 с параметрами: $I_{ном.а} = 2000$ А; $I_{у.т.р.} = 1600$ А; $I_{у.э.р.} = 4800$ А;
- выключатели автоматические линейные марки ВА различных типономиналов (ВА57-35, ВА 88-33 и ВА 51-39) с различными уставками тепловых и электромагнитных расцепителей.

Выбраны и проверены аппараты защиты и коммутации для новых присоединений потребителей в электрической сети 0,38/0,22 кВ:

- выключатели автоматические с параметрами: $I_{ном.а} = 100$ А; $I_{у.т.р.} = 25$ А; $I_{у.э.р.} = 75$ А – 9 единиц;
- выключатели автоматические с параметрами: $I_{ном.а} = 100$ А; $I_{у.т.р.} = 6,3$ А; $I_{у.э.р.} = 18,9$ А – 3 единицы.

6 Выбор устройств релейной защиты и автоматики

«Выбор устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) для защиты питающих линий напряжением 10 кВ, отходящих к цеховой трансформаторной подстанции ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха, является важным этапом проектирования системы электроснабжения» [11].

Целью выбора таких устройств является обеспечение надёжной защиты электросетей от различных аварийных режимов, таких как короткие замыкания, перегрузки и пробой изоляции.

Известно, что правильный выбор устройств РЗА позволяет минимизировать время отключения повреждённых участков сети, предотвращая повреждения оборудования и снижая риск длительных простоев в производственном процессе.

При выборе устройств РЗА учитываются характеристики питающих линий, параметры оборудования и условия эксплуатации.

Устройства должны обеспечивать селективность срабатывания, то есть отключать только повреждённый участок сети без отключения неповреждённых частей, что позволяет поддерживать бесперебойное электроснабжение критически важных узлов.

Данные факторы особенно актуальны для сварочного цеха, где непрерывность работы электросварочного оборудования напрямую влияет на производственные показатели.

Также учитывается возможность интеграции устройств РЗА в существующие системы управления и мониторинга.

Современные релейные защиты и автоматика оборудованы функциями дистанционного управления и контроля, что «позволяет оперативно реагировать на изменения состояния сети и предотвращать аварийные ситуации до их возникновения».

Указанные аспекты повышают общую надёжность и устойчивость системы электроснабжения» [12], обеспечивая безопасность эксплуатации как для персонала, так и для оборудования.

Важным аспектом выбора устройств РЗА является их способность к самодиагностике и адаптации к изменяющимся условиям сети. Устройства релейной защиты и автоматики должны обеспечивать быстрое восстановление работы сети после аварии и минимизировать риски повторных отключений.

Выбор устройств релейной защиты и автоматики для защиты питающих линий 10 кВ, отходящих к цеховой трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ сварочного цеха, направлен на обеспечение максимальной надёжности и безопасности системы электроснабжения, а также на минимизацию возможных потерь в случае аварийных ситуаций.

В работе предлагается для данной цели применить «микропроцессорные блоки защиты «Орион-РТЗ»» [12], показанные на рисунке 4.



Рисунок 4 – Микропроцессорный блок защиты «Орион-РТЗ» [12]

Первое преимущество заключается в широком спектре защитных функций, которые «Орион-РТЗ» способен выполнять.

«Устройства обеспечивают комплексную защиту от коротких замыканий, перегрузок, замыканий на землю, а также других аварийных ситуаций, которые могут возникнуть в электрических сетях, что позволяет использовать» [12] их как универсальные решения для защиты различных объектов, включая подстанции, распределительные сети и промышленные предприятия.

Вторым значительным преимуществом является высокая точность и быстродействие микропроцессорных блоков «Орион-РТЗ».

Благодаря применению современных микропроцессоров и алгоритмов обработки сигналов, устройства обеспечивают мгновенное обнаружение и точное определение места возникновения аварии, что значительно сокращает время на отключение повреждённого участка сети, предотвращая дальнейшее распространение аварии и минимизируя ущерб.

Третье преимущество связано с возможностью гибкой настройки и программирования защитных уставок в соответствии с конкретными требованиями объекта и особенностями электросети.

«Орион-РТЗ» позволяет изменять параметры защиты в зависимости от результатов диагностики состояния оборудования. Наличие данного фактора повышает общую эффективность и надёжность эксплуатации электрических сетей, позволяя оперативно реагировать на изменения и предупреждать аварийные ситуации.

Кроме того, «Орион-РТЗ» обладают функциями самодиагностики и контроля исправности, что позволяет своевременно выявлять и устранять неисправности [12].

Таким образом можно сделать вывод, что микропроцессорные блоки РЗиА «Орион-РТЗ» представляют собой высокоэффективные решения для защиты электрических сетей.

Выполняется расчёт уставок блоков релейной защиты

«Первая ступень токовая отсечка (далее – ТО). Токовая отсечка является разновидностью токовой защиты, позволяющей обеспечить быстрое отключение КЗ.

Токовая отсечка отстраивается от максимального тока КЗ» [2]:

$$I_{ТО} = K_n \cdot I_{КЗ_{макс}}^{(3)}, A, \quad (47)$$

где « K_n – коэффициент надежности» [2].

«Ток срабатывания ТО для защиты ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха» [2]:

$$I_{ТО} = 1,2 \cdot 6,5 = 7,8 \text{ кА.}$$

Токовая отсечка действует мгновенно, поэтому выполняется без задержки времени срабатывания. ТО позволяет эффективно реагировать на аварийные ситуации, обеспечивая надёжную и селективную защиту сети.

Этот вид защиты принят в данной работе в качестве базового подхода, и проводится расчёт уставок срабатывания для его применения.

Её селективность на питающей ГПП-110/10 кВ достигается путём выбора тока срабатывания.

«Вторая ступень (МТЗ). Ток срабатывания МТЗ отстраивается от максимального рабочего тока нагрузки» [2]:

$$I_{МТЗ} = \frac{K_n \cdot K_{зан.}}{K_{возв}} \cdot I_{раб.}, A, \quad (48)$$

где « K_n – коэффициент надёжности защиты,

$K_{зан}$ – коэффициент запаса,

$K_{возв}$ – коэффициент возврата,

$I_{раб}$ – максимальный рабочий ток» [2].

«Тогда для питающей линии 10 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ цеха» [2]:

$$I_{MTЗ} = \frac{1,2 \cdot 2,5}{0,9} \cdot 80,8 = 269,3 \text{ A.}$$

«Определяется коэффициент чувствительности МТЗ» [2]:

$$K_{\psi} = \frac{I_{KЗ}^{(2)}}{I_{сз}} \geq 1,5, \quad (49)$$

где $I_{KЗ}^{(2)}$ - ток двухфазного (минимального) КЗ.

Известно выражение, связывающее токи трёхфазного и двухфазного КЗ:

$$I_{KЗ}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{KЗ}^{(3)}, \text{ кА.} \quad (50)$$

Таким образом, по условию (50):

$$I_{KЗ}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 6500 = 5629 \text{ A.}$$

С учётом этого, коэффициент чувствительности МТЗ питающей линии 10 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха:

$$K_{\psi} = \frac{5629}{269,3} = 20,9 \geq 1,5.$$

Принимается время срабатывания МТЗ на выключателях, питающих ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха, равное 1 с (с учётом времени селективности).

«Чувствительность соответствует заданным условиям.

Для сетей с изолированной нейтралью вместо расчёта однофазного тока КЗ принято рассчитывать ток замыкания на землю (ЗНЗ).

Значение тока ЗНЗ» [2]:

$$I_{ЗНЗ} = \frac{U_{ном} \cdot l_{\Sigma}}{10}, A, \quad (51)$$

где « $U_{ном}$ - номинальное напряжение сети;

l_{Σ} - суммарная длина линии 10 кВ» [2].

Значит:

$$I_{ЗНЗ} = \frac{10 \cdot 2,84}{10} = 2,84 A.$$

Данный ток, равный 2,84 А, принимается в качестве тока срабатывания для защиты от однофазных КЗ.

Выводы по разделу.

Для защиты питающей линии 10 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха, на питающей ГПП-110/10 кВ выбраны микропроцессорные блоки «Орион-РТЗ» и рассчитаны уставки основных РЗ:

- двухступенчатая токовая защита: токовая отсечка $I_{ТО} = 7,8 \text{ кА}$, без времени срабатывания (мгновенного действия), максимальная токовая защита $I_{МТЗ} = 269,3 \text{ А}$ (время срабатывания – 1 с):
- ток срабатывания для защиты от однофазных КЗ: $I_{ЗНЗ} = 2,84 \text{ А}$.

Схема релейной защиты питающей линии 10 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха представлена в графической части работы.

7 Расчёт заземления и молниезащиты

7.1 Расчёт контура заземления

Заземление трансформаторной подстанции ТП-10/0,4 кВ, используемой для электроснабжения сварочного цеха, представляет собой важный элемент системы, который обеспечивает безопасную и надёжную эксплуатацию электрооборудования.

Основная функция заземления заключается в создании надёжного электрического соединения с землёй, что позволяет эффективно отводить токи замыкания на землю и гарантирует защиту как оборудования, так и персонала от поражений электрическим током и возможных повреждений.

Для трансформаторных цеховых подстанций, особенно в условиях повышенной ответственности, заземляющие устройства должны обеспечивать минимальное сопротивление растеканию тока, что крайне важно для снижения потенциалов на поверхности земли вблизи подстанции.

В системе заземления ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха предусматривается комплекс мероприятий, направленных на обеспечение надёжного соединения с землёй, включая использование заземляющих проводников, контуров и электродов, выполненных из материалов с высокой проводимостью и устойчивостью к коррозии.

Заземление цеховой ТП-10/0,4 кВ также играет важную роль в защите от импульсных перенапряжений, которые могут возникать вследствие грозовых разрядов или переключений в сети.

В таких условиях заземляющие устройства способствуют быстрому и безопасному отводу токов молний, предотвращая повреждения изоляции и снижая риск возгораний.

Этот аспект особенно важен для сварочного цеха, где интенсивные процессы сварки могут сопровождаться рисками возникновения электрических замыканий и других аварийных ситуаций.

Эффективное заземление необходимо и для корректной работы систем релейной защиты и автоматики, которые требуют надёжного потенциала земли для правильного функционирования.

Наличие данного фактора позволяет обеспечить своевременное срабатывание защитных устройств при возникновении аварийных ситуаций, минимизируя риск повреждения оборудования и обеспечивая безопасность персонала.

Кроме того, заземление трансформаторной подстанции способствует снижению электромагнитных помех, что положительно сказывается на работе электронного оборудования и систем управления.

Снижение таких помех улучшает точность измерений и надёжность передачи данных, что важно для эффективного управления процессами в сварочном цехе.

Таким образом, заземление трансформаторной подстанции ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха играет важнейшую роль в обеспечении общей безопасности и надёжности системы электроснабжения, поддерживает стабильную работу оборудования и защищает от различных видов электрических опасностей.

«Длительность воздействия тока КЗ» [18]:

$$\tau = t_{pz} + t_{откл}, \quad (52)$$

$$\tau = 0,1 + 0,08 = 0,18c.$$

«Для сложных заземлителей из горизонтальных и вертикальных электродов коэффициент напряжения прикосновения» [18]:

$$K_n = \frac{M \cdot \beta}{\left(\frac{l_g \cdot L_2}{a \cdot \sqrt{S}}\right)^{0.45}}, \quad (53)$$

где « ρ_1 и ρ_2 - удельное сопротивление верхнего и нижнего слоя грунта,

Ом·м» [18].

«В качестве верхнего и нижнего слоя принимается суглинок» [18]:

$$\rho_1 = k_{CG} \cdot \rho_{\text{суглин}}, \quad (54)$$

$$\rho_2 = k_{CB} \cdot \rho_{\text{суглин}}, \quad (55)$$

где k_C - «повышающий коэффициент, учитывающий высыхание и промерзания грунта» [14].

Значит:

$$\rho_1 = 4 \cdot 100 = 400 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

$$\rho_2 = 1,5 \cdot 100 = 150 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

$$\rho_1 / \rho_2 = 400 / 150 = 2,67.$$

«Коэффициент, определяемый по сопротивлению тела человека» [18]:

$$\beta = \frac{R_q}{R_q + 1,5 \cdot \rho_g}, \quad (56)$$

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 400} = 0,625.$$

После подстановки числовых значений:

$$K_n = \frac{0,67 \cdot 0,625}{\left(\frac{5 \cdot 556}{5 \cdot \sqrt{30 \cdot 40}}\right)^{0,45}} = 0,108.$$

«Напряжение на заземлителе» [18]:

$$U_3 = \frac{U_{np\dot{o}on}}{K_n}, \quad (57)$$

$$U_3 = \frac{420}{0,108} = 3888,89 \text{ В} \approx 3,9 \text{ кВ} < 10 \text{ кВ}.$$

«Сопротивление заземляющего устройства» [18]:

$$R_{з\dot{o}on} = \frac{3888,9}{0,649 \cdot 10^3} = 5,992 \text{ Ом}.$$

«Число ячеек на стороне квадрата» [18]:

$$m = \frac{L_2}{2\sqrt{S}} - 1, \quad (58)$$

$$m = \frac{556}{2\sqrt{30 \cdot 40}} - 1 = 7,025 \longrightarrow m = 7.$$

«Длина полос расчётной модели» [18]:

$$L_2' = 2\sqrt{S}(m+1), \quad (59)$$

$$L_2' = 2\sqrt{30 \cdot 40} \cdot (7+1) = 554,26 \text{ м}.$$

«Число вертикальных электродов по периметру контура» [18]:

$$n_г = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{1 \cdot l_г}, \quad (60)$$

$$n_г = \frac{\sqrt{30 \cdot 40} \cdot 4}{1 \cdot 3,5} = 33,78 \approx 34 \text{ шт}.$$

«Принимается 34 вертикальных электрода.

Общая длина вертикальных электродов» [18]:

$$L_g = l_g \cdot n, \quad (61)$$
$$L_g = 5 \cdot 28 = 140 \text{ м.}$$

«Относительная глубина заложения электродов» [18]:

$$\frac{l_g + t}{\sqrt{S}} = \frac{3,5 + 0,7}{\sqrt{30 \cdot 40}} = 0,16 > 0,1,$$

$$A = 0,444 - 0,84 \frac{l_g + t}{\sqrt{S}}, \quad (62)$$

$$A = 0,444 - 0,84 \cdot 0,16 = 0,3096 \text{ м,}$$

$$R = \frac{A \cdot \rho_3}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_3}{L_2 + L_g}, \quad (63)$$

$$R = \frac{0,3096 \cdot 168}{\sqrt{30 \cdot 40}} + \frac{168}{556 + 140} = 0,768 \text{ Ом} \leq R_{\text{зодон}} = 0,992 \text{ Ом,}$$

$$U_{np} = K_n \cdot I_3 \cdot R_3 \quad (64)$$

$$U_{np} = 0,108 \cdot 0,649 \cdot 0,768 \cdot 10^3 = 53,831 < 420 \text{ В.}$$

Таким образом установлено, что 34 вертикальных заземлителя в контуре заземления обеспечат необходимые и достаточные условия безопасности на понизительной цеховой подстанции 10/0,4 кВ, а также в целом в системе электроснабжения сварочного цеха.

7.2 Расчёт молниезащиты

Расчёт молниезащиты проводится для трансформаторной подстанции ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха, которая является одиноко стоящим сооружением, поэтому она подвержена атмосферным перенапряжениям вследствие возможного попадания молнии.

Молниезащита трансформаторной подстанции ТП-10/0,4 кВ, предназначенной для электроснабжения сварочного цеха, представляет собой важный аспект обеспечения безопасности и надёжности работы электрической инфраструктуры.

Основной задачей молниезащиты является предотвращение повреждений оборудования, вызванных прямыми попаданиями молний и воздействием электромагнитных импульсов, возникающих при грозовых разрядах.

В условиях промышленного производства, где происходит интенсивное использование энергетических ресурсов, надёжная защита от молний становится необходимой мерой для поддержания стабильного и бесперебойного электроснабжения.

Для обеспечения эффективной молниезащиты на трансформаторной подстанции применяется комплексный подход, который включает использование различных технических решений и устройств.

Важнейшим элементом системы молниезащиты является установка молниеотводов, которые предназначены для перехвата разрядов молний и их безопасного отвода в землю.

Молниеотводы размещаются таким образом, чтобы обеспечить максимальную защиту наиболее уязвимых частей подстанции, таких как силовые трансформаторы, распределительные устройства и другие компоненты системы.

Устройства защиты от перенапряжений включаются в систему молниезащиты подстанции, чтобы ограничить амплитуду импульсных напряжений до безопасных уровней, предотвращая тем самым повреждения изоляции и выход из строя оборудования.

Кроме того, важной составляющей молниезащиты трансформаторной подстанции является организация эффективного заземления, которое обеспечивает безопасный отвод молниевых токов в землю.

Надёжное заземление способствует минимизации потенциалов на поверхности земли и снижению риска возникновения опасных напряжений шагового и прикосновения, что особенно важно для обеспечения безопасности обслуживающего персонала и защиты оборудования.

Молниезащита трансформаторной подстанции также включает использование экранирующих устройств и специальных материалов, которые помогают снизить воздействие электромагнитных полей, создаваемых молниевыми разрядами.

Данные мероприятия способствуют снижению уровня электромагнитных помех, что особенно важно для корректной работы электронного оборудования и систем управления.

Таким образом, молниезащита трансформаторной подстанции ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха представляет собой комплекс технических и организационных мероприятий, направленных на обеспечение надёжной защиты электрической инфраструктуры от молниевых разрядов и связанных с ними явлений.

Реализация эффективной системы молниезащиты способствует повышению общей устойчивости системы электроснабжения, продлению срока службы оборудования и повышению безопасности работы персонала.

Для защиты здания ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха предварительно выбираются два стержневых молниеотвода, которые устанавливаются на крыше подстанции.

«Проводится проверка молниезащиты ТП.

Зона защиты ТП на уровне крыши» [19]:

$$I_o = 1,5 \cdot H_{\min}, \quad (65)$$

$$I_o = 1,5 \cdot 10,1 = 15,2 \text{ м},$$

$$I_{\text{сх1}} = I_o \left(1 - \frac{4}{h} \right), \quad (66)$$

где « h – полная зона защиты, м» [19].

$$I_{cx1} = 15,2 \left(1 - \frac{4}{7} \right) = 6,5 \text{ м.}$$

Зона защиты ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха с учётом взаимного экранирования двух молниеотводов:

$$I_o = 1,5 \cdot 15,2 = 22,8 \text{ м.}$$

«Наименьшая высота молниеотвода» [19]:

$$H_{\min} = 0,89 \cdot h_c + 0,124 \cdot L, \quad (67)$$

$$H_{\min} = 0,89 \cdot 15,2 + 0,124 \cdot 22,8 \approx 14,72 \text{ м,}$$

Принятая высота молниеотводов, равная 16 м, превышает расчётную наименьшую высоту молниеотводов, равную 14,72 м.

С учётом этого:

$$I_{cx1} = 22,8 \left(1 - \frac{4}{22,8} \right) \approx 17,5 \text{ м.}$$

«Радиус зоны защиты» [19]:

$$r_{xc} = 1,7 \cdot H_m, \quad (68)$$

где « H_m – высота молниеотвода, м» [19].

$$r_{xc} = 1,7 \cdot 15,2 = 25,8 \text{ м.}$$

В результате проверки системы защиты от атмосферных перенапряжений было установлено, что для молниезащиты ТП-10/0,4 кВ

сварочного цеха, целесообразно использовать два стержневых молниеотвода высотой 15,2 м.

Таким образом, будет увеличена зона защиты до необходимого уровня и эффективность молниезащиты подстанции будет повышена.

Выводы по разделу.

Расчётным путём установлено, что 34 вертикальных заземлителя в контуре заземления обеспечат необходимые и достаточные условия безопасности на понизительной цеховой подстанции 10/0,4 кВ, а также в целом в системе электроснабжения сварочного цеха.

По итогам проверки системы защиты от атмосферных перенапряжений было выявлено, что для обеспечения молниезащиты ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха оптимальным решением является установка двух стержневых молниеотводов высотой 15,2 м.

Такой подход позволит расширить зону защиты до требуемого уровня, существенно повышая общую эффективность молниезащиты подстанции.

Заключение

В результате выполнения работы осуществлена разработка проекта реконструкции системы электроснабжения сварочного цеха машиностроительного завода.

В результате проведения анализа существующей системы электроснабжения сварочного цеха машиностроительного завода, установлено следующее:

- рассматриваемый в работе сварочный цех ОАО «Демиховский машиностроительный завод» является важнейшим производственным участком с современным оборудованием, включающем 45 позиций основного технологического оборудования;
- определено, что сварочный цех получает питание от цеховой ТП-10/0,4 кВ, на которой установлены два силовых трансформатора сухого типа марки ТСЗ-1000/10/0,4, питающих две секции сборных шин 0,38/0,22 кВ на низком напряжении. Оба трансформатора находятся в работе;
- определено, что используемая на ТП-10/0,4 кВ схема «Одна, секционированная выключателем, система сборных шин» на данной подстанции является надёжной, экономичной, обеспечивая необходимый уровень резервирования для потребителей 1 и 2 категорий надёжности, получающих от неё питание. Таким образом, необходимости в применении кардинально нового типа схемы нет;
- установлено, что все аппараты напряжением 10 кВ и 0,38/0,22 кВ, используемые на подстанции – новые и современные, следовательно, они не нуждаются в замене.

Анализ исходных данных потребителей реконструируемой системы электроснабжения сварочного цеха ОАО «Демиховский машиностроительный завод» показал, что новыми потребителями на объекте выступают аддитивные сварочные комплексы в количестве 9 единиц, каждый

из которых потребляет 11 кВт, и установки для микросварки и пайки в количестве 3 единиц с потреблением по 3 кВт каждая.

Таким образом установлено, что суммарная установленная мощность перспективной нагрузки сварочного цеха составляет 108 кВт.

Определено, что нагрузка второй секции сборных шин 0,38/0,22 кВ на ТП-10/0,4 кВ реконструируемой системы электроснабжения сварочного цеха на 181,59 кВт меньше нагрузки первой секции сборных шин того же уровня напряжения на подстанции. В связи с этим, предложено подключить перспективную нагрузку ко второй секции сборных шин данной подстанции, чтобы выровнять распределение нагрузки на секциях сборных шин 0,38/0,22 кВ цеховой подстанции 10/0,4 кВ.

С учётом предложенного распределения, суммарная нагрузка секций сборных шин 0,38/0,22 кВ на цеховой ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха будет распределена следующим образом:

- первая секция (СШ-1) 0,38/0,22 кВ останется без изменений и составит 642,69 кВт;
- вторая секция (СШ-2) 0,38/0,22 кВ будет включать перспективную нагрузку, и её суммарная мощность составит 569,1 кВт (461,1 кВт текущей нагрузки плюс 108 кВт перспективной нагрузки).

Следовательно, с учётом подключаемой перспективной нагрузки, общая установленная мощность системы электроснабжения сварочного цеха после реконструкции составит 1211,79 кВт.

Таким образом, сделан вывод, что реконструкция системы электроснабжения сварочного цеха машиностроительного завода заключается в подключении новых потребителей ко второй существующей секции сборных шин 0,38/0,22 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ. Установлено, что данный факт приведёт к изменению схемы электрических соединений объекта исследования, а, следовательно – к её реконструкции. Следовательно, поставленная основная цель работы, обоснована.

Также в работе предложено провести реконструкцию схемы и устройств релейной защиты и автоматики путём выбора новых конструктивных и схемных решений.

По итогам расчёта электрических нагрузок для отдельных присоединений потребителей и секций сборных шин 0,38/0,22 кВ системы электроснабжения сварочного цеха, были определены ключевые результаты, применяющиеся при выборе всех элементов СЭС цеха.

На основании проведённого анализа установлено, что два силовых трансформатора сухого типа марки ТСЗ-1000/10/0,4, используемые в системе электроснабжения сварочного цеха до реконструкции схемы, подходят для питания существующей и вновь вводимой нагрузки.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что использование силовых трансформаторов сухого типа ТСЗ-1000/10/0,4 является оптимальным решением для реконструируемой системы электроснабжения.

Применение этих трансформаторов способствует повышению общей надёжности и эффективности электроснабжения объекта, особенно в условиях подключения новых потребителей.

В результате проведения расчёта токов короткого замыкания в системе электроснабжения сварочного цеха, получены основные результаты, применяемые для проверки оборудования СЭС цеха.

В результате проведения выбора кабельных линий 10 кВ и 0,38/0,22 кВ в системе электроснабжения сварочного цеха, были получены следующие результаты:

- подтверждено и обосновано применение двух силовых кабелей марки АПвКВнг(А)-LS 3×35/16 для питания системы электроснабжения сварочного цеха на напряжении 10 кВ;
- в качестве проводников для питания новых потребителей, подтверждено и обосновано применение кабельных линий 0,38/0,322 кВ марки АПвПбШв 5×2,5 (12 отходящих линий);

- проверены и расчётным путём подтверждены сечения всех существующих проводников кабельных линий 0,38/0,22 кВ (кабели марки АПвПбШв разных сечений).

Расчётным путём подтверждены все установленные аппараты в сети 10 кВ системы электроснабжения сварочного цеха, которые не требуют модернизации:

- на стороне 10 кВ в ячейках РУ-10 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ: выключатели нагрузки марки ВНА-10/630У1 – 2 единицы, предохранители плавкие марки ПКТ103-10-80-20У1 – 2 единицы;
- в ячейках 10 кВ на ГПП-110/10 кВ машиностроительного завода: вакуумные высоковольтные выключатели марки ВБЭ-10-20/1000 УХЛ2, ограничители перенапряжения марки ОПНп-10/11,5/10/550 УХЛ1 и трансформаторы тока ТОЛ-СВЭЛ-10.

В результате проведения расчётов, подтверждены все установленные автоматические выключатели в сети 0,38/0,22 кВ сварочного цеха, которые не требуют замены:

- выключатели автоматические вводные и секционный, марки ВА55-43 с параметрами: $I_{ном.а} = 2000$ А; $I_{у.т.р.} = 1600$ А; $I_{у.э.р.} = 4800$ А;
- выключатели автоматические линейные марки ВА различных типономиналов (ВА57-35, ВА 88-33 и ВА 51-39) с различными уставками тепловых и электромагнитных расцепителей.

Выбраны и проверены аппараты защиты и коммутации для новых присоединений потребителей в электрической сети 0,38/0,22 кВ:

- выключатели автоматические с параметрами: $I_{ном.а} = 100$ А; $I_{у.т.р.} = 25$ А; $I_{у.э.р.} = 75$ А – 9 единиц;
- выключатели автоматические с параметрами: $I_{ном.а} = 100$ А; $I_{у.т.р.} = 6,3$ А; $I_{у.э.р.} = 18,9$ А – 3 единицы.

Для защиты питающей линии 10 кВ цеховой ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха, на питающей ГПП-110/10 кВ выбраны микропроцессорные блоки «Орион-РТЗ» и рассчитаны уставки основных РЗ:

- двухступенчатая токовая защита: токовая отсечка $I_{TO} = 7,8 \text{ кА}$, без времени срабатывания (мгновенного действия), максимальная токовая защита $I_{МТЗ} = 269,3 \text{ А}$ (время срабатывания – 1 с):
- ток срабатывания для защиты от однофазных КЗ: $I_{ЗНЗ} = 2,84 \text{ А}$.

Расчётным путём установлено, что 34 вертикальных заземлителя в контуре заземления обеспечат необходимые и достаточные условия безопасности на понизительной цеховой подстанции 10/0,4 кВ, а также в целом в системе электроснабжения сварочного цеха.

По итогам проверки системы защиты от атмосферных перенапряжений было выявлено, что для обеспечения молниезащиты ТП-10/0,4 кВ сварочного цеха оптимальным решением является установка двух стержневых молниеотводов высотой 15,2 м.

Такой подход позволит расширить зону защиты до требуемого уровня, существенно повышая общую эффективность молниезащиты подстанции.

Таким образом, основываясь на полученных результатах, подтверждено, что предложенный проект реконструкции системы электроснабжения сварочного цеха машиностроительного завода характеризуется высокими показателями надёжности, экономичности, бесперебойности питания потребителей, безопасности, а также селективности и чувствительности защиты.

Список используемой литературы

1. Автоматические выключатели ВА [Электронный ресурс]: URL: <https://m-energo-spb.ru/vyklyuchatel-avtomaticheskiiy-va> (дата обращения: 03.09.2024).
2. Агафонов А.И., Бростилова Т. Ю., Джазовский Н. Б. Современная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Инфра-Инженерия, 2020. 300 с.
3. Выключатели нагрузки ВНА, ВНР и ВНРВ на 10 кВ [Электронный ресурс]: URL: <https://tmtrade.ru/vyklyuchateli-nagruzki-6-10-kv> (дата обращения: 03.09.2024).
4. ГОСТ 14209–85 Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки (с Изменением № 1). [Электронный ресурс]: URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200012414> (дата обращения: 03.09.2024).
5. Кабель АПвКВнг(А)-LS [Электронный ресурс]: URL: [https://k-
ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyye/s-izolyacziej-iz-sshitogo-polietilena-
10kv/apvkvng-ls-10kv/](https://k-
ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyye/s-izolyacziej-iz-sshitogo-polietilena-
10kv/apvkvng-ls-10kv/) (дата обращения: 03.09.2024).
6. Кабель АПвПБШв [Электронный ресурс]: URL: [https://k-
ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyye/s-izolyacziej-iz-silanolnosshitogo-polietilena-
\(1kv\)/apvpbshv-1kv/](https://k-
ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyye/s-izolyacziej-iz-silanolnosshitogo-polietilena-
(1kv)/apvpbshv-1kv/) (дата обращения: 03.09.2024).
7. Киреева Э.В. Электроснабжение и электрооборудование организаций и учреждений. М.: Кнорус, 2019. 236 с.
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. ОАО «Демиховский машиностроительный завод» [Электронный

ресурс]: URL: <https://dmzavod.ru/> (дата обращения: 03.09.2024).

12. Орион-РТЗ. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.rza.ru/catalog/kompaktnye-ustroystva-rza-6-35-kv/orion-rtz.php> (дата обращения: 03.09.2024).

13. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Изд-во ДЕАН, 2022. 192 с.

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

15. РД 153-34.0-20.527-98 «Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования» [Электронный ресурс]: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294817/4294817179.htm> (дата обращения: 03.09.2024).

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

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

18. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю., Яшков В.А. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. Учебное пособие. М.: Форум, Инфра-М, 2022. 365 с.

19. Устройство молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций Сборник документов. Серия 17. Выпуск 27. Электронный ресурс]: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815349.pdf> (дата обращения: 03.09.2024).

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.