

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

Институт химии и энергетики
(наименование института полностью)

Кафедра Электроснабжение и электротехника
(наименование)

13.03.02. Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроснабжение
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Разработка системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия

Обучающийся

К. А. Храмов
(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н. В. И. Платов

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

Тольятти 2024

Аннотация

Разработана рациональная, надёжная, экономичная и безопасная система электроснабжения деревообрабатывающего предприятия на примере ООО «Харовсклеспром».

Проведена реконструкция схем электрических соединений питающей и распределительной сетей, вызванная расширением производства и вводом в эксплуатацию новых мощностей технологического оборудования цеха по производству биотоплива).

Проведённые в работе исследования включают: анализ исходных данных, расчёт электрических нагрузок, выбор и проверку силовых трансформаторов на подстанциях, расчёт токов короткого замыкания, выбор и проверку проводников и электрических аппаратов, а также разработку системы релейной защиты предприятия.

Предложенные технические решения направлены на повышение надёжности и эффективности электроснабжения, соответствуют современным требованиям отрасли и могут быть использованы при реконструкции аналогичных производственных объектов.

Работа содержит 61 страницу расчётно-пояснительной записки (формат А4) и 6 чертежей демонстрационного материала (формат А1).

Содержание

Введение.....	4
1 Анализ исходных данных.....	6
1.1 Характеристика технологического процесса и потребителей деревообрабатывающего предприятия	6
1.2 Характеристика существующей схемы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия	10
2 Расчёт электрических нагрузок	16
3 Выбор и проверка силовых трансформаторов на подстанциях	22
4 Расчёт токов короткого замыкания, выбор и проверка проводников и аппаратов.....	27
4.1 Расчёт токов короткого замыкания	27
4.2 Выбор и проверка проводников	33
4.3 Выбор и проверка электрических аппаратов	37
5 Расчёт релейной защиты предприятия.....	47
5.1 Выбор устройств релейной защиты	47
5.2 Расчёт релейной защиты	51
Заключение	56
Список используемых источников.....	60

Введение

Развитие деревообрабатывающей промышленности в Российской Федерации сопровождается увеличением объёмов производства и внедрением новых технологических процессов, требующих надёжного и эффективного электроснабжения.

Актуальность данной работы обусловлена потребностью в модернизации энергетической инфраструктуры предприятия с целью повышения её надёжности, безопасности и соответствия современным требованиям [16], [20].

Устаревшие схемы электрических соединений и оборудование не способны обеспечить надёжное питание новых технологических линий, что может привести к снижению производительности и увеличению эксплуатационных затрат.

Основная цель работы заключается в разработке оптимальной системы электроснабжения, способной удовлетворить возросшие потребности предприятия.

Объектом исследования является система электроснабжения деревообрабатывающего предприятия (на примере ООО «Харовсклеспром»).

Установлено, что расширение производственных мощностей предприятия ООО «Харовсклеспром» обусловило необходимость реконструкции существующей системы электроснабжения для обеспечения стабильной работы нового оборудования и повышения общей энергоэффективности производства.

Предметом исследования выступают показатели и параметры надёжности, экономичности и безопасности электроснабжения потребителей при практическом внедрении мероприятий по реконструкции системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия (на примере ООО «Харовсклеспром»).

Для достижения поставленной цели проводится детальный анализ исходных данных, включающих характеристики существующей сети, параметры нового оборудования и требования нормативно-технической документации.

В рамках работы, выполняется расчёт электрических нагрузок с учётом введения в эксплуатацию новых потребителей, что позволяет определить необходимую мощность и выбрать соответствующие силовые трансформаторы на подстанциях.

Особое внимание уделено расчёту токов короткого замыкания, необходимому для корректного выбора проводников и электрических аппаратов, обеспечивающих безопасность и надёжность работы системы электроснабжения всего деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром».

Разработка системы релейной защиты предприятия основана на применении современных технологий и оборудования, что позволяет повысить скорость и точность реагирования на аварийные ситуации.

Предложенные решения направлены на минимизацию рисков аварий, снижение потерь электроэнергии и повышение общей эффективности работы энергетической системы предприятия.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанных методик и технических решений при разработке и практическом применении мероприятий по реконструкции систем электроснабжения других промышленных предприятий, сталкивающихся с аналогичными проблемами.

Результаты исследования могут быть использованы для решения аналогичных производственных задач, а также при оптимизации эксплуатации электрических сетей в условиях растущих требований к надёжности и эффективности электроснабжения.

1 Анализ исходных данных

1.1 Характеристика технологического процесса и потребителей деревообрабатывающего предприятия

Рассматривается характеристика технологического процесса и потребителей деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром».

Деревообрабатывающее предприятие ООО «Харовсклеспром» специализируется на комплексной переработке древесины, обеспечивая широкий спектр продукции для различных отраслей промышленности [8].

Рассматриваемое предприятие располагается в городе Харовск Вологодской области, на ул. Красное Знамя, 25. Расположение ООО «Харовсклеспром» на карте г. Харовск Вологодской области показано на рисунке 1.

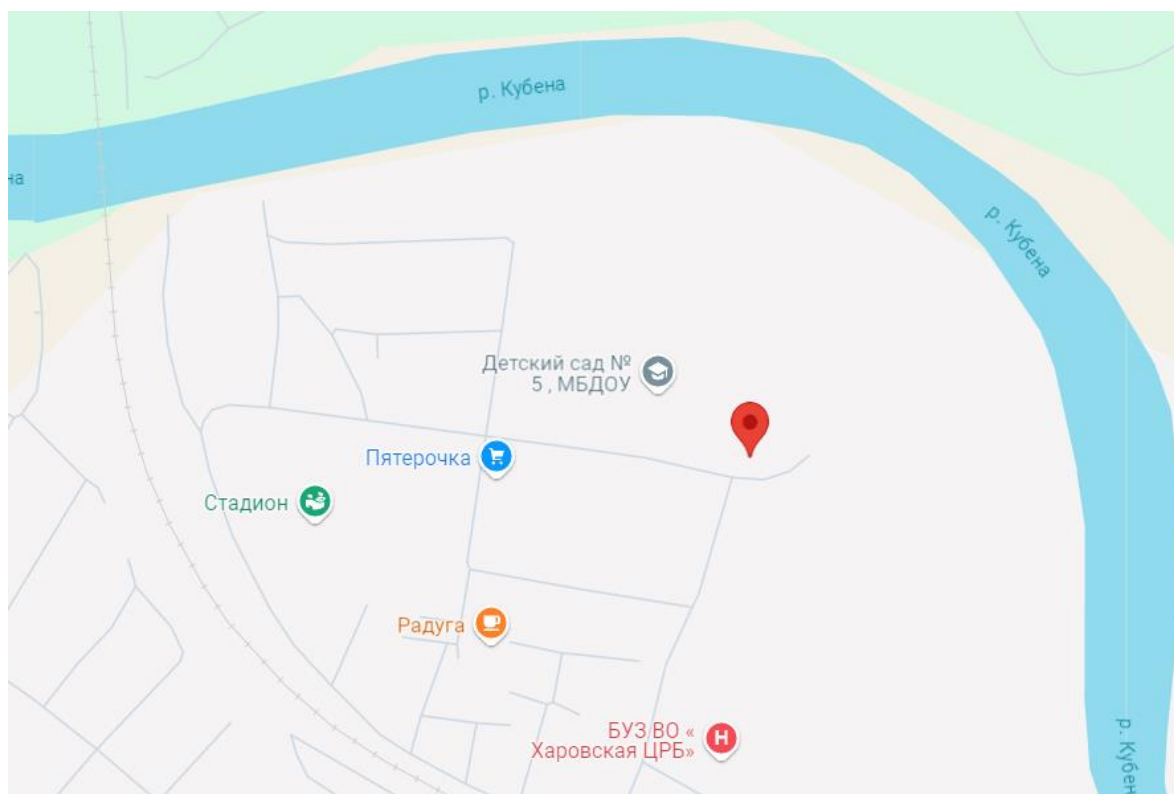


Рисунок 1 – Расположение ООО «Харовсклеспром» на карте г. Харовск Вологодской области

Технологический процесс деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром» организован таким образом, чтобы максимально использовать сырьевые ресурсы леса, минимизируя отходы и повышая экологическую эффективность производства [8].

В структуре предприятия функционируют четыре основных производственных цеха, каждый из которых отвечает за определённый этап обработки древесины и выпуск специфической продукции.

Проводится краткое описание технологии производства для каждого из них. Используется источник [17].

Первый цех специализируется на производстве пиломатериалов и обработке круглого леса. Здесь осуществляется первичная обработка поступающей древесины, включающая окорку, сортировку и распиловку. Использование высокоточных ленточнопильных и круглопильных станков с числовым программным управлением позволяет получать пиломатериалы различных размеров и сечений, соответствующих стандартам строительной индустрии. Круглый лес проходит сортировку по породам и качеству, после чего направляется на дальнейшую обработку или реализуется на рынке лесоматериалов.

Второй цех специализируется на производстве древесной щепы, которая является ценным сырьём для изготовления плиточных материалов. Технологический процесс включает измельчение древесных отходов и низкосортной древесины на современном оборудовании, таком как барабанные рубильные машины и молотковые дробилки. Полученная щепа подвергается сортировке и очистке от посторонних включений, что обеспечивает высокое качество продукции для дальнейшего использования в производстве древесно-стружечных плит или в качестве топлива.

Третий цех занимается производством древесно-стружечных плит (ДСП) и древесноволокнистых плит средней плотности (МДФ). Технология производства основана на переработке древесной щепы и опилок, которые смешиваются с синтетическими связующими веществами и подвергаются

горячему прессованию под высоким давлением и температурой. Оборудование цеха включает смесительные установки, сушильные комплексы, горячие прессы с программируемым управлением и линии форматной резки. Такие плиты используются в мебельной промышленности, строительстве и производстве отделочных материалов, соответствуя высоким стандартам качества и экологической безопасности.

Четвёртый цех ориентирован на производство фанеры, которая востребована в строительстве, судостроении и изготовлении транспортных средств. Технологический процесс включает лущение бревен на специальных станках для получения тонких слоёв шпона, их сушку, сортировку и склеивание в многослойные плиты. Оборудование цеха представляет собой комплекс лущильных станков, сушильных камер, клеевых машин и горячих прессов. Применение современных адгезивных систем и автоматизированного оборудования обеспечивает высокую прочность и устойчивость фанеры к внешним воздействиям.

Все перечисленные производственные цеха деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром» относятся к I категории надёжности и получают питание от собственных понизительных подстанций 10/0,4 кВ.

Кроме того, на территории предприятия, помимо производственных цехов, также располагаются потребители III категории надёжности: административный корпус и складской корпус.

В результате проведения анализа перспективного развития деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», было установлено, что в рамках стратегии устойчивого развития и расширения ассортимента продукции, на предприятии создаётся новый цех по производству биотоплива.

Технология производства биотоплива основана на переработке древесных отходов и низкосортной древесины в гранулированные и брикетированные виды топлива, такие как пеллеты и брикеты. Данный вид

продукции востребован на внутреннем и внешнем рынках благодаря своей экологичности и высокой энергетической эффективности.

Технологический процесс в новом цехе начинается с предварительной подготовки сырья, где древесные отходы и щепа измельчаются до необходимых размеров на дробильных установках.

Затем сырьё подвергается сушке в сушильных агрегатах с контролем влажности, что является критически важным для качества конечного продукта.

Высушенный материал поступает в грануляторы или брикетные прессы, где под высоким давлением и температурой формируются пеллеты или брикеты. Оборудование цеха включает высокопроизводительные дробилки, сушильные комплексы с автоматизированным управлением, прессовые установки последнего поколения и системы охлаждения и упаковки готовой продукции.

Внедрение данного цеха позволит эффективно использовать древесные отходы предприятия, снижая экологическую нагрузку и создавая дополнительную стоимость из ранее неиспользуемых ресурсов.

Кроме того, производство биотоплива способствует сокращению выбросов парниковых газов при использовании его в качестве замены традиционных ископаемых видов топлива, что соответствует современным тенденциям в области экологической ответственности и энергосбережения.

Таким образом, комплексный и рациональный подход к организации производственных процессов и использование передовых технологий позволяет ООО «Харовсклеспром» занимать лидирующие позиции в отрасли.

Предприятие обеспечивает высокое качество продукции, соответствующее международным стандартам, и активно развивает новые направления, отвечая на потребности рынка и глобальные вызовы в сфере устойчивого развития и экологической безопасности.

Исходные технические характеристики подразделений деревообрабатывающего предприятия представлены в форме таблицы 1.

Таблица 1 – Исходные технические характеристики подразделений деревообрабатывающего предприятия

Наименование подразделения	P_m , кВт	Подразделение новое/существующее	Категория надёжности
Цех по производству пиломатериалов и обработке круглого леса	200,0	Существующее	I
Цех по производству древесной щепы	200,0	Существующее	I
Цех по производству ДСП и МДФ	200,0	Существующее	I
Цех по производству фанеры	100,0	Существующее	I
Цех по производству биотоплива	200,0	Новое	I
Складской корпус	50,0	Существующее	III
Административный корпус	50,0	Существующее	III
Всего по предприятию	1000,0	Существующее – 6, новое – 1	I, III

Приведённые данные являются основанием для расчёта электрических нагрузок далее.

1.2 Характеристика существующей схемы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия

Рассматривается характеристика существующей схемы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром».

Питание существующей схемы объекта исследования осуществляется от распределительного пункта напряжением 10 кВ (РП-10 кВ).

Конструктивно питающий РП-10 кВ выполнен в виде закрытого распределительного устройства с применением ячеек типа КРУ-10 кВ внутренней установки. Питание РП-10 кВ осуществляется от понизительной подстанции «Арбузиха» 35/10 кВ (посёлок Арзубиха, Харовский район) энергосистемы на напряжении 10 кВ двумя кабельными линиями марки АПвБПнг(А)-HF 3×70/16.

РП-10 кВ выполнено по схеме «Схема с одной системой сборных шин, секционированная выключателем» [19].

Такая схема электрических соединений обладает рядом значительных преимуществ в электрических сетях среднего напряжения.

Далее перечисляются её основные преимущества.

«Во-первых, такая конфигурация повышает надежность электроснабжения за счет возможности изолировать поврежденный участок без прекращения подачи электроэнергии на остальные секции.

Секционирование сборных шин позволяет оперативно отключать только ту часть системы, где произошло нарушение, что минимизирует время простоя и снижает негативное воздействие на потребителей.

Во-вторых, эта схема обеспечивает гибкость в управлении и эксплуатации электрической сети.

Наличие секционного выключателя позволяет проводить плановые ремонтные работы и техническое обслуживание на отдельных участках без полного обесточивания объекта.

Данный аспект существенно упрощает организацию ремонтных мероприятий и повышает общую эффективность эксплуатации оборудования» [13].

Кроме того, схема с одной системой сборных шин, секционированная выключателем, экономически более выгодна по сравнению с более сложными конфигурациями, такими как схема с двумя системами шин.

Рассматриваемая схема требует меньших капитальных вложений в оборудование и инфраструктуру, снижает затраты на монтаж и обслуживание, при этом обеспечивая достаточный уровень надежности и функциональности для большинства применений.

С точки зрения безопасности, такая схема способствует повышению оперативности реагирования на аварийные ситуации.

Возможность быстрого отключения поврежденной секции снижает риски повреждения оборудования и повышает безопасность персонала.

Также упрощается реализация селективной защиты, что способствует более точному и эффективному функционированию релейной защиты и автоматики.

Таким образом, схема с одной системой сборных шин, секционированная выключателем, представляет собой оптимальное решение для распределительных сетей, сочетая в себе простоту, надежность и экономическую эффективность.

Она позволяет обеспечить высокое качество электроснабжения, гибкость управления и снижение эксплуатационных затрат, что отвечает современным требованиям к энергетической инфраструктуре.

Следовательно, данная схема не нуждается в замене на рассматриваемом объекте.

Далее проводится характеристика основного оборудования питающего РП-10 кВ.

В нём находится следующее коммутационное и защитное оборудование: выключатели высокого напряжения марки ВБ-10, трансформаторы напряжения марки НАМИТ-10, трансформаторы тока марки ТОЛ-СЭЩ-10, ограничители перенапряжения марки ОПН-П-10.

Всё перечисленное оборудование установлено в ячейках типа КРУ (КРУ-ЗЕТО-10).

Таким образом установлено, что всё оборудование, находящееся в исходной схеме РП-10 кВ, является новым и современным, находится в хорошем техническом состоянии, поэтому не требует замены на новые модификации.

В результате проведения анализа установлено, что к потребителям питающего РП-10 кВ относятся понизительные трансформаторные подстанции (далее – ТП-10/0,4 кВ), питающие промышленные объекты схемы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», которые имеют различную мощность и категории надёжности [10].

Питание потребителей указанных распределительных ТП-10/0,4 кВ от РП-10 кВ осуществляется на напряжении 10 кВ кабельными линиями марки АПвБПнг(А)-HF 3×50/16.

Все цеховые распределительные ТП-10/0,4 кВ выполнены с применением двух силовых трансформаторов марки ТМГ-110/10, которые понижают напряжение 10 кВ до уровня 0,4 кВ (на шинах РУ-0,4 кВ подстанций) для передачи в сеть потребителей на напряжении 0,38/0,22 кВ.

Характеристика распределительных ТП-10/0,4 кВ исходной схемы системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика распределительных ТП-10/0,4 кВ исходной схемы системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром»

Номер ТП-10/0,4 кВ	Наименование подразделений, получающих питание от ТП-10/0,4 кВ	Количество трансформаторов на ТП-10/0,4 кВ, шт.	Марка трансформаторов на ТП-10/0,4 кВ	Число кабельных линий 10 кВ для питания ТП-10/0,4 кВ от РП-10 кВ	Марка кабельных линий 10 кВ для питания ТП-10/0,4 кВ от РП-10 кВ
ТП-1	Цех по производству пиломатериалов и обработке круглого леса	2	ТМГ-100/10	2	АПвБПнг(А)-HF 3×50/16
ТП-2	Цех по производству древесной щепы	2	ТМГ-100/10	2	АПвБПнг(А)-HF 3×50/16
ТП-3	Цех по производству ДСП и МДФ	2	ТМГ-100/10	2	АПвБПнг(А)-HF 3×50/16
ТП-4	Цех по производству фанеры, складской корпус, административный корпус	2	ТМГ-100/10	2	АПвБПнг(А)-HF 3×50/16

На всех цеховых ТП-10/0,4 кВ на стороне 10 кВ установлены выключатели нагрузки марки ВНА-10 и предохранители марки ПК-10,

которые находятся в хорошем техническом состоянии, следовательно, не нуждаются в замене.

Установлено, что фактическая нагрузка потребителей увеличилась (вследствие ввода в работу новых потребителей цеха по производству биотоплива).

Так как данный объект относится к I категории надёжности, он требует двух независимых источников питания, следовательно, для реализации данной задачи в работе планируется соорудить новую цеховую ТП-5, куда подключить все потребители данного производственного цеха.

С учётом этого, необходимо провести реконструкцию схемы электрических соединений РП-10 кВ, введя в эксплуатацию новые ячейки потребителей в количестве двух единиц.

Далее в работе необходимо провести проверку правильности выбора всех решений.

Выводы по разделу.

В результате проведения анализа исходных данных установлено, что в структуре предприятия функционируют четыре основных производственных цеха, каждый из которых отвечает за определённый этап обработки древесины и выпуск специфической продукции.

Все перечисленные производственные цеха относятся к I категории надёжности и получают питание от собственных понизительных подстанций 10/0,4 кВ, получающих питание от РП-10 кВ кабельными линиями марки АПвБПнг(А)-НГ 3×50/16.

Все цеховые распределительные ТП-10/0,4 кВ выполнены с применением двух силовых трансформаторов марки ТМГ-110/10.

Кроме того, на территории предприятия, помимо производственных цехов, также располагаются потребители III категории надёжности: административный корпус и складской корпус, питающиеся от шин 0,4 кВ цеховой ТП-4 одной кабельной линией.

Показано, что схема питающего РП-10 кВ с одной системой сборных шин, секционированная выключателем, удовлетворяет требованиям по надёжности для питания всех потребителей предприятия. Таким образом, она не нуждается в замене.

Установлено, что всё оборудование питающего РП-10 кВ и цеховых ТП-10/0,4 кВ находится в хорошем техническом состоянии, следовательно, оно не нуждается в замене.

В результате проведения анализа перспективного развития деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», было установлено, что в рамках стратегии устойчивого развития и расширения ассортимента продукции, на предприятии создаётся новый цех по производству биотоплива.

Так как данный объект относится к I категории надёжности, он требует двух независимых источников питания, следовательно, для реализации данной задачи в работе планируется соорудить новую цеховую ТП-5, куда подключить все потребители данного производственного цеха.

С учётом этого, необходимо провести реконструкцию схемы электрических соединений РП-10 кВ, введя в эксплуатацию новые ячейки потребителей в количестве двух единиц.

На основании приведённой информации, далее в работе проводится выбор соответствующих решений и их техническое подтверждение.

2 Расчёт электрических нагрузок

Расчёт электрических нагрузок системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром» является ключевым этапом при реконструкции энергетической инфраструктуры предприятия.

Актуальность данной задачи обусловлена расширением производства, вводом новых технологических мощностей и необходимостью обеспечения надёжного и эффективного электроснабжения всех потребителей.

Анализ и определение электрических нагрузок позволяют оптимально спроектировать систему электроснабжения, учитывая специфические потребности каждого цеха и участка.

«Данный аспект способствует рациональному распределению электроэнергии, предотвращению возможных перегрузок и повышению общей энергоэффективности предприятия.

Кроме того, расчёт нагрузок обеспечивает соответствие системы нормативным требованиям и стандартам безопасности, что является обязательным условием для успешной эксплуатации и получения необходимых разрешений от контролирующих органов.

Важность данного расчёта заключается в возможности выбора оптимальных технических решений при подборе оборудования, таких как силовые трансформаторы, проводники, коммутационные аппараты и системы релейной защиты, что позволяет снизить капитальные и эксплуатационные затраты, обеспечить долговечность работы оборудования, а также минимизировать риски аварийных ситуаций, способных привести к остановке производственных процессов и существенным финансовым потерям [12].

Результаты расчёта электрических нагрузок служат основой для последующих этапов проектирования системы электроснабжения.

На их основе проводится выбор и проверка силовых трансформаторов на подстанциях, определяются сечения проводников и параметры коммутационных аппаратов, разрабатываются схемы релейной защиты и автоматики.

Кроме того, результаты расчёта нагрузок необходимы для проведения расчётов токов короткого замыкания, что важно для обеспечения безопасности и надёжности работы сети.

Дальнейшее использование результатов расчёта позволяет планировать развитие предприятия с учётом возможного увеличения нагрузок в будущем (в перспективе).

Такой подход обеспечивает гибкость системы электроснабжения и возможность её модернизации без существенных затрат и рисков для стабильной работы производственных процессов.

Таким образом, расчёт электрических нагрузок является фундаментальным инструментом для стратегического планирования и устойчивого развития деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром».

«Активная нагрузка присоединений деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», кВт» [6]:

$$P_p = P_n \cdot K_c, \quad (1)$$

где P_m – «максимальная проектная активная нагрузка предприятия, кВт;
 K_c – коэффициент спроса» [6].

«Полная нагрузка присоединений деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», кВА» [6]:

$$S_p = \frac{P_p}{\cos \varphi}. \quad (2)$$

«Реактивная нагрузка присоединений деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», квар» [6]:

$$Q_P = \sqrt{S_P^2 - P_P^2}. \quad (3)$$

«Суммарные групповые нагрузки деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром»» [6]:

$$P_{P.\Sigma} = \sum P_P. \quad (4)$$

$$Q_{P.\Sigma} = \sum Q_P. \quad (5)$$

$$S_{P.\Sigma} = \sqrt{P_{P.\Sigma}^2 + Q_{P.\Sigma}^2}. \quad (6)$$

«Групповой коэффициент активной мощности» [6]:

$$\cos \varphi = \frac{P_P}{S_P}. \quad (7)$$

«Расчёт нормальных и максимальных рабочих токов» [6]:

$$I_{в.нр} = \frac{S_{нр}}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном.}}, \quad (8)$$

где n – «количество линий, шт.;

$S_{нр}$ – мощность присоединения, кВА;

$U_{ном.}$ – напряжение присоединения, кВ» [6].

«Максимальный рабочий ток присоединений» [6]:

$$I_{нр.макс} = 1,4 \cdot I_{в.нр}, A. \quad (9)$$

Расчёт токов всех присоединений проводится на сторонах 10 кВ и 0,4 кВ с целью полной подготовки данных для дальнейшего выбора проводников и аппаратов на объекте проектирования (по значениям нормального и максимального токов на сторонах 10 кВ и 0,4 кВ).

«Расчёт нагрузки объектов системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия проводятся на примере цеха по производству пиломатериалов и обработке круглого леса» [17].

Расчётные активная, полная и реактивная нагрузки присоединения:

$$P_p = 200 \cdot 0,8 = 160 \text{ кВт},$$

$$S_p = \frac{160}{0,94} = 170,2 \text{ кВА},$$

$$Q_p = \sqrt{170,2^2 - 160^2} = 58 \text{ квар}.$$

С учётом распределения нагрузок всех присоединений по двум равноценным линиям, расчётный ток на стороне 10 кВ для каждого присоединения:

$$I_{в.пр.10} = \frac{170,2}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} \approx 4,9 \text{ А}.$$

Максимальный ток данного присоединения:

$$I_{пр.макс.10} = 1,4 \cdot 4,9 = 6,9 \text{ А}.$$

Аналогично на стороне 0,4 кВ для данного присоединения:

$$I_{в.пр.0,4} = \frac{170,2}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,38} \approx 129,3 \text{ А},$$

$$I_{пр. макс. 0,4} = 1,4 \cdot 129,3 = 181,0 \text{ А.}$$

Электрические расчётные нагрузки остальных присоединений деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром» рассчитаны аналогично с приведением полученных результатов расчёта в таблице 2.

Также в таблице 3 проведён расчёт суммарной нагрузки ТП-4, с учётом того, что от неё получают питание 3 цеха.

Для всех остальных объектов нагрузка питающей ТП-10/0,4 кВ будет соответствовать их суммарной расчётной нагрузке.

Таблица 3 – Результаты расчёта электрических расчётных нагрузок присоединений деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром»

Наименование подразделения (ТП-10/0,4 кВ)	P_m , кВт	K_c , о.е.	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	$I_{в. пр. 10}$, А	$I_{пр. макс. 10}$, А	$I_{в. пр. 0,4}$, А	$I_{пр. макс. 0,4}$, А
Цех по производству пиломатериалов и обработке круглого леса (ТП-1)	200,0	0,8	160,0	58,0	170,2	4,9	6,9	129,3	181,0
Цех по производству древесной щепы (ТП-2)	200,0	0,7	140,0	50,7	148,9	4,3	6,0	113,1	158,4
Цех по производству ДСП и МДФ (ТП-3)	200,0	0,8	160,0	58,0	170,2	4,9	6,9	129,3	181,0
Цех по производству биотоплива (ТП-5)	200,0	0,9	180,0	65,4	191,5	5,5	7,7	145,5	203,7
Цех по производству фанеры (ТП-4)	100,0	0,6	60,0	21,7	63,8	1,9	2,7	48,5	67,9
Складской корпус (ТП-4)	50,0	0,7	35,0	12,6	37,2	1,1	1,6	28,6	40,0
Административный корпус (ТП-4)	50,0	0,6	30,0	10,8	31,9	0,9	1,3	24,2	33,9
Всего по ТП-4	200,0	-	125,0	45,1	132,9	3,8	5,4	101,0	141,4
Всего по предприятию (вводы 10 кВ и 0,4 кВ объекта)	1000,0	0,765	765,0	277,2	813,7	23,5	32,9	618,1	865,3

Полученные в работе результаты расчёта электрических расчётных нагрузок присоединений деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром» используются при выборе силовых трансформаторов

цеховых ТП-10/0,4 кВ, а также сечений кабелей и проводников питающей сети 10 кВ и 0,38/0,22 кВ.

Кроме того, они используются при выборе и проверке коммутационных и защитных электрических аппаратов.

Выводы по разделу.

Осуществлён расчёт максимальных индивидуальных нагрузок всех присоединений, а также групповых расчётных нагрузок секций сборных шин и всей системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром».

Также проведён расчёт суммарной нагрузки ТП-4, с учётом того, что от неё получают питание 3 цеха.

Для всех остальных объектов нагрузка питающей ТП-10/0,4 кВ будет соответствовать их суммарной расчётной нагрузке.

3 Выбор и проверка силовых трансформаторов на подстанциях

«Известно, что силовые трансформаторы распределительной сети 10/0,4 кВ играют ключевую роль в процессе преобразования напряжения, обеспечивая передачу электроэнергии от высоковольтных сетей к низковольтным потребителям с минимальными потерями и высоким уровнем безопасности. Поэтому правильный выбор трансформаторов на распределительных подстанциях 10/0,4 кВ особенно важен с учётом условий эксплуатации деревообрабатывающего предприятия, где высокие требования к надёжности оборудования обусловлены необходимостью непрерывного функционирования технологических процессов.

Однако неправильный выбор трансформаторов может стать причиной перегрузок, быстрого износа, снижения коэффициента полезного действия, что в конечном итоге может привести к авариям и значительным экономическим потерям, а также поставить под угрозу экологическую безопасность. Поэтому для предотвращения таких ситуаций важно учитывать особенности технологического процесса и условия эксплуатации, чтобы обеспечить максимальную эффективность и надёжность работы трансформаторов [17].

Кроме того, необходимо учитывать перспективы развития производства и возможное увеличение нагрузок. Выбор трансформаторов с запасом мощности предоставляет возможность расширения производственных мощностей без необходимости замены оборудования, что повышает экономическую эффективность проекта на длительный срок.

Таким образом, выбор и проверка трансформаторов распределительных подстанций 10/0,4 кВ представляют собой важнейшую часть комплексного подхода к проектированию системы электроснабжения нового деревообрабатывающего предприятия. Такой подход не только обеспечивает соответствие оборудования современным стандартам, но и способствует устойчивому развитию предприятия.

Ранее в работе было установлено, что в исходной схеме системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром» находилось 4 распределительных цеховых ТП-10/0,4 кВ.

Все цеховые распределительные ТП-10/0,4 кВ выполнены с применением двух силовых трансформаторов марки ТМГ-110/10.

Кроме того, на территории предприятия, помимо производственных цехов, также располагаются потребители III категории надёжности: административный корпус и складской корпус, питающиеся от шин 0,4 кВ цеховой ТП-4 одной кабельной линией.

Таким образом, в работе необходимо проверить мощность данных трансформаторов установленной нагрузке потребителей, которые от них получают питание.

В результате проведения анализа перспективного развития деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», было установлено, что в рамках стратегии устойчивого развития и расширения ассортимента продукции, на предприятии создаётся новый цех по производству биотоплива.

Так как данный объект относится к I категории надёжности, он требует двух независимых источников питания, следовательно, для реализации данной задачи в работе планируется соорудить новую цеховую ТП-5, куда подключить все потребители данного производственного цеха.

Следовательно, требуется выбрать мощность новой двухтрансформаторной ТП-10/0,4 кВ (ТП-5).

«Мощность трансформаторов для установки на ТП-10/0,4 кВ» [13]:

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р}} = \frac{\sum P_p}{N\beta_T}, \quad (10)$$

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

N – количество трансформаторов цеховой ТП, шт.;

β_m – нормируемое значение коэффициента активной загрузки трансформаторов подстанции» [13].

«На примере ТП-1» [13]:

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р}} = \frac{160}{2 \cdot 0,85} = 94,1 \text{ кВА}.$$

«Исходя из результатов расчёта, на ТП-1 системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», выбраны два силовых трансформатора ТМГ-100/10» [18].

Они совпадают с трансформаторами, которые были установлены на данной подстанции в исходной схеме.

Далее проводится проверка выбранных трансформаторов.

«Проверка позволяет убедиться в том, что технические параметры трансформаторов соответствуют расчётным нагрузкам и условиям эксплуатации, что предотвращает возможные риски отказов и аварийных ситуаций.

Кроме того, проверка обеспечивает оптимизацию затрат на эксплуатацию за счёт выбора оборудования с наилучшим соотношением цены и качества, а также снижает эксплуатационные расходы благодаря повышенной энергоэффективности и надёжности.

Важным аспектом является обеспечение надёжности электроснабжения потребителей первой категории, к которым относятся основные технологические объекты предприятия.

Отказ одного трансформатора на цеховых ТП-10/0,4 кВ деревообрабатывающего предприятия может привести к остановке производственных процессов, что повлечёт значительные экономические потери и возможные экологические последствия.

Поэтому трансформаторы должны обладать высокой надёжностью, а система должна предусматривать возможность резервирования и быстрого восстановления электроснабжения» [12].

«Условия проверки трансформаторов на перегрузочную способность в нормальном и послеаварийном режимах работы цеховых ТП-10/0,4 кВ» [4]:

$$K_{з.н} = \frac{0,5 \cdot S_{м.}}{S_{ном.т}} \leq 0,8 - 0,85, \quad (11)$$

$$K_{з.п} = \frac{S_{м.знп}}{S_{ном.т}} \leq 1,6 - 1,7. \quad (12)$$

«Проверка трансформаторов цеховой ТП-1 в нормальном режиме выполняется» [4]:

$$K_{з.н} = \frac{0,5 \cdot 170,2}{100} \approx 0,85 = 0,85.$$

«Проверка трансформаторов цеховой ТП-1 в послеаварийном режиме также выполняется» [4]:

$$K_{з.п} = \frac{170,2}{100} = 1,7 = 1,7.$$

«Таким образом, трансформаторы марки ТМГ-100/10, установленные на цеховой ТП-1, полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к их системе охлаждения по нагрузочной способности, что подтверждает их пригодность для установки на данной подстанции деревообрабатывающего предприятия» [20].

«Аналогично выбраны марки и типы трансформаторов для установки на остальных ЦТП-10/0,4 кВ» [13]

Результаты выбора представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты выбора трансформаторов на ТП-10/0,4 кВ

Наименование подразделения	Номер ТП	P_{Σ} , кВА	Число трансформаторов, шт.	Марка трансформаторов
Цех по производству пиломатериалов и обработке круглого леса	ТП-1	160,0	2	2хТМГ-100/10
Цех по производству древесной щепы	ТП-2	140,0	2	2хТМГ-100/10
Цех по производству ДСП и МДФ	ТП-3	160,0	2	2хТМГ-100/10
Цех по производству фанеры	ТП-4	60,0+35+ +30 =125	2	2хТМГ-100/10
Складской корпус				
Административный корпус				
Цех по производству биотоплива	ТП-5	180,0	2	2ТМГ-100/10
Всего по предприятию	5 ТП-10/0,4 кВ	765,0	10	10

Все трансформаторы проверены на перегрузочную способность и удовлетворяют ей.

Выводы по разделу.

В результате выбора силовых трансформаторов цеховых ТП-10/0,4 кВ деревообрабатывающего предприятия, обосновано применение в системе электроснабжения предприятия четырёх двухтрансформаторных распределительных подстанций, которые были установлены в исходной схеме электроснабжения объекта, а также выбраны новые силовые трансформаторы для установки на ТП-5, питающей потребители цеха по производству биотоплива.

Таким образом, на цеховых ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», устанавливаются следующие силовые трансформаторы:

- на ТП-1: два силовых трансформатора марки ТМГ-100/10;
- на ТП-2: два силовых трансформатора марки ТМГ-100/10;
- на ТП-3: два силовых трансформатора марки ТМГ-100/10;
- на ТП-4: два силовых трансформатора марки ТМГ-100/10;
- на ТП-5: два силовых трансформатора марки ТМГ-100/10.

4 Расчёт токов короткого замыкания, выбор и проверка проводников и аппаратов

4.1 Расчёт токов короткого замыкания

«Токи короткого замыкания вызывают значительные электродинамические и термические нагрузки на проводники, трансформаторы, коммутационные аппараты и другие элементы электрической сети. Пренебрежение данными расчётами при выборе сечений проводников и параметров оборудования может привести к серьёзным последствиям, включая выход из строя оборудования системы и угрозу для безопасности персонала. Поэтому расчёт токов короткого замыкания является критически важным для предотвращения аварийных ситуаций и обеспечения безопасности эксплуатации системы электроснабжения.

Кроме того, расчёт токов короткого замыкания необходим для того, чтобы система электроснабжения соответствовала нормативным требованиям и стандартам, регламентирующим параметры электрических сетей.

На деревообрабатывающем предприятии, правильный расчёт токов короткого замыкания способствует повышению энергоэффективности.

Таким образом, расчёт токов короткого замыкания является важной частью комплексного подхода к проектированию и эксплуатации энергетической инфраструктуры деревообрабатывающего предприятия, способствуя обеспечению электробезопасности и надёжности работы системы, а также повышению её эффективности.

Питание РП-10 кВ осуществляется от понизительной подстанции «Арбузиха» 35/10 кВ (посёлок Арзубиха, Харовский район) энергосистемы на напряжении 10 кВ двумя кабельными линиями марки АПвБПнг(А)-НГ 3×70/16» [19].

Также установлено, что на районной ПС-35/10 кВ находятся два силовых трансформатора марки ТМ-4000/35.

В процессе расчёта токов короткого замыкания принимается наиболее тяжёлый послеаварийный режим, при котором электроснабжение осуществляется через одну питающую линию 35 кВ с использованием одного силового трансформатора на питающей районной понижающей подстанции 35/10 кВ «Арбузиха» и распределительной подстанции 10/0,4 кВ.

Однолинейная схема, используемая для расчёта токов короткого замыкания на предприятии, представлена на рисунке 2.

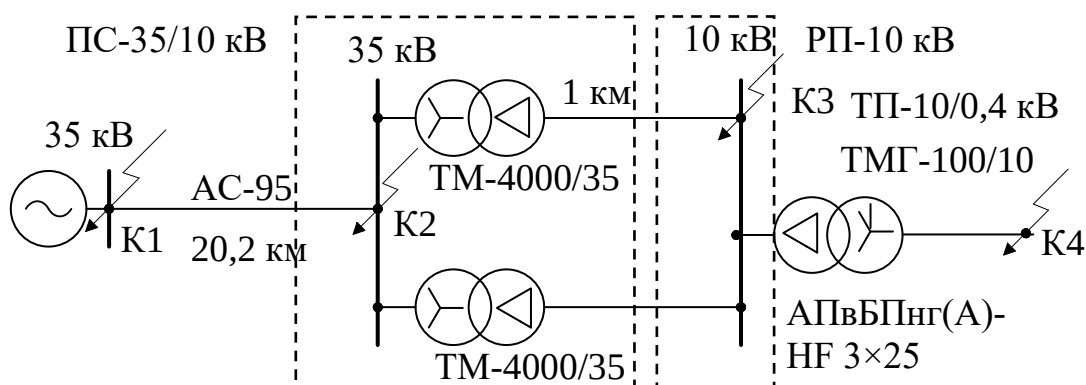


Рисунок 2 – Однолинейная схема, используемая для расчёта токов короткого замыкания на предприятии

На рисунке 3 представлена эквивалентная схема замещения, используемая для расчёта токов короткого замыкания на предприятии.

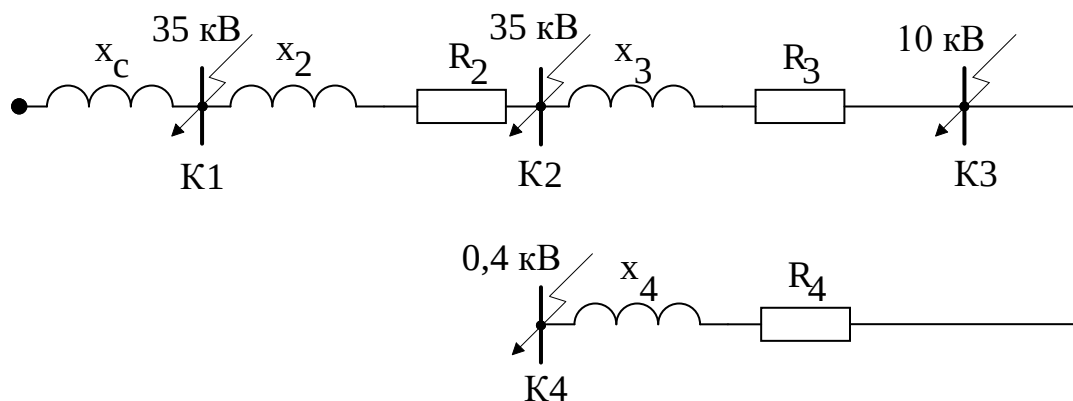


Рисунок 3 – Эквивалентная схема замещения, используемая для расчёта токов короткого замыкания на предприятии

«Расчет токов трехфазного КЗ выполняется в именованных единицах, принимается $U_0 = 35$ кВ» [11].

«Сопротивление системы» [11]:

$$X_c = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot I_{кл.макс}^{(3)}}, \quad (13)$$

$$X_c = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 1,5} = 13,47 \text{ Ом}.$$

«Сопротивления питающей линии электропередачи» [11]:

$$R_2 = r_{y0} \cdot L, \quad (14)$$

$$X_2 = x_{y0} \cdot L, \quad (15)$$

где x_{y0} – «удельное сопротивление ВЛ, Ом/км;

L - суммарная длина ВЛ, км» [11].

«Для питающей линии 35 кВ» [11]:

$$R_2 = 0,37 \cdot 20,2 = 7,47 \text{ Ом}.$$

$$X_2 = 0,385 \cdot 20,2 = 7,78 \text{ Ом}.$$

«Активное сопротивление трансформатора питающей ПС-35/10 кВ «Арбузиха»» [11]:

$$R_{m.n} = \frac{\Delta P_{\kappa} \cdot 10^{-3} \cdot U_n^2}{S_{ном.т.}^2}. \quad (16)$$

Для условий питающей ПС-35/10 кВ «Арбузиха»:

$$R_{3cp} = \frac{33,5 \cdot 10^{-3} \cdot 35^2}{4^2} = 2,56 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление трансформатора ПС-35/10 кВ «Арбузиха»:

$$X_{m.n} = \frac{U_{к.ср.\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{ном.т.}^2}. \quad (17)$$

Для условий питающей ПС-35/10 кВ «Арбузиха»:

$$X_{3cp} = \frac{7,5 \cdot 35^2}{100 \cdot 4^2} = 22,97 \text{ Ом.}$$

«Суммарное активное сопротивление до точки К2» [11]:

$$\begin{aligned} R_{\Sigma} &= R_{c.2}, \text{ Ом,} \\ R_{\Sigma} &= 7,47 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (18)$$

«Суммарное индуктивное сопротивление до точки К2» [11]:

$$\begin{aligned} X_{\Sigma} &= X_{c.2}, \text{ Ом,} \\ X_{\Sigma} &= 21,25 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (19)$$

«Суммарное полное сопротивление до точки К2» [11]:

$$\begin{aligned} Z_{\Sigma} &= \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}. \\ Z_{\Sigma} &= \sqrt{7,47^2 + 21,25^2} = 22,52 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (20)$$

«Ток трехфазного короткого замыкания» [11]:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}}, A. \quad (21)$$

«Ток трёхфазного КЗ точке К2» [11]:

$$I_{\kappa 2}^{(3)} = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 22,52} = 0,897 \text{ кА}.$$

«Значение ударного тока короткого замыкания необходимо для расчёта механических сил, действующих на элементы электрической сети, такие как шины, кабели, трансформаторы и выключатели. Превышение допустимых нагрузок может привести к повреждению оборудования, выходу его из строя и созданию опасных ситуаций для персонала и окружающей среды. Поэтому точное определение ударного тока является ключевым фактором при реконструкции системы электроснабжения объекта исследования» [16].

«Ударный ток короткого замыкания» [11]:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{\text{уд}} \cdot I_{\kappa}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (22)$$

где « $\kappa_{\text{уд}}$ – ударный коэффициент тока короткого замыкания» [11].

«Ударный коэффициент» [11]:

$$\kappa_{\text{уд}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3}{X_{\Sigma}/R_{\Sigma}}}. \quad (23)$$

«Для расчётной точки К2» [11]:

$$\kappa_{\text{уд.к2}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3}{21,25/7,47}} = 1,36,$$

$$i_{уд.к2} = \sqrt{2} \cdot 1,36 \cdot 0,897 = 1,727 \text{ кА}.$$

«Аналогично определены токи КЗ в расчётных точках схемы замещения К3 и К4.

Результаты данного расчета токов короткого замыкания и ударных токов» [11] сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты расчёты токов КЗ

Параметр	Точка КЗ		
	К2 (35 кВ)	К3 (10 кВ)	К4 (0,38 кВ)
$I_{к(3)}$, кА	0,897	1,486	0,408
$i_{уд}$, кА	1,727	3,185	0,577

«Полученные в работе значения тока КЗ и ударного тока используются при проверке и проверке оборудования на термическую и электродинамическую устойчивость, а также для проверки высоковольтных выключателей на отключающую способность, подтверждая их работоспособность [10].

Выводы по разделу.

Расчётным путём определено, что значения трёхфазного тока КЗ и ударного тока в расчётных точках схемы, будут составлять, соответственно:

- на выводах РУ-35 кВ питающей ПС-35/10 кВ «Арбузиха»: 0,897 кА и 1,727 кА;
- на выводах питающего РП-10 кВ: 1,486 кА и 3,185 кА;
- на выводах 0,4 кВ силовых трансформаторов цеховых ТП-10/0,4 кВ: 0,408 кА и 0,577 кА.

Рассчитанные значения тока КЗ и ударного тока используются при проверке оборудования на термическую и электродинамическую устойчивость, а также для проверки высоковольтных выключателей на отключающую способность.

4.2 Выбор и проверка проводников

Питание РП-10 кВ осуществляется от ПС-35/10 кВ «Арбузиха» энергосистемы двумя кабельными линиями марки АПвБПнг(А)-HF 3×70/16. Данную кабельную линию необходимо проверить в работе.

Все цеховые 10/0,4 кВ получают питание от РП-10 кВ кабельными линиями марки АПвБПнг(А)-HF 3×50/16. Данные кабельные линии также необходимо проверить в работе.

Также было установлено, что в системе электроснабжения предприятия выбрана ТП-5, питающая новый цех по производству биотоплива.

Для её питания от РП-10 кВ предприятия необходимо выбрать и проверить новую кабельную линию.

После реконструкции схемы электрических соединений, предлагается использовать кабели марки АПвБПнг(А)-HF [3], показанные на рисунке 4.



Рисунок 4 – «Кабель марки АПвБПнг(А)-HF» [4]

Применение кабелей марки АПвБПнг(А)-HF в питающей сети напряжением 10 кВ деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром» является технически обоснованным решением, учитывающим специфику производственной среды и повышенные требования к безопасности и надёжности электроснабжения, а также к удобству эксплуатации сетей [9].

Кабель АПвБПнг(А)-HF представляет собой силовой кабель с алюминиевой жилой, изоляцией из сшитого полиэтилена, бронёй из стальных лент и негорючей оболочкой, не содержащей галогенов.

Изоляция из сшитого полиэтилена обеспечивает высокие электрические характеристики, устойчивость к повышенным температурам и электрическим полям, что особенно важно при эксплуатации на напряжении 10 кВ.

Такой кабель гарантирует длительный срок службы без ухудшения своих свойств, снижая затраты на обслуживание и замену.

Бронированная конструкция с использованием стальных лент обеспечивает защиту от механических повреждений, что особенно актуально в условиях промышленного предприятия, где возможны вибрации, удары и другие механические воздействия.

Высокая надёжность системы электроснабжения достигается за счёт предотвращения возможных аварий и простоев в производстве.

Негорючие свойства кабеля АПвБПнг(А)-HF имеют критическое значение для деревообрабатывающего предприятия, где присутствует повышенный риск возгорания из-за наличия древесной пыли и других горючих материалов.

Отсутствие галогенов в материалах предотвращает выделение токсичных и коррозионно активных газов при высоких температурах, что обеспечивает безопасность персонала и сохранность оборудования в случае пожара.

Таким образом, выбор кабеля АПвБПнг(А)-HF для питающей сети 10 кВ деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром» обоснован с точки зрения технических характеристик, безопасности, экономической эффективности и соответствия нормативным требованиям.

Данное решение способствует повышению надёжности и эффективности системы электроснабжения, обеспечивает безопасные

условия труда и поддерживает устойчивое развитие предприятия в долгосрочной перспективе.

Приводится методика выбора и практический выбор и проверка кабеля 10 кВ, который питает РП-10 кВ от ПС-35/10 кВ «Арбузиха».

«По экономической плотности тока» [5]:

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

где « $j_{\text{э}}$ – экономическая плотность тока, А/мм²» [5].

«Проверка выбранного сечения кабеля в нормальном режиме» [5]:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{р.}}, \quad (25)$$

где « $I_{\text{доп}}$ – предельно – допустимое значение тока проводника, А» [10].

«Проверка кабеля в послеаварийном режиме работы» [5]:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{р.макс}}, \quad (26)$$

где « $I_{\text{р.макс}}$ – максимальный ток, А» [5].

«Проверка кабеля по климатическим условиям» [5]:

$$F_{\text{ст}} \geq F_{\text{мин}}, \text{ мм}^2. \quad (27)$$

«Проводится выбор кабеля питающей линии 10 кВ (от шин 10 кВ ПС-35/10 кВ «Арбузиха» до шин РП-10 кВ деревообрабатывающего предприятия) по приведённым ранее условиям» [5]:

$$F_9 = \frac{23,5}{1,4} = 16,8 \text{ мм}^2.$$

«Условия проверки сечения питающей КЛ-10 кВ соблюдены» [5]:

$$212 \text{ А} \geq 23,5 \text{ А},$$

$$212 \text{ А} \geq 32,9 \text{ А},$$

$$70 \text{ мм}^2 \geq 25 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, для питающей линии 10 кВ (от шин 10 кВ ПС-35/10 кВ «Арбузиха» до шин РП-10 кВ деревообрабатывающего предприятия), подтверждено применение кабеля марки АПвБПнг(А)-НФ 3×70/16 [3].

«Сечение КЛ остальных линий 10 кВ деревообрабатывающего предприятия выбраны аналогично» [14] и представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты выбора сечения кабельных линий 10 кВ

Линия	I_p , А	$I_{p.max}$, А	Марка кабеля	$I_{дон}$, А
Питающая сеть 10 кВ				
Питающая КЛ-10 кВ - ввод 1 (от шин 10 кВ ПС-35/10 кВ «Арбузиха» до шин РП-10 кВ предприятия)	23,5	32,9	АПвБПнг(А)-НФ 3×70/16	212
Питающая КЛ-10 кВ – ввод 2 (от шин 10 кВ ПС-35/10 кВ «Арбузиха» до шин РП-10 кВ предприятия)	23,5	32,9	АПвБПнг(А)-НФ 3×70/16	212
Распределительная сеть 10 кВ				
Питающий РП-10 – ТП-1	4,9	6,9	АПвБПнг(А)-НФ 3×50/16	154
Питающий РП-10 – ТП-2	4,3	6,0	АПвБПнг(А)-НФ 3×50/16	154
Питающий РП-10 – ТП-3	4,9	6,9	АПвБПнг(А)-НФ 3×50/16	154
Питающий РП-10 – ТП-4	3,8	5,4	АПвБПнг(А)-НФ 3×50/16	154
Питающий РП-10 – ТП-5	5,5	7,7	АПвБПнг(А)-НФ 3×50/16	154

Таким образом, для питания РП-10 кВ от ПС-35/10 кВ «Арбузиха» энергосистемы подтверждено применение кабелей марки АПвБПнг(А)-НФ 3×70/16.

Для питания цеховых ТП-10/0,4 кВ (ТП1-ТП4) от РП-10 кВ, обосновано применение силовых кабелей марки АПвБПнг(А)-НФ 3×50/16.

4.3 Выбор и проверка электрических аппаратов

Ранее в работе было установлено, что на питающем РП-10 кВ находится следующее коммутационное и защитное оборудование: выключатели высокого напряжения марки ВБ-10, трансформаторы напряжения марки НАМИТ-10, трансформаторы тока марки ТОЛ-СЭЩ-10, ограничители перенапряжения марки ОПН-П-10.

Также установлено, что всё оборудование, находящееся в исходной схеме РП-10 кВ, является новым и современным, находится в хорошем техническом состоянии, поэтому не требует замены на новые модификации.

Всё перечисленное оборудование установлено в ячейках типа КРУ (КРУ-ZETO-10).

Таким образом, в работе необходимо провести обоснование применения данного типа ячеек на питающем РП-10 кВ, а также проверить все аппараты, находящиеся в данных ячейках.

Также определено, что на всех цеховых ТП-10/0,4 кВ (ТП1-ТП4) на стороне 10 кВ установлены выключатели нагрузки марки ВНА-10 и предохранители марки ПК-10, которые находятся в хорошем техническом состоянии, следовательно, не нуждаются в замене.

Таким образом, оборудование РУ-10 кВ данных ТП1-ТП4, от которого получает питание исходная нагрузка предприятия, необходимо проверить на соответствие параметрам электрической сети.

Выбору подлежит оборудование РУ-10 кВ новой ТП-5, которая питает цех по производству биотоплива.

Проводится выбор и проверка существующих и новых решений.

«Для РП-10 кВ деревообрабатывающего предприятия принято решение использовать ранее установленное на предприятии вакуумное комплектное распределительное устройство с выкатным элементом КРУ-ZETO-10, произведенное ЗАО «ЗЭТО»» [7].

Данная ячейка показана на рисунке 5.



Рисунок 5 – «Конструктивное выполнение ячейки КРУ-ZETO-10 (ЗАО «ЗЭТО»))» [7]

Применение в распределительном пункте 10 кВ системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром» ячеек КРУ-ZETO-10 производства ЗАО «ЗЭТО» обусловлено их высокими техническими характеристиками, соответствующими требованиям надёжности и безопасности. Комплектные распределительные устройства данного типа обладают модульной конструкцией, что обеспечивает гибкость при проектировании и возможность расширения системы в будущем. Высокий уровень заводской готовности и качество исполнения позволяют сократить сроки монтажа и ввода в эксплуатацию, что особенно важно при модернизации энергетической инфраструктуры предприятия.

«Исходя из выбранных типов ячеек в РП-10 кВ, также приняты решения по выбору вводных, секционных и линейных выключателей марки ВБ-10-ПЗ-ZETO-31,5/2000 (вакуумные)» [7].

Вакуумные выключатели марки ВБ-10-ПЗ-ZETO-31,5/2000, интегрированные в ячейки КРУ-ZETO-10, характеризуются высокой коммутационной износостойкостью и способностью эффективно отключать токи короткого замыкания до 31,5 кА при номинальном токе до 2000 А. Использование вакуумной дугогасительной среды обеспечивает надёжность работы выключателей и минимальные эксплуатационные затраты, так как вакуумные камеры не требуют обслуживания в течение всего срока службы.

Данный выбор является важным для обеспечения бесперебойной работы технологического оборудования предприятия.

«Выбор выключателей по номинальному напряжению» [15]:

$$U_{уст} \leq U_n. \quad (28)$$

«Выбор выключателей по максимальному рабочему току» [15]:

$$I_{раб.макс} \leq I_n. \quad (29)$$

«Проверка выключателя на симметричный ток отключения» [15]:

$$I_{пт} \leq I_{откн}. \quad (30)$$

где $I_{пт}$ – периодическая составляющая тока КЗ;

$I_{откн.н}$ – номинальный ток отключения выключателя, кА» [15].

«Проверка выключателя на отключение асимметричного тока КЗ» [15]:

$$(\sqrt{2} \cdot I_{пт} + i_{ат}) \leq \sqrt{2} \cdot I_{откн.н} (1 + \beta_n), \quad (31)$$

«где $i_{a\tau}$ – значение аperiodической составляющей тока КЗ;
 β_n – номинальное значение аperiodической составляющей КЗ;
 τ – наименьшее время до момента расхождения контактов» [15].

«Наименьшее время от начала КЗ до расхождения контактов» [15]:

$$t = t_{з.мин} + t_{с.в}, \quad (32)$$

«где $t_{з.мин}$ – минимальное время действия релейной защиты, с;
 $t_{с.в}$ – собственное время отключения выключателя, с» [15].

«Проверка на электродинамическую устойчивость» [15]:

$$i_y \leq i_{нр.с}, \quad (33)$$

«где $i_{нр.с}$ – действующее значение предельного сквозного тока КЗ;
 i_y – ударный ток короткого замыкания в цепи выключателя» [15].

«Проверка на термическую стойкость» [15]:

$$B_k \leq I_T^2 t_T, \quad (34)$$

«где B_k – тепловой импульс, $A^2 \cdot c$;
 I_T – ток термической устойчивости, $A^2 \cdot c$;
 t_T – время протекания тока термической устойчивости, с» [15].

«Тепловой импульс короткого замыкания» [15]:

$$B_k = I_k^2 (t_{отк} + T_a). \quad (35)$$

«Результаты выбора выключателей высокого напряжения РП-10 кВ деревообрабатывающего предприятия» [15] представлены в таблице 7.

Таблица 7 – «Результаты выбора выключателей высокого напряжения РП-10 кВ деревообрабатывающего предприятия» [15]

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные
Вводы 1 и 2, выключатели РУ-10 кВ: ВБ-10-ПЗ-ZETO-31,5/2000 (вакуумные)	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 32,9 \text{ А.}$	$I_{ном} = 2000 \text{ А.}$
	$I_{н.т} \leq I_{отк.ном.}$	$I_{н.т} = 1,547 \text{ кА.}$	$I_{отк.ном} = 31,5 \text{ кА.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 3,284 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 31,5 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$B_K = 3,284^2 \cdot 3 = 32,35 \text{ кА}^2\text{с.}$	$I_T^2 \cdot t_T = 31,5^2 \cdot 3 = 2976,8 \text{ кА}^2\text{с.}$
Секционное присоединение, выключатели РУ-10 кВ: ВБ-10-ПЗ-ZETO-31,5/2000 (вакуумные)	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 32,9 \text{ А.}$	$I_{ном} = 2000 \text{ А.}$
	$I_{н.т} \leq I_{отк.ном.}$	$I_{н.т} = 1,547 \text{ кА.}$	$I_{отк.ном} = 31,5 \text{ кА.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 3,284 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 31,5 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$B_K = 3,284^2 \cdot 3 = 32,35 \text{ кА}^2\text{с.}$	$I_T^2 \cdot t_T = 31,5^2 \cdot 3 = 2976,8 \text{ кА}^2\text{с.}$
Линейные присоединения, выключатели РУ-10 кВ: ВБ-10-ПЗ-ZETO-31,5/2000 (вакуумные)	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 6,9 \text{ А.}$	$I_{ном} = 2000 \text{ А.}$
	$I_{н.т} \leq I_{отк.ном.}$	$I_{н.т} = 1,547 \text{ кА.}$	$I_{отк.ном} = 31,5 \text{ кА.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 3,284 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 31,5 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$B_K = 3,284^2 \cdot 3 = 32,35 \text{ кА}^2\text{с.}$	$I_T^2 \cdot t_T = 31,5^2 \cdot 3 = 2976,8 \text{ кА}^2\text{с.}$

Для защиты оборудования от коммутационных и грозовых перенапряжений, используются нелинейные ограничители перенапряжения типа ОПН-П-10/12,7/10/1,1. Данные устройства эффективно ограничивают перенапряжения до безопасных уровней, предотвращая пробой изоляции и повреждение дорогостоящего оборудования.

Применение современных материалов и технологий в конструкции ОПН обеспечивает длительный срок службы и высокую надёжность в условиях эксплуатации на промышленном предприятии с повышенными требованиями к безопасности.

Результаты выбора ОПН приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты выбора ОПН

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные
РП-10 кВ: ограничители перенапряжения нелинейные типа ОПН-П- 10/12,7/10/1,1	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 32,9 \text{ А.}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А.}$
	$I_{н.т} \leq I_{отк.ном.}$	$I_{н.т} = 1,547 \text{ кА.}$	$I_{отк.ном} = 10 \text{ кА.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 3,284 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 12,7 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$B_K = 3,284^2 \cdot 3 =$ $= 32,35 \text{ кА}^2\text{с.}$	$I_T^2 \cdot t_T = 12,7^2 \cdot 3 =$ $= 483,87 \text{ кА}^2\text{с.}$

Трансформаторы тока типа ТОЛ-СЭЩ-10-21 используются для измерения токов в силовых цепях и передачи информации на устройства релейной защиты, автоматики и измерения.

Высокая точность и надёжность данных трансформаторов обеспечивают корректную работу систем защиты и управления, что является критически важным для предотвращения аварийных ситуаций и обеспечения безопасности персонала.

Конструкция трансформаторов тока адаптирована к условиям эксплуатации в распределительных устройствах среднего напряжения, обеспечивая длительный срок службы без снижения точности измерений.

«Результаты выбора трансформаторов тока» [7] представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты выбора трансформаторов тока

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

Трансформаторы напряжения типа НАМИТ-10 предназначены для преобразования высокого напряжения 10 кВ в стандартные значения, используемые в измерительных и защитных цепях.

Применение данных трансформаторов обеспечивает точное измерение параметров электрической сети, необходимое для корректной работы систем релейной защиты, автоматики и учёта электроэнергии.

Высокая степень изоляции и устойчивость к перенапряжениям гарантируют надёжность и безопасность эксплуатации в условиях промышленных нагрузок.

«Выбор трансформаторов напряжения» [15] представлен в таблице 10.

Таблица 10 – «Результаты выбора трансформаторов напряжения» [15]

Тип ТН	Кол-во ТН	Мощность на один ТН, ВА	Класс точности	$\frac{U_n}{U_{уст}}$, кВ	$\frac{S_n}{S_2 \Sigma}$, ВА
НАМИТ-10	2	100/2	1,0	$\frac{10}{10}$	$\frac{200,0}{\leq 200,0}$

Таким образом, расчётным путём установлено, что комплексное использование указанного оборудования в распределительном пункте 10 кВ позволяет создать надёжную и эффективную систему распределения электроэнергии, соответствующую современным требованиям промышленной безопасности и энергоэффективности.

Высокое качество и совместимость компонентов обеспечивают оптимальную работу всей системы электроснабжения, минимизируя риски аварийных ситуаций и снижая эксплуатационные затраты.

Наличие данных факторов способствует повышению общей производительности предприятия и укреплению его конкурентоспособности на рынке деревообрабатывающей промышленности.

Далее проводится проверка оборудования РУ-10 кВ на цеховых ТП-10/0,4 кВ (ТП1-ТП4) на стороне 10 кВ, а также выбор оборудования РУ-10 кВ новой цеховой ТП-5, которая питает цех по производству биотоплива.

Во всех РУ-10 кВ ТП1-ТП5 установлены выключатели нагрузки марки ВНА-10 и предохранители марки ПК-10, которые находятся в хорошем техническом состоянии, следовательно, не нуждаются в замене.

Результаты выбора выключателей нагрузки для установки на ТП-10/0,4 кВ, представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты выбора выключателей нагрузки для установки на ТП-10/0,4 кВ

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные
Выключатели нагрузки ВНА СЭЩ 80-10/630-20	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 32,9 \text{ А.}$	$I_{ном} = 630 \text{ А.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 3,284 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 20 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$B_K = 3,284^2 \cdot 3 = 32,35 \text{ кА}^2\text{с.}$	$I_T^2 \cdot t_T = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2\text{с.}$

Результаты выбора плавких предохранителей для установки на питающем РП-10 кВ сведены в таблицу 12.

Таблица 12 – Результаты выбора плавких предохранителей для установки на ТП-10/0,4 кВ

Наименование аппарата	Условие выбора	Расчетные данные	Паспортные данные
Предохранители марки ПКТ-10-16-12,5	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ.}$
	$1,1 - 1,5 I_{ном.т} \leq I_{ном.вст}$	$1,5 I_{ном.т} = 1,5 \times 8,09 = 12,14 \text{ А.}$	$I_{ном.вст} = 16 \text{ А.}$
	$I_{ном.п} \geq I_{ном.вст}$	$I_{ном.п} = 100 \text{ А}$	$I_{ном.вст} = 16 \text{ А}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$B_K = 3,284^2 \cdot 3 = 32,35 \text{ кА}^2\text{с.}$	$I_T^2 \cdot t_T = 12,5^2 \cdot 3 = 468,75 \text{ кА}^2\text{с.}$

Таким образом, для защиты и коммутации питающей и распределительной сети 10 кВ системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия, обоснованы и подтверждены расчётным путём, рациональные электрические аппараты, которые обеспечивают надёжные условия эксплуатации объекта исследования.

Все выбранные электрические аппараты показаны в графической части работы.

Выводы по разделу.

Расчётным путём определено, что значения трёхфазного тока КЗ и ударного тока в расчётных точках схемы объекта исследования, будут составлять, соответственно:

- на выводах РУ-35 кВ питающей ПС-35/10 кВ «Арбузиха»: 0,897 кА и 1,727 кА;
- на выводах питающего РП-10 кВ: 1,486 кА и 3,185 кА;
- на выводах 0,4 кВ силовых трансформаторов цеховых ТП-10/0,4 кВ: 0,408 кА и 0,577 кА.

Выбраны и проверены рациональные марки и сечения проводников на объекте.

Для питания РП-10 кВ от ПС-35/10 кВ «Арбузиха» энергосистемы подтверждено применение современных кабелей марки АПвБПнг(А)-НГ 3×70/16.

Для питания цеховых ТП-10/0,4 кВ (ТП1-ТП4) от РП-10 кВ, обосновано и подтверждено применение современных силовых кабелей марки АПвБПнг(А)-НГ 3×50/16.

Выбрана новая кабельная линия, состоящая из двух силовых кабелей марки АПвБПнг(А)-НГ 3×50/16, питающая ТП-5 нового цеха по производству биотоплива.

Установлено, что применение в распределительном пункте 10 кВ системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром» ячеек КРУ-ZETO-10 производства ЗАО «ЗЭТО» обусловлено их высокими техническими характеристиками, соответствующими требованиям надёжности и безопасности.

Для защиты и коммутации питающей и распределительной сети 10 кВ системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия, обоснованы и подтверждены расчётным путём, следующие аппараты:

- во вводных, секционной и линейных ячейках РП-10 кВ, питающих ТП1-ТП4, подтверждено следующее коммутационное и защитное

оборудование: выключатели высокого напряжения марки ВБ-10, трансформаторы напряжения марки НАМИТ-10, трансформаторы тока марки ТОЛ-СЭЩ-10, ограничители перенапряжения марки ОПН-П-10;

- в новых линейных ячейках РП-10 кВ, питающих ТП5, выбрано и проверено следующее коммутационное и защитное оборудование: выключатели высокого напряжения марки ВБ-10, трансформаторы тока марки ТОЛ-СЭЩ-10, ограничители перенапряжения марки ОПН-П-10;
- на всех цеховых ТП-10/0,4 кВ (ТП1-ТП4) на стороне 10 кВ подтверждены выключатели нагрузки марки ВНА-10 и предохранители марки ПК-10-16-12,5;
- для комплектации новой ТП-5, питающей потребители цеха по производству биотоплива, на стороне 10 кВ подтверждены выключатели нагрузки марки ВНА-10 и предохранители марки ПК-10-16-12,5.

5 Расчёт релейной защиты предприятия

5.1 Выбор устройств релейной защиты

Обоснование применения релейной защиты на распределительном пункте 10 кВ предприятия «Харовсклеспром» связано с необходимостью обеспечения высокой степени надёжности и безопасности системы электроснабжения.

Технологические процессы деревообработки требуют непрерывного и стабильного электроснабжения, а перебои или аварии могут привести к значительным финансовым потерям и снижению производительности.

Комплексное использование дифференциальной защиты, максимальной токовой защиты и защиты от однофазных коротких замыканий на землю обеспечивает многоуровневую систему защиты, способную эффективно реагировать на различные виды повреждений и предотвращать развитие аварийных ситуаций.

Применение основных типов защит позволяет достичь высокой селективности и быстродействия отключения, что минимизирует зону отключения и сохраняет работу неповреждённых участков сети, что особенно важно для крупного предприятия, где остановка оборудования может повлечь за собой существенные убытки.

Кроме того, использование современных микропроцессорных устройств релейной защиты, реализующих данные виды защит, способствует повышению точности и надёжности работы системы, а также обеспечивает возможность интеграции с автоматизированными системами управления и мониторинга.

Таким образом, применение основных токовых защит с наличием дифференциальной защиты, максимальной токовой защиты и защиты от однофазных коротких замыканий на землю на РП-10 кВ деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром» является

технически обоснованным и необходимым для обеспечения надёжной, безопасной и эффективной работы системы электроснабжения, отвечающей современным требованиям промышленной безопасности и энергетической эффективности [1].

«Предлагается принять для защиты линий, питающих силовые трансформаторы 10/0,4 кВ на стороне 10 кВ от РП-10 кВ, микропроцессорные блоки релейной защиты MICOM P-632» [2], представленный на рисунке 6.



Рисунок 6 – «Блок РЗиА марки MICOM P-632 (для защиты линий, питающих силовые трансформаторы ТП-10/0,4 кВ)» [2]

Применение микропроцессорных блоков релейной защиты марки MICOM P-632 для защиты линий, питающих силовые трансформаторы на стороне 10 кВ от распределительного пункта РП-10 кВ, обосновано их высокой функциональностью и надёжностью.

MICOM P-632 обеспечивает комплексную защиту линий от различных видов повреждений и ненормальных режимов работы, что особенно

актуально для деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», где стабильность электроснабжения имеет критическое значение для непрерывности технологических процессов.

MiCOM P-632 обладает широким спектром защитных функций, включая дистанционную защиту, защиту от перегрузок, защиту от замыканий на землю, а также возможность настройки уставок в соответствии с конкретными условиями эксплуатации.

Высокая скорость обработки сигналов и точность измерений позволяют своевременно выявлять и отключать повреждённые участки сети, минимизируя последствия аварийных ситуаций и предотвращая повреждение оборудования.

Для защиты вводных и секционных присоединений РП-10 кВ применяется микропроцессорный блок дифференциально-фазной защиты линий MiCOM P-547» [12], показанный в работе на рисунке 7.



Рисунок 7 – «Блок РЗиА марки MiCOM P-547 (для защиты вводных и секционных присоединений РП-10 кВ)» [12]

Для защиты вводных и секционных присоединений РП-10 кВ применение микропроцессорного блока дифференциально-фазной защиты линий MiCOM P-547 является обоснованным решением.

MiCOM P-547 обеспечивает высокоточную дифференциальную защиту с быстрым временем реагирования, что критически важно для предотвращения развития аварий и обеспечения безопасности персонала и оборудования.

Устройство способно эффективно обнаруживать межфазные короткие замыкания, замыкания на землю и другие виды повреждений, обеспечивая селективное отключение только повреждённых элементов сети.

Микропроцессорные блоки серии MiCOM характеризуются возможностью интеграции в автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), что позволяет осуществлять дистанционный мониторинг и управление параметрами электрической сети.

Наличие интерфейсов для связи по протоколам промышленного стандарта обеспечивает совместимость с существующими системами предприятия и облегчает внедрение современных технологий управления энергопотреблением.

Применение данных устройств способствует повышению общей надёжности системы электроснабжения предприятия, снижению эксплуатационных затрат и увеличению срока службы оборудования.

Высокая степень автоматизации процессов релейной защиты и возможность гибкой настройки параметров обеспечивают адаптацию системы к изменениям в нагрузках и условиях эксплуатации, что важно для динамично развивающегося производства.

Кроме того, использование микропроцессорных защитных устройств позволяет повысить уровень безопасности на предприятии, минимизируя риск возникновения аварийных ситуаций и связанных с ними последствий.

Приведённые параметры соответствуют современным требованиям промышленной безопасности и способствует укреплению позиций предприятия на рынке за счёт повышения доверия со стороны партнёров и клиентов.

5.2 Расчёт релейной защиты

«Так как в работе применяются новейшие микропроцессорные блоки РЗиА, выбранные ранее, следовательно, расчёт уставок основных защит должен проводиться по упрощённой методике, без учёта коэффициентов самозапуска, надёжности и возврата, которые присущи только устаревшим индукционным реле.

Ток срабатывания защит от внутренних повреждений в микропроцессорных блоках определяется с учётом коэффициента отстройки от максимального рабочего тока» [1]:

$$I_{с.з} \geq K_{отс} \cdot I_{м}, \quad (36)$$

где « $K_{отс}$ – коэффициент отстройки;

$I_{м}$ – максимальный ток линии, А» [1].

«Ток срабатывания защит от внешних повреждений в микропроцессорных блоках определяется с учётом коэффициента отстройки от максимального тока КЗ по следующему условию» [1]:

$$I_{с.з} \geq (K_{отс} \cdot I_{к}) + I_{м}. \quad (37)$$

«Действительный ток срабатывания защит (ток срабатывания релейного микропроцессорного элемента) с учётом коэффициента трансформации ТТ при коэффициенте схемы, равном единице (соединение ТТ и блоков РЗиА в полную и/или неполную звезду)» [1]:

$$I_{с.р} \geq \frac{I_{с.з}}{K_m}, \quad (38)$$

где K_m – «коэффициент трансформации трансформатора тока, установленного на линии» [1].

«В работе применяются следующие виды защит, установленных на питающем РП-10 кВ предприятия:

- дифференциальная защита (ДЗ);
- максимальная токовая защита (МТЗ);
- защита от однофазных коротких замыканий на землю (ЗОЗ).

Далее проводится выбор уставок срабатывания данных видов РЗиА» [1].

Для защиты оборудования от ненормальных режимов, на питающем РП-10 кВ применяются различные виды релейной защиты, включая дифференциальную защиту (ДЗ), максимальную токовую защиту (МТЗ) и защиту от однофазных коротких замыканий на землю (ЗОЗ).

Дифференциальная защита представляет собой высокочувствительную систему, основанную на принципе сравнения токов, входящих и выходящих из защищаемого элемента, такого как трансформатор или линия. При нормальной работе сумма токов равна нулю, а при возникновении внутреннего повреждения появляется разностный ток, который фиксируется защитой.

Дифференциальная защита обеспечивает мгновенное и селективное отключение повреждённого участка, предотвращая распространение аварии и снижая риски повреждения оборудования.

На предприятии «Харовсклеспром» применение ДЗ на РП-10 кВ позволяет надёжно защищать трансформаторы и линии от внутренних коротких замыканий, что критически важно в условиях интенсивного производства и высоких нагрузок.

Максимальная токовая защита предназначена для обнаружения превышения заданного значения тока, что указывает на возникновение перегрузки или короткого замыкания в сети.

МТЗ реагирует на токовые аномалии, обеспечивая своевременное отключение повреждённого участка.

Простота конструкции и надёжность работы делают МТЗ одним из наиболее распространённых и эффективных видов защиты.

На деревообрабатывающем предприятии применение МТЗ на РП-10 кВ обеспечивает контроль и предотвращение аварийных ситуаций, связанных с перегрузками и короткими замыканиями, что способствует стабильной работе технологических процессов.

Защита от однофазных коротких замыканий на землю специализируется на обнаружении и устранении замыканий фазы на землю, которые являются наиболее распространёнными видами повреждений в электрических сетях среднего напряжения.

ЗОЗ реагирует на появление токов нулевой последовательности, характерных для замыканий на землю, и обеспечивает быстрое отключение повреждённого участка.

В условиях деревообрабатывающего предприятия, где повышена вероятность повреждения изоляции из-за агрессивных сред, пыли и механических воздействий, применение ЗОЗ на РП-10 кВ является необходимым для предотвращения пожаров, защиты оборудования и обеспечения безопасности персонала.

«Уставка срабатывания МТЗ линии с трансформатором «РП-10 кВ – ТП-1» по условию (36)» [1]:

$$I_{c.з} \geq 1,1 \cdot 6,9 = 7,6 \text{ A.}$$

«ДЗ является основной защитой от внешних повреждений, поэтому отстраивается от максимального тока КЗ с $K_o = 1,3$ [1].

Данная защита выполняется без выдержки времени (мгновенная основная защита без выдержки времени).

Ток срабатывания ДЗ по условию (37)» [1]:

$$I_{c.3} \geq (1,3 \cdot 1,486) + 0,0362 = 1,968 \text{ кА}.$$

«ЗОЗ является основной защитой от однофазных замыканий на землю. Учитывая требования [1], принимается в работе для ЗОЗ линии «РП 10 кВ – ТП-1» следующие технические параметры:

- $I_{c.3} = 5 \text{ А}$,
- $t_{c.3} = 0 \text{ с}$ » [1].

Результаты расчёта уставок релейной защиты системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром» представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты расчёта уставок релейной защиты системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром»

Наименование подразделения (ТП-10/0,4 кВ)	Уставки срабатывания релейной защиты						Наименование блока РЗ
	$MTЗ, I_{c.3}, \text{ А}$	$MTЗ, t_{c.3}, \text{ А}$	$ДЗ, I_{c.3}, \text{ кА}$	$ДЗ, t_{c.3}, \text{ А}$	$ЗОЗ, I_{c.3}, \text{ А}$	$ЗОЗ, t_{c.3}, \text{ А}$	
Вводы РП-10 кВ	36,2	0,5	1,968	-	5	-	МіСOM Р-547
Секционное присоединение РП-10 кВ	36,2	1,0	1,968	-	5	-	МіСOM Р-547
Цех по производству пиломатериалов и обработке круглого леса (ТП-1)	7,6	1,5	1,9394	-	5	-	МіСOM Р-632
Цех по производству древесной щепы (ТП-2)	6,6	1,5	1,9384	-	5	-	МіСOM Р-632
Цех по производству ДСП и МДФ (ТП-3)	7,6	1,5	1,9394	-	5	-	МіСOM Р-632
Цех по производству фанеры, складской корпус, административный корпус (ТП-4)	5,9	1,5	1,9377	-	5	-	МіСOM Р-632
Цех по производству биотоплива (ТП-5)	8,5	1,5	1,9403	-	5	-	МіСOM Р-632

Таким образом, защита основных элементов системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», будет выполнена.

Выводы по разделу.

Установлено, что для защиты вводных и секционных присоединений РП-10 кВ применение микропроцессорного блока дифференциально-фазной защиты линий MiCOM P-547 является обоснованным решением, так как данные блоки РЗиА обеспечивает высокоточную дифференциальную защиту с быстрым временем реагирования, что критически важно для предотвращения развития аварий и обеспечения безопасности персонала и оборудования.

Установлено и показано, что применение микропроцессорных блоков релейной защиты марки MiCOM P-632 для защиты линий, питающих силовые трансформаторы на стороне 10 кВ от распределительного пункта РП-10 кВ, обосновано их высокой функциональностью и надёжностью. Такие блоки РЗиА обеспечивают комплексную защиту линий от различных видов повреждений и ненормальных режимов работы, что особенно актуально для деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», где стабильность электроснабжения имеет критическое значение для непрерывности технологических процессов.

Рассчитаны уставки токов и времени срабатывания основных типов РЗ (МТЗ, ДЗ и ЗОЗ) всех присоединений питающей сети 10 кВ, реализуемые на базе выбранных терминалов релейной защиты.

Заключение

В результате выполнения работы, разработана рациональная, надёжная, экономичная и безопасная система электроснабжения деревообрабатывающего предприятия на примере ООО «Харовсклеспром».

В результате проведения анализа исходных данных установлено, что в структуре предприятия функционируют четыре основных производственных цеха, каждый из которых отвечает за определённый этап обработки древесины и выпуск специфической продукции.

Все перечисленные производственные цеха относятся к I категории надёжности и получают питание от собственных понизительных подстанций 10/0,4 кВ, получающих питание от РП-10 кВ кабельными линиями марки АПвБПнг(А)-HF 3×50/16.

Все цеховые распределительные ТП-10/0,4 кВ выполнены с применением двух силовых трансформаторов марки ТМГ-110/10.

Кроме того, на территории предприятия, помимо производственных цехов, также располагаются потребители III категории надёжности: административный корпус и складской корпус, питающиеся от шин 0,4 кВ цеховой ТП-4 одной кабельной линией.

Показано, что схема питающего РП-10 кВ с одной системой сборных шин, секционированная выключателем, удовлетворяет требованиям по надёжности для питания всех потребителей предприятия. Таким образом, она не нуждается в замене.

Установлено, что всё оборудование питающего РП-10 кВ и цеховых ТП-10/0,4 кВ находится в хорошем техническом состоянии, следовательно, оно не нуждается в замене.

В результате проведения анализа перспективного развития деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», было установлено, что в рамках стратегии устойчивого развития и расширения

ассортимента продукции, на предприятии создаётся новый цех по производству биотоплива.

Так как данный объект относится к I категории надёжности, он требует двух независимых источников питания, следовательно, для реализации данной задачи в работе планируется соорудить новую цеховую ТП-5, куда подключить все потребители данного производственного цеха. С учётом этого, необходимо провести реконструкцию схемы электрических соединений РП-10 кВ, введя в эксплуатацию новые ячейки потребителей в количестве двух единиц.

Осуществлён расчёт максимальных индивидуальных нагрузок всех присоединений, а также групповых расчётных нагрузок секций сборных шин и всей системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром».

Также проведён расчёт суммарной нагрузки ТП-4, с учётом того, что от неё получают питание 3 цеха. Для всех остальных объектов нагрузка питающей ТП-10/0,4 кВ будет соответствовать их суммарной расчётной нагрузке.

В результате выбора силовых трансформаторов цеховых ТП-10/0,4 кВ деревообрабатывающего предприятия, обосновано применение в системе электроснабжения предприятия четырёх двухтрансформаторных распределительных подстанций, которые были установлены в исходной схеме электроснабжения объекта, а также выбраны новые силовые трансформаторы для установки на ТП-5, питающей потребители цеха по производству биотоплива.

Таким образом, на цеховых ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром», устанавливаются следующие силовые трансформаторы:

- на ТП-1: два силовые трансформатора марки ТМГ-100/10;
- на ТП-2: два силовые трансформатора марки ТМГ-100/10;
- на ТП-3: два силовые трансформатора марки ТМГ-100/10;

- на ТП-4: два силовых трансформатора марки ТМГ-100/10;
- на ТП-4: два силовых трансформатора марки ТМГ-100/10.

Расчётным путём определено, что значения трёхфазного тока КЗ и ударного тока в расчётных точках схемы, будут составлять, соответственно:

- на выводах РУ-35 кВ питающей ПС-35/10 кВ «Арбузиха»: 0,897 кА и 1,727 кА;
- на выводах питающего РП-10 кВ: 1,486 кА и 3,185 кА;
- на выводах 0,4 кВ силовых трансформаторов цеховых ТП-10/0,4 кВ: 0,408 кА и 0,577 кА.

Выбраны и проверены рациональные марки и сечения проводников на объекте.

Для питания РП-10 кВ от ПС-35/10 кВ «Арбузиха» энергосистемы подтверждено применение кабелей марки АПвБПнг(А)-HF 3×70/16.

Для питания цеховых ТП-10/0,4 кВ (ТП1-ТП4) от РП-10 кВ, обосновано применение силовых кабелей марки АПвБПнг(А)-HF 3×50/16.

Выбрана новая кабельная линия, состоящая из двух силовых кабелей марки АПвБПнг(А)-HF 3×50/16, питающая ТП-5 нового цеха по производству биотоплива.

Установлено, что применение в распределительном пункте 10 кВ системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия ООО «Харовсклеспром» ячеек КРУ-ZETO-10 производства ЗАО «ЗЭТО» обусловлено их высокими техническими характеристиками, соответствующими требованиям надёжности и безопасности.

Для защиты и коммутации питающей и распределительной сети 10 кВ системы электроснабжения деревообрабатывающего предприятия, обоснованы и подтверждены расчётным путём, следующие аппараты:

- во вводных, секционной и линейных ячейках РП-10 кВ, питающих ТП1-ТП4, подтверждено следующее коммутационное и защитное оборудование: выключатели высокого напряжения марки ВБ-10, трансформаторы напряжения марки НАМИТ-10, трансформаторы

тока марки ТОЛ-СЭЩ-10, ограничители перенапряжения марки ОПН-П-10;

- в новых линейных ячейках РП-10 кВ, питающих ТП5, выбрано и проверено следующее коммутационное и защитное оборудование: выключатели высокого напряжения марки ВБ-10, трансформаторы тока марки ТОЛ-СЭЩ-10, ограничители перенапряжения марки ОПН-П-10;
- на всех цеховых ТП-10/0,4 кВ (ТП1-ТП4) на стороне 10 кВ подтверждены выключатели нагрузки марки ВНА-10 и предохранители марки ПК-10-16-12,5;
- для комплектации новой ТП-5, питающей потребители цеха по производству биотоплива, на стороне 10 кВ подтверждены выключатели нагрузки марки ВНА-10 и предохранители марки ПК-10-16-12,5.

Установлено, что для защиты вводных и секционных присоединений РП-10 кВ применение микропроцессорного блока дифференциально-фазной защиты линий MiCOM P-547 является обоснованным решением, так как данные блоки РЗиА обеспечивает высокоточную дифференциальную защиту с быстрым временем реагирования.

Установлено и показано, что применение микропроцессорных блоков релейной защиты марки MiCOM P-632 для защиты линий, питающих силовые трансформаторы на стороне 10 кВ от распределительного пункта РП-10 кВ, обосновано их высокой функциональностью и надёжностью.

Рассчитаны уставки токов и времени срабатывания основных типов РЗ (МТЗ, ДЗ и ЗОЗ) всех присоединений питающей сети 10 кВ, реализуемые на базе выбранных терминалов релейной защиты.

Предложенные технические решения направлены на повышение надёжности и эффективности электроснабжения, соответствуют современным требованиям отрасли и могут быть использованы при реконструкции аналогичных производственных объектов.

Список используемых источников

1. 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.
2. Блок MiCOM P632. Дифференциальная защита трансформатора. [Электронный ресурс]: URL: <https://электротехника.рф/upload/iblock/77c/01.pdf> (дата обращения: 13.10.2024).
3. Кабель АПвБПнг(А)-HF [Электронный ресурс]: URL: [https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovye/s-izolyacziej-iz-sshitogo-polietilena-10kv/apvbpng\(a\)-hf-10kv/](https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovye/s-izolyacziej-iz-sshitogo-polietilena-10kv/apvbpng(a)-hf-10kv/) (дата обращения: 13.10.2024).
4. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. М.: Академия, 2021. 400 с.
5. Куксин А.В. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебное пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.
6. Немировский А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций. М.: Инфра-Инженерия, 2020. 174 с.
7. Оборудование ЗАО «ЗЭТО». Каталог. [Электронный ресурс]: URL: https://zeto.ru/products_and_services/catalog/ (дата обращения: 13.10.2024).
8. ООО «Харовсклеспром» [Электронный ресурс]: URL: <https://vlp.eco/o-gruppe-kompanij/predprijatija-gruppy-kompanij/ooo-harovsklesprom/> (дата обращения: 13.10.2024).
9. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Изд-во ДЕАН, 2022. 192 с.
10. Правила устройства электроустановок. 7-е издание. Изд-во ЦентрМаг, 2022. 584 с.
11. 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: 13.10.2024).

12. Реле дифференциально-фазной защиты MiCOM P547. Техническая документация [Электронный ресурс]: URL: <https://электротехника.рф/info/biblioteka/tekhnicheskaya-dokumentatsiya/nizkovoltnaya-apparatura/komplektnye-ustroystva-upravleniya-raspredeleniya-i-zashchity/rele-differentsialno-faznoy-zashchity-vl-micom-p547-tekhnicheskaya-dokumentatsiya-biblioteka-elek-ru/> (дата обращения: 13.10.2024).

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

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

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

16. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (от 29.07.2017) «Об энергосбережении, повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

17. Чернышев О. Н. Проектирование технологических процессов деревообработки. [Электронный ресурс]: URL: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/12692/1/3_23.pdf (дата обращения: 11.10.2024).

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

19. Эксплуатация распределительных устройств. [Электронный ресурс]: URL: <https://forca.ru/knigi/oborudovanie/ekspluatatsiya-raspredelitelnyh-ustroystv-4.html> (дата обращения: 13.10.2024).

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.