

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)

Цифровые технологии в электроэнергетике

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Модернизация релейной защиты ПС завода "Нефтемаш" с применением современных микропроцессорных устройств

Обучающийся

А.М. Гусарова

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент Ю.В. Черненко

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

Консультант

А.В. Прошина

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

Тольятти 2025

Аннотация

Выпускная квалификационная работа посвящена модернизации релейной защиты подстанции «Восточная» завода «Нефтемаш» с применением современных отечественных микропроцессорных устройств. Актуальность темы обусловлена необходимостью замены устаревшей электромеханической защиты, не отвечающей современным требованиям надёжности, селективности и цифровой интеграции [3].

В рамках проекта проведён анализ текущего состояния системы электроснабжения, включая оценку существующей схемы релейной защиты, расчёт электрических нагрузок, токов короткого замыкания и параметров силового трансформатора ТДН-4000/35/6. Выполнен подбор шкафа релейной защиты ШЭРА-ТТ-40016 и устройства регулирования напряжения Сириус-2-Т. Произведён расчёт уставок для дифференциальной защиты трансформатора с учётом особенностей энергосистемы предприятия.

Работа содержит обоснование выбора оборудования в условиях политики импортозамещения и рассмотрение перспектив цифровизации подстанции без полной реконструкции. Сделаны выводы о повышении надёжности, скорости реагирования и управляемости системы электроснабжения за счёт внедрения микропроцессорной РЗА.

Abstract

The final qualifying work is devoted to the modernization of the relay protection of the Vostochnaya substation of the Neftemash plant using modern domestic microprocessor devices. The relevance of the topic is due to the need to replace the outdated electromechanical protection that does not meet modern requirements for reliability, selectivity and digital integration.

The project included an analysis of the current state of the power supply system, including an assessment of the existing relay protection scheme, calculation of electrical loads, short-circuit currents and parameters of the TDN-4000/35/6 power transformer. The selection of the SHERA-TT-40016 relay protection cabinet and the Sirius-2-T voltage regulation device was performed. The calculation of the settings for the differential protection of the transformer was made taking into account the features of the enterprise's power system.

The work contains a justification for the choice of equipment in the context of the import substitution policy and consideration of the prospects for digitalization of the substation without complete reconstruction. Conclusions are made on increasing the reliability, response speed and controllability of the power supply system due to the introduction of a microprocessor relay protection and automation system.

Содержание

Введение.....	5
1 Анализ исходного технического состояния электроснабжения завода	8
1.1 Назначение и характеристика ПС «Восточная» 35/6 кВ	11
2 Теоретические основы релейной защиты и автоматики	14
2.1 Основные функции и требования к РЗА.....	15
2.2 Особенности микропроцессорных устройств релейной защиты.....	17
2.3 Трудности, возникающие при модернизации релейной защиты.....	19
3 Проект модернизации	24
3.1 Анализ существующего положения релейной защиты в энергосистеме	24
3.2 Выбор современных микропроцессорных устройств РЗА.....	26
3.3 Организация мониторинга и диагностики устройств релейной защиты	30
4 Расчет электрических нагрузок	32
4.1 Расчёт электрических нагрузок	33
4.2 Расчёт токов короткого замыкания.....	43
5 Релейная защита и автоматика силового трансформатора.....	49
5.1 Расчет общих уставок.....	53
5.2 Расчет уставок чувствительной дифференциальной защиты (ДЗТ-2) ...	55
5.3 Расчет уставок дифференциальной токовой отсечки (ДЗТ-1)	58
5.4 Сигнализация небаланса в плечах дифференциальной защиты (ДЗТ-3)	60
Заключение	62
Список используемой литературы и используемых источников.....	64

Введение

Энергетическая устойчивость промышленных объектов становится приоритетной задачей, определяющей выживаемость предприятий в условиях постоянных изменений внешнеэкономической среды, ужесточающихся требований к безопасности и необходимости адаптации к цифровым платформам. Особенно остро эти вызовы ощущаются на предприятиях тяжёлого машиностроения, где стабильность электроснабжения напрямую влияет на производственный ритм, техпроцессы, и даже конечное качество выпускаемой продукции.

Завод «Нефтемаш», расположенный в промышленной зоне города Отрадный Самарской области, является ярким примером такого объекта. Как один из ключевых филиалов ООО «Уралмаш НГО Холдинг», предприятие выпускает оборудование для нефтегазового сектора, включая узлы и агрегаты, применяемые в условиях повышенных нагрузок, вибраций и температур. Продукция завода задействована в стратегически значимых проектах - от обустройства месторождений до модернизации трубопроводных систем. Подобная нагрузка на производственные линии требует от систем электроснабжения не просто исправной работы, а гарантированной надёжности в любых режимах, в том числе и в нештатных.

Однако, несмотря на важность энергетической инфраструктуры, на практике подстанции и системы релейной защиты многих предприятий, включая ПС «Восточная», питающую «Нефтемаш», продолжают функционировать на базе решений, разработанных и внедрённых ещё в прошлом веке. Электромеханические реле, отсутствие мониторинга в реальном времени, морально устаревшая автоматика - формирует уязвимую среду, где даже незначительный сбой может привести к остановке технологической цепочки, повреждению оборудования и миллионным убыткам. Кроме того, в условиях санкционного давления, когда доступ к импортным комплектующим и программному обеспечению ограничен,

становится критически важным обеспечить устойчивость электроэнергетической системы исключительно за счёт отечественной элементной базы.

В этих условиях модернизация релейной защиты - не формальная замена оборудования, а комплексный переход к новой логике управления энергосистемой. Переход от электромеханических устройств к современным микропроцессорным платформам открывает возможности для цифровизации подстанций, автоматического анализа аварийных режимов, дистанционного управления оборудованием и интеграции с АСУ ТП. Однако этот переход невозможен без глубокого анализа текущего состояния системы электроснабжения, правильного выбора оборудования и грамотного расчёта всех эксплуатационных параметров.

Данная выпускная квалификационная работа посвящена именно этому - модернизации релейной защиты подстанции «Восточная» с заменой устаревшего оборудования на современные микропроцессорные устройства, произведённые в России. Работа носит прикладной характер и включает в себя не только теоретическое обоснование необходимости перехода на цифровую защиту, но и конкретные расчёты электрических нагрузок, токов короткого замыкания, а также выбор уставок для дифференциальной защиты трансформатора, установленного на объекте. Особое внимание уделено применению шкафа ШЭРА-ТТ-40016 [20] в связке с устройством регулирования Сириус-2-Г - как одному из решений, обеспечивающих максимальную адаптацию к текущим требованиям отрасли и условиям эксплуатации конкретного предприятия.

В ходе исследования проведена комплексная оценка технического состояния существующей схемы электроснабжения, в том числе с учётом влияния старения оборудования на показатели надёжности. Также сделан акцент на анализе отечественного рынка микропроцессорной релейной защиты, приведено сравнение с зарубежными аналогами, сформулированы выводы о целесообразности импортозамещения с технической и

экономической точек зрения. При этом все проектные решения базируются на данных, приближенных к реальной конфигурации ПС «Восточная» и производственной специфике «Нефтемаш».

Целью работы является подготовка проекта по замене устаревшей защиты трансформатора на подстанции 35/6 кВ, ориентированного на современные реалии отечественной энергетики и цифровые решения. Главная задача - минимизировать простои, исключить повреждения оборудования и адаптировать подстанцию под современные требования управления и диагностики.

В условиях нарастающих требований к промышленной автоматизации и энергоэффективности, данный проект можно рассматривать как универсальный шаблон для аналогичных модернизаций на других предприятиях машиностроительного сектора. Он опирается на современные принципы построения РЗА, полностью соответствует вектору перехода на отечественные технологии и может быть реализован в рамках действующих технических регламентов, включая ГОСТы и стандарты ЕЭС России.

1 Анализ исходного технического состояния электроснабжения завода

Филиал ООО «Уралмаш НГО Холдинг» - завод «Нефтемаш» - расположен в промышленной зоне города Отрадный Самарской области и является одним из ключевых предприятий в структуре холдинга, ориентированного на разработку и выпуск высокотехнологичного оборудования для нужд нефтегазовой отрасли [7]. Производственные мощности завода позволяют выполнять полный цикл изготовления продукции - от обработки заготовок до сборки, испытаний и отгрузки готовых изделий. Предприятие специализируется на производстве бурового и нефтегазового оборудования, включая циркуляционные системы, сепараторы, пескоотделители и другие компоненты для очистки буровых растворов.

Завод занимает обширную территорию промышленной зоны-1 города Отрадный. На его территории размещены:

- металлообрабатывающие цеха, где осуществляется механическая обработка корпусных деталей, валов, корпусов насосов, редукторов и других компонентов;
- сборочные участки, где производится монтаж оборудования, включая буровые установки, насосные агрегаты и сепараторы;
- цеха отделки и окраски, где осуществляется антикоррозийная обработка, покраска и нанесение маркировки на изделия;
- испытательные стенды и площадки, предназначенные для контроля качества и работоспособности выпускаемой продукции перед отправкой заказчику;
- вспомогательные службы и складские помещения, обеспечивающие бесперебойное снабжение производственного процесса.

Электроприёмники классифицированы в таблице 1 в соответствии с требованиями Правил устройства электроустановок (ПУЭ) [9] по надёжности электроснабжения:

- I категория - критически важные потребители, для которых предусмотрено резервирование питания;
- II категория - вспомогательные и административные участки с менее жёсткими требованиями к бесперебойности.

Таблица 1 - Характеристика электроприёмников завода «Нефтемаш» (по цехам)

Наименование участка / цеха	Категория надёжности	Установленная мощность, Р _н (кВт)	Особенности питания
Заготовительный цех	I	145	Двойное питание
Механический цех	I	190	Двойное питание
Сварочно-сборочный участок	I	210	Двойное питание
Термический участок	I	95	Двойное питание
Гальванический участок	I	35	Двойное питание
Компрессорная станция	I	80	Двойное питание
Линия покраски и сушки	I	60	Двойное питание
Линия плазменной и лазерной резки	I	85	Двойное питание
Вентиляция и приточно-вытяжные системы	II	45	Один ввод
Административно-бытовой корпус	II	18	Один ввод
Складские и вспомогательные помещения	II	12	Один ввод

Для всех участков I категории реализовано питание по схеме с двумя независимыми вводами, а также автоматическим вводом резерва (АВР). «АВР - устройство, предназначенное для автоматического переключения питания электрических нагрузок от неисправного источника энергии к рабочему источнику» [1]. Это обеспечивает бесперебойную работу критически важных установок даже при аварийном отключении одного из источников питания. Для потребителей II категории допускается кратковременное отключение, с

возможностью восстановления вручную. «При нарушении электроснабжения от одного из источников питания допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания действиями дежурного персонала или выездной оперативной бригады.» [14]

Продукция предприятия используется в обустройстве нефтяных и газовых месторождений, включая системы подготовки нефти и газа, буровые насосы, оборудование для перекачки и сепарации жидкостей. Большая часть продукции разрабатывается с учётом требований заказчиков и может быть адаптирована под конкретные условия эксплуатации. В составе предприятия функционируют также конструкторские и технологические подразделения, отвечающие за проектирование, модернизацию и внедрение новых типов оборудования, а также за сопровождение технологических процессов производства.

Стабильная работа завода возможна только при условии надёжного и непрерывного электроснабжения, обеспечивающего питание как тяжёлого технологического оборудования, так и систем освещения, вентиляции, автоматизации и контроля. Поскольку значительная часть оборудования завода энергоёмкая и чувствительная к перепадам напряжения, требования к электроснабжению крайне высоки: оно должно быть стабильным, бесперебойным и соответствовать нормативным показателям по качеству электроэнергии. В настоящее время предприятие питается от подстанции «Восточная» 35/6 кВ, обеспечивающей распределение электроэнергии на различные производственные и вспомогательные объекты. Однако часть оборудования, включая систему релейной защиты и автоматики (РЗА), находится в эксплуатации уже более двух десятков лет, что негативно сказывается на общей надёжности энергоснабжения и усложняет техническое обслуживание. Модернизация электроснабжения предприятия - не только повышение надёжности и эффективности системы, но и важный шаг в обеспечении устойчивого функционирования завода «Нефтемаш» в условиях растущих требований со стороны промышленности и заказчиков.

1.1 Назначение и характеристика ПС «Восточная» 35/6 кВ

Электроснабжение завода осуществляется через подстанцию «Восточная» напряжением 35/6 кВ. Подстанция «Восточная» получает электроэнергию от более крупной подстанции «Новоотрадная» напряжением 220/110/6 кВ, что обеспечивает стабильное и надежное энергоснабжение предприятия.

Основные элементы подстанции «Восточная» включают:

- силовые трансформаторы ТДН-4000/35/6, предназначенные для преобразования напряжения с 35 кВ до 6 кВ для питания технологического оборудования;
- распределительные устройства: включают в себя оборудование для распределения электроэнергии по различным цехам и участкам завода;
- релейная защита и автоматика (РЗА): выполняют функции защиты линий и оборудования от нештатных режимов.

Подстанция расположена вблизи производственной территории, что минимизирует потери при передаче энергии и обеспечивает удобство эксплуатации. Она состоит из следующих основных элементов:

- высоковольтного ввода 35 кВ с комплектным распределительным устройством наружной или внутренней установки (КРУН или ОРУ). Комплектное распределительное устройство наружной установки (КРУН) - электроустановка, служащая для приёма и распределения электрической энергии.» [6];
- силовых трансформаторов (обычно два трансформатора мощностью 4000 МВА каждый), понижающих напряжение с 35 кВ до 6 кВ;
- распределительного устройства 6 кВ, через которое электроэнергия подаётся на цеха и оборудование завода;
- систем релейной защиты, автоматики и телемеханики, обеспечивающих контроль, управление и защиту оборудования от аварийных режимов;

- систем оперативного постоянного тока, обеспечивающих питание цепей управления и автоматики.

К основным задачам, которые решает ПС «Восточная», относятся:

- обеспечение надёжного и бесперебойного электроснабжения технологических установок, металлообрабатывающих станков, кранового оборудования, насосов, систем вентиляции и другого энергозависимого оборудования;
- защита от аварийных режимов (КЗ, перегрузок, пробоев изоляции);
- обеспечение электроэнергией вспомогательных служб (освещение, охранно-пожарные системы, вентиляция, ИТ-инфраструктура и др.);

Подстанция «Восточная» спроектирована в период активного промышленного роста региона, и основное её оборудование морально и физически устарело. Многие элементы РЗА построены на электромеханических реле, что затрудняет гибкую настройку, диагностику и интеграцию в современные автоматизированные системы [21]. Многие компоненты устарели морально и физически, что снижает общую надёжность и эффективность электроснабжения. Кроме того, отсутствие современных систем мониторинга и автоматического управления затрудняет оперативное выявление и устранение неисправностей.

Ввиду высокой степени износа оборудования, а также отсутствия современных систем мониторинга, возрастает риск развития аварийных ситуаций с тяжёлыми последствиями - вплоть до отключения производства. Электромеханические реле, которые до сих пор используются на ПС «Восточная», не способны обеспечить полноценную селективную защиту на нескольких уровнях и не поддерживают автоматическую диагностику, анализ аварий в реальном времени или удалённое управление. Это увеличивает риск непредвиденных отключений и усложняет ремонтные работы.

В связи с учетом возраста оборудования, специфики нагрузки и важности непрерывного энергоснабжения, возникает необходимость в модернизации подстанции «Восточная» с применением микропроцессорных

устройств РЗА. Замена устаревших устройств релейной защиты на современные микропроцессорные аналоги, внедрение систем дистанционного мониторинга и управления, а также обновление распределительных устройств для повышения общей надежности и безопасности электроснабжения завода, способно обеспечить как высокую надёжность, так и гибкость в обслуживании и управлении. Это особенно актуально в условиях цифровизации производства и внедрения систем промышленной автоматизации. Подстанция «Восточная» играет центральную роль в обеспечении энергетической устойчивости завода «Нефтемаш», и её модернизация является критически важной задачей в рамках повышения эффективности и безопасности всего предприятия.

Выводы по разделу 1. В результате анализа технического состояния электроснабжения завода «Нефтемаш» было установлено, что его энергетическая инфраструктура требует модернизации. Завод располагается на территории промышленной зоны и включает в себя энергоёмкое производство, зависящее от стабильной и надёжной работы систем электроснабжения. Основным питающим центром является подстанция «Восточная» 35/6 кВ, от которой питаются все основные технологические участки предприятия.

Текущее состояние подстанции характеризуется высокой степенью износа оборудования, использованием устаревших типов релейной защиты и отсутствием возможности централизованного контроля и мониторинга. Это повышает вероятность отказов, снижает надёжность электроснабжения и усложняет техническое обслуживание. Учитывая промышленное значение объекта, модернизация систем релейной защиты с применением микропроцессорных устройств является обоснованной и своевременной задачей, обеспечивающей соответствие современным требованиям к безопасности и эффективности.

2 Теоретические основы релейной защиты и автоматики

Релейная защита и автоматика (РЗА) представляет собой неотъемлемую часть энергосистем любого промышленного предприятия, особенно такого энергоёмкого, как завод «Нефтемаш». В условиях непрерывного производственного цикла и высокой концентрации электротехнического оборудования, малейшие отклонения в электроснабжении могут привести к серьёзным технологическим сбоям, простоям и даже к авариям, чреватым выходом из строя дорогостоящего оборудования.

«Устройства РЗА оперативно производят отключение аварийных участков, расцепляя контакты, обесточивая источники энергии, деактивируя выключатели неисправных систем: электрическая дуга гаснет, короткое замыкание прекращается, требуемый уровень показателей электричества остальных участков энергосистемы восстанавливается.» [11]. Кроме того, устройства автоматики обеспечивают автоматическое восстановление питания, переключение резервов, ввод и вывод оборудования в работу, а также дистанционный контроль и управление. «При использовании ЦР существенно уменьшаются ступени селективности, т. е. повышается быстродействие защит и повышается точность срабатывания.» [13]

Развитие РЗА идёт по пути отказа от электромеханических и статических устройств в пользу микропроцессорных платформ, способных выполнять сложные алгоритмы быстро и с высокой точностью. Это особенно важно на предприятиях, где стабильность электроснабжения напрямую влияет на технологическую безопасность и качество выпускаемой продукции.

В настоящей главе рассматриваются:

- основные принципы и задачи релейной защиты;
- требования к устройствам РЗА в современных промышленных условиях;
- особенности микропроцессорных решений и трудности, возникающие при их внедрении;

- преимущества и недостатки цифровых систем защиты;
- возможности повышения надёжности и отказоустойчивости энергетических объектов за счёт применения новых технологий.

Понимание теоретических основ релейной защиты и автоматики является критически важным для разработки эффективного проекта модернизации электроснабжения подстанции «Восточная» и дальнейшего перехода на современный уровень защиты предприятия в целом.

2.1 Основные функции и требования к РЗА

«Релейная защита обеспечивает постоянное отслеживание состояния элементов энергосистемы и сигнализирует при выявлении расхождения с установленными нормами.» [11]

Основные функции РЗА:

Обнаружение неисправностей: определение наличия аварийного состояния (короткого замыкания, перегрузки, понижения или повышения напряжения и т.д.) [8].

«Селективность: если возникает угроза короткого замыкания, релейная защита лишает питания только конкретный участок. Прочие элементы энергосистемы должны непрерывно функционировать.» [11] Это снижает потери и сохраняет электроснабжение остальных потребителей.

«Быстродействие. От скорости реакции на отсоединение аварийного участка или элемента электросети сети зависит устойчивость всей энергосистемы. Промежуток времени обесточивания аварийного участка делится на две составляющих: срабатывание защиты (применяется в ситуации дальнего расположения защиты) и действие привода выключателя.» [11] Чем быстрее отключается повреждённый участок, тем меньше ущерб для оборудования и технологического процесса.

«Надежность: РЗА должна следовать своим охранным функциям: обеспечивать бесперебойность реакции на протяжении всего периода

использования при любых внешних условиях.» [11] Защита не должна срабатывать ложным образом.

«Чувствительность. Функция РЗ активно реагировать на любые отклонения от нормального, установленного режима.» [11] Способность распознавать даже незначительные отклонения в параметрах электрической сети, если они могут привести к повреждению оборудования.

Простота и удобство эксплуатации: защита должна быть легко настраиваемой, диагностируемой, с понятным интерфейсом для обслуживания персоналом.

Автоматизация: при необходимости - АВР, переключение питания, самодиагностика и возможность интеграции с системами АСУ ТП.

Современные требования к РЗА включают:

- гибкость конфигурации - возможность адаптации под различные условия работы;
- совместимость с цифровыми подстанциями и системами диспетчерского управления [26];
- высокую точность уставок и малую погрешность измерений;
- информационную прозрачность - ведение журналов событий, регистрация аварий и хранение данных в цифровом виде;
- кибербезопасность - защита от внешнего вмешательства в систему управления.

С переходом на микропроцессорную технику, функции РЗА значительно расширились: теперь она может выполнять и задачи анализа, и диагностики, и прогноза. Многофункциональные устройства РЗА сегодня способны объединять в одном корпусе защиту, автоматику, измерение, регистрацию и коммуникации, тем самым упрощая архитектуру энергосистемы и повышая её эффективность.

2.2 Особенности микропроцессорных устройств релейной защиты

Микропроцессорные устройства релейной защиты (МП РЗА) - современные цифровые устройства, в которых функции защиты, автоматики, сигнализации, измерения и регистрации реализованы программно с использованием микропроцессора. В отличие от электромеханических и статических реле, используют вычислительные мощности микропроцессора для реализации гибких алгоритмов и расширенного функционала, что делает их ключевым элементом цифровых подстанций.

Ключевые особенности микропроцессорной защиты:

- «многофункциональность. При малых габаритах одно ЦР заменяет от 10 до 20 аналоговых реле, а также несколько измерительных приборов, которые в совокупности выполняют такие же функции». [13] Одно устройство может выполнять сразу несколько функций: защиту, измерение, логирование событий, регистрацию аварий, коммуникацию с другими системами;
- гибкость и перенастраиваемость. Алгоритмы работы устройства задаются программно. При необходимости параметры защиты и логика её функционирования могут быть изменены без физического вмешательства в конструкцию прибора;
- высокая точность и чувствительность. За счёт цифровой обработки сигналов обеспечивается точное измерение тока, напряжения, частоты и других параметров, а также минимизация погрешностей;
- «непрерывная самодиагностика и высокая аппаратная надежность. В случае неисправности за счет непрерывной самодиагностики мгновенно выдается сигнал о неисправности и возможна оперативная замена этого реле или неисправного блока.» [13];
- наличие встроенной памяти. МП РЗА ведут журнал событий, записывают характеристики аварийных процессов (осциллограммы),

что позволяет проводить последующий анализ работы оборудования и быстро находить причины сбоев;

- интеграция в цифровые системы управления. Современные устройства поддерживают цифровые протоколы связи, что делает возможной их интеграцию в системы АСУ ТП и диспетчерские центры;
- компактность и унификация. МП РЗА имеют меньшие габариты по сравнению с классическими устройствами, легко монтируются, зачастую обладают модульной архитектурой и удобным пользовательским интерфейсом (в том числе через ПК).

Однако несмотря на все достоинства, внедрение микропроцессорной релейной защиты сопровождается и рядом недостатков, особенно на объектах с уже существующей инфраструктурой:

- высокие требования к квалификации персонала. Обслуживание и наладка МП устройств требует знания специфического ПО, цифровых протоколов и понимания сложной логики работы защит;
- учета совместимости при замене старого оборудования на новое;
- наличия технической поддержки и соответствующего программного обеспечения, обеспечения кибербезопасности - уязвимости в ПО могут быть потенциально использованы для вмешательства в энергосистему;
- чувствительность к помехам и сбоям питания. В случае нестабильного электропитания или электромагнитных помех микропроцессорные устройства могут выйти из строя или потребовать перезапуска;
- сложность диагностики отказов. В отличие от простых электромеханических реле, где неисправность часто видна визуально, в МП РЗА сбои могут быть скрытыми и требовать специальной диагностики;
- зависимость от программного обеспечения. Ошибки в логике, сбои прошивки или несанкционированное вмешательство могут привести к отказу защит, поэтому необходим контроль версий, регулярные обновления и защита от несанкционированного доступа.

Пути повышения надёжности системы при внедрении микропроцессорных устройств:

- дублирование и резервирование. Использование резервных каналов связи, дублирующих защит и питания позволяет минимизировать риск отказа системы в целом;
- квалифицированная подготовка персонала. Регулярное обучение специалистов, прохождение курсов повышения квалификации и тренингов по конкретным типам устройств - залог безопасной эксплуатации;
- проведение тщательной пуско-наладочной проверки. Необходимо моделирование возможных аварийных ситуаций и проверка реакции системы до ввода в промышленную эксплуатацию;
- организация централизованного мониторинга. Своевременный контроль состояния РЗА, просмотр журналов событий и удалённая диагностика позволяют оперативно реагировать на любые отклонения.

В целом, переход на микропроцессорные устройства - стратегически важный шаг в сторону цифровизации энергетики, повышения надёжности, скорости и точности работы систем электроснабжения, особенно на критически важных объектах, таких как промышленные предприятия, крупные подстанции и распределительные узлы.

2.3 Трудности, возникающие при модернизации релейной защиты

Модернизация релейной защиты и автоматики (РЗА) на действующих объектах - задача, сопряжённая с рядом организационных, технических и эксплуатационных сложностей, представляет собой сложный и многоэтапный процесс, сопряжённый с рядом технических и организационных трудностей. Несмотря на очевидные преимущества микропроцессорных устройств, переход к ним требует комплексного подхода и предварительной подготовки.

Несовместимость с существующей инфраструктурой.

Одна из главных проблем при модернизации - несовместимость новых микропроцессорных устройств с устаревшими элементами энергосистемы. Электромеханические и статические реле часто работают по другим принципам, используют другие схемы включения и не поддерживают цифровые интерфейсы [25]. Это требует полной или частичной реконструкции вторичных цепей, замену кабельных связей, ввод новых панелей управления.

Необходимость переподготовки персонала.

Обслуживающий и оперативный персонал, привыкший работать с традиционными устройствами, зачастую не имеет достаточных знаний в области программной настройки микропроцессорных РЗА, анализа осциллограмм, конфигурирования логики. Для успешной эксплуатации новых систем требуются специальные курсы повышения квалификации и постоянное обучение.

Высокие начальные затраты.

Несмотря на то, что в долгосрочной перспективе микропроцессорные устройства позволяют снизить эксплуатационные затраты, сами работы по модернизации (покупка оборудования, демонтаж старого, проектирование, монтаж и наладка новых устройств) требуют значительных финансовых вложений.

Риск возникновения ошибок на этапе настройки.

МП РЗА требуют точного и корректного ввода параметров. Ошибки в конфигурации, логике работы или уставках могут привести к несанкционированным отключениям, неработоспособности защиты или, наоборот, к её ложному срабатыванию. Это особенно критично на промышленных предприятиях, где надежность электроснабжения влияет на технологический процесс.

Ограниченные возможности модернизации при непрерывной эксплуатации.

Одним из серьёзных ограничений является необходимость обеспечения бесперебойного электроснабжения объектов во время проведения работ. На большинстве промышленных объектов отключение оборудования для проведения работ возможно только в рамках строго ограниченных временных окон, подстанции часто не могут быть полностью выведены из эксплуатации, что ограничивает временные окна на монтаж, пуско-наладку и тестирование нового оборудования. Это усложняет процесс монтажа, наладки и тестирования новых устройств, увеличивает риск аварий и требует чёткой координации действий.

Проблемы с документацией.

На старых подстанциях техническая документация может быть устаревшей, неполной или вовсе отсутствовать. Это затрудняет анализ существующей схемы, а значит и правильное внедрение новых решений.

Трудности с интеграцией в существующие АСУ.

При модернизации необходимо обеспечить взаимодействие новых микропроцессорных РЗА с существующей автоматизированной системой управления. Проблемы могут возникнуть при отсутствии поддержки нужных протоколов или несовместимости интерфейсов.

Повышенные требования к кибербезопасности.

Цифровизация защиты повышает уязвимость к внешнему вмешательству. Неправильная настройка удалённого доступа, слабые пароли, устаревшее ПО - может стать потенциальной угрозой для стабильной работы оборудования.

Применительно к подстанции «Восточная» 35/6 кВ завода «Нефтемаш» модернизация релейной защиты осложняется рядом факторов. Во-первых, подстанция обеспечивает электроснабжение энергоёмких производственных процессов, включая насосные установки, печи, компрессоры и другое критичное оборудование, связанное с переработкой и транспортировкой

нефти. Это означает, что любые отключения, даже кратковременные, могут повлечь за собой серьёзные технологические и экономические последствия. Во-вторых, существующие схемы релейной защиты на ПС «Восточная» основаны на электромеханических реле, которые морально и физически устарели, а документация на них неполная или неактуальная. Это затрудняет составление корректных технических заданий и проведение адаптации микропроцессорных решений.

Кроме того, завод «Нефтемаш» работает в условиях высокой промышленной загруженности, что ограничивает возможность вывода оборудования в ремонт или реконструкцию. Всё это требует максимально точного проектирования, сжатых сроков реализации и высокой квалификации технического персонала. При этом именно внедрение современных микропроцессорных устройств может обеспечить непрерывность работы, повысить надёжность защиты и снизить количество аварийных отключений.

В условиях ПС «Восточная» 35/6 кВ завода «Нефтемаш», где электроснабжение обеспечивает ключевые участки промышленного производства, критически важно, чтобы система релейной защиты не только защищала оборудование, но и продемонстрировала высокую устойчивость к внешним воздействиям и внутренним сбоям. Использование современных микропроцессорных РЗА позволяет реализовать автоматизированный контроль, обеспечить быстрое выявление неисправностей и повысить общую надёжность энергоснабжения предприятия. При этом необходим грамотный подход к внедрению, включающий как качественное проектирование, так и обеспечение технической поддержки на всём сроке службы оборудования.

Выводы по разделу 2. В данном разделе рассмотрены теоретические основы релейной защиты и автоматики, особенности современных микропроцессорных устройств, а также сложности, с которыми сталкиваются предприятия при переходе от традиционных систем к цифровым технологиям. Микропроцессорная релейная защита обладает значительными преимуществами: высокой точностью, многофункциональностью,

компактностью и возможностью интеграции с цифровыми системами управления. Вместе с тем, её внедрение требует высокой квалификации персонала, продуманного проектирования и организации эффективной диагностики [16].

Анализ показал, что для промышленных объектов, таких как ПС «Восточная» завода «Нефтемаш», модернизация РЗА с переходом на микропроцессорную основу является не только актуальной, но и необходимой мерой для повышения надёжности и безопасности электроснабжения. Также при выборе проектных решений учтены особенности производственного профиля предприятия и характерные для него типы нагрузок, что обеспечивает соответствие системы РЗА реальным условиям эксплуатации.

Полученные теоретические выводы станут основой для разработки проектных решений, представленных в следующей главе.

3 Проект модернизации

Современные подходы к модернизации релейной защиты и автоматики базируются на внедрении цифровых решений, обладающих высокой точностью, надёжностью и возможностью интеграции в автоматизированные системы управления. Для таких объектов, как подстанция «Восточная» 35/6 кВ, питающая промышленный комплекс завода «Нефтемаш», особенно важны непрерывность электроснабжения, точность срабатывания защит и высокая скорость восстановления работоспособности систем после нештатных ситуаций.

Проект модернизации предусматривает полный анализ текущей схемы релейной защиты, выбор современных микропроцессорных устройств, проектирование новых функциональных решений, а также внедрение систем мониторинга и диагностики. Все проектные решения направлены на повышение надёжности, снижение времени отклика на аварии и обеспечение возможности централизованного управления.

3.1 Анализ существующего положения релейной защиты в энергосистеме

Энергоснабжение завода «Нефтемаш» обеспечивается через подстанцию «Восточная» 35/6 кВ, которая входит в распределительную сеть промышленной зоны города Отрадный. Исторически развитие завода началось в 2013 году, однако промышленная зона, включающая территорию предприятия, формировалась с 1950-1960-х годов. В этом контексте энергосистема и её элементы, включая подстанции, имеют как современные, так и устаревшие компоненты.

Подстанция «Восточная» является ключевым узлом питания завода и получает энергию от подстанции «Новоотрадная», введённой в эксплуатацию в 1971 году. Это накладывает определённые технические особенности и

ограничения на работу релейной защиты, так как оборудование на подстанции часто работает в условиях долгого срока эксплуатации и требует регулярной модернизации.

Современные требования к безопасности и надежности электроснабжения промышленных предприятий требуют использования высокоточных и оперативных систем релейной защиты. Однако, учитывая длительную историю эксплуатации подстанции, большая часть установленных защитных устройств относится к устаревшим электромеханическим или частично микропроцессорным системам первых поколений. Такие устройства ограничены по функционалу: они имеют более длительное время срабатывания, меньшую точность и не обеспечивают современных возможностей удалённого мониторинга и диагностики.

Промышленная зона Отрадного, в которой функционирует «Нефтемаш», включает также другие предприятия, например, завод Tarkett, основанный в 2002 году, что свидетельствует о постепенном обновлении инфраструктуры региона. Однако релейная защита и автоматика на подстанции «Восточная» пока не соответствует уровню автоматизации и надежности, необходимому для современных промышленных объектов с высоким уровнем энергопотребления и критичностью процессов.

Отсутствие современных микропроцессорных устройств релейной защиты снижает эффективность быстрого реагирования на аварийные ситуации и повышает риск повреждений оборудования и технологических простоев. Кроме того, ограниченные возможности диагностики и мониторинга усложняют профилактическое обслуживание и своевременное выявление потенциальных неисправностей.

На основе анализа существующего состояния можно сделать вывод, что внедрение современных микропроцессорных релейных устройств и автоматизированных систем мониторинга является необходимым шагом для повышения надежности и безопасности энергоснабжения завода «Нефтемаш». Модернизация позволит не только улучшить защиту оборудования, но и

повысить эффективность управления энергосистемой предприятия, адаптируя её к требованиям современного производства.

3.2 Выбор современных микропроцессорных устройств РЗА

Это ключевой этап в процессе модернизации системы защиты подстанции и энергоснабжения завода «Нефтемаш». При подборе оборудования учитываются требования к надежности, быстродействию, функциональности и совместимости с существующими системами.

Для завода «Нефтемаш» и ПС «Восточная» следует ориентироваться на устройства известных производителей, проверенные в промышленных условиях, например, Siemens SIPROTEC, Schneider Electric Sepam, ABB Relion и др. [23] При выборе важно учесть:

- наличие функций защиты для всех необходимых видов коротких замыканий и перегрузок;
- возможность интеграции с существующей системой диспетчеризации;
- удобство эксплуатации и обслуживания;
- экономическую эффективность, учитывая затраты на закупку, монтаж и эксплуатацию.

Учитывая специфику завода с его производственными площадками и технологическими процессами, а также необходимость надежного электроснабжения, модернизация с применением микропроцессорных устройств позволит существенно повысить устойчивость энергосистемы и снизить риски простоев и аварий.

Так же в условиях современных санкций и политики импортозамещения, для завода «Нефтемаш» и подстанции «Восточная» критически важно использовать только российское оборудование. Это обеспечит стабильность поставок, техническую поддержку и гарантирует соответствие отечественным нормативам.

На российском рынке представлены несколько достойных производителей микропроцессорных устройств релейной защиты, подходящих для модернизации релейной защиты подстанции 35/6 кВ:

- «Релематика» - «в настоящее время наблюдается активное внедрение возобновляемых источников энергии в энергосистему» [5]
- «НПП ЭКРА» - используется на более чем 400 электростанциях и 2100 подстанциях в России, включая объекты 110-750 кВ.
- АО «ЧЭАЗ» (Чебоксарский электроаппаратный завод) - предоставляет комплексные решения для строительства и реконструкции систем распределения электроэнергии, включая проектирование, производство и монтаж электротехнического оборудования 0,4-220 кВ. Компания выпускает широкий ассортимент продукции, включая комплектные трансформаторные подстанции, релейную защиту, низковольтные устройства. [15]

Выбор данных устройств обоснован не только техническими характеристиками, но и необходимостью гарантировать бесперебойную работу электроснабжения завода «Нефтемаш», учитывая специфику промзоны и требования к безопасности на объекте.

Мировые производители микропроцессорных устройств релейной защиты, такие как ABB, Siemens, Schneider Electric, обладают многолетним опытом и широким ассортиментом оборудования с продвинутыми функциями [24]. Их устройства отличаются высокой точностью срабатывания, расширенными функциями самодиагностики, интеграцией с системами телемеханики и SCADA, а также удобством настройки через специализированные программные комплексы [22]. Однако в последние годы применение импортного оборудования в отечественной энергетике всё более ограничивается из-за санкций, требований к безопасности и политике импортозамещения.

Отечественные производители релейной защиты значительно продвинулись в развитии своих продуктов. Современные российские

микропроцессорные устройства обеспечивают надежность и функциональность. Кроме того, отечественное оборудование адаптировано под эксплуатационные условия российских электросетей: особенности нагрузки, климатические условия, частотные параметры. Это снижает количество ложных срабатываний и увеличивает срок службы.

Тенденция в отечественной энергетике однозначна: переход на использование российских устройств релейной защиты становится приоритетом. Это связано не только с политическими факторами, но и с экономической целесообразностью, упрощением логистики, а также возможностью локализованного сервисного обслуживания и модернизации.

Отечественные производители микропроцессорной релейной защиты уверенно наращивают долю рынка в России, становясь ключевыми партнерами энергетических компаний. Их продукция отвечает современным требованиям по надежности, безопасности и интеграции в цифровые энергосистемы, что обеспечивает устойчивое развитие электроэнергетики в условиях сложной геополитической ситуации.

В контексте модернизации подстанции «Восточная» и обеспечения бесперебойной работы энергоснабжения завода «Нефтемаш» особого внимания заслуживает применение устройства релейной защиты серии Сириус-Т. Устройство обеспечивает высокоточное определение аварийных режимов, реализует расширенный набор защит (включая токовые, дифференциальные, дистанционные), а также поддерживает обмен данными по стандарту МЭК 61850. [2] На рисунке 1 рассмотрим внешний вид терминала Сириус-Т.



Рисунок 1 – Внешний вид терминала Сириус-Т

Сириус-Т хорошо адаптирован к российским условиям эксплуатации - как в части совместимости с существующим оборудованием, так и в плане устойчивости к внешним воздействиям. В условиях ограничений на использование импортных систем, данное устройство представляет собой не просто аналог зарубежных решений, а полноценную технологическую альтернативу, способную обеспечить высокий уровень защиты и диагностики.

Выбор в пользу Сириус-Т обусловлен его гибкостью, универсальностью и полной совместимостью с архитектурой проектируемой схемы. Это особенно актуально для объектов с высокой степенью ответственности, где требуется не только надёжная защита, но и возможность оперативного реагирования, удалённого мониторинга и глубокого анализа событий в системе. Применение устройств Сириус-Т позволяет реализовать качественный скачок в надёжности и интеллектуализации энергосистемы, соответствующий текущим вызовам и требованиям отрасли.

3.3 Организация мониторинга и диагностики устройств релейной защиты

Эффективная организация мониторинга и диагностики устройств релейной защиты является ключевым элементом современной энергосистемы, особенно при внедрении микропроцессорных решений. Одним из основных преимуществ таких устройств является их способность не только выполнять функции защиты, но и собирать, хранить и передавать данные о своем состоянии, режимах работы и возникающих неисправностях.

Мониторинг и диагностика позволяют:

- оперативно выявлять отказы и неисправности в работе РЗА;
- анализировать характер и причины срабатываний;
- проводить техническое обслуживание по состоянию, а не по регламенту;
- повышать общую надежность и безопасность энергоснабжения объекта.

Основные функции мониторинга:

- сбор данных - регистрация аварийных и предупредительных сигналов, осциллографирование процессов при срабатывании;
- отображение информации - вывод состояния оборудования на панели устройства или в систему АСУ ТП;
- передача данных - возможность удалённого доступа к информации, в том числе по защищённым каналам связи;
- анализ данных - автоматическая обработка и выдача диагностических отчётов.

С учётом перспективной модернизации электроснабжения и перехода на микропроцессорные РЗА, на подстанции «Восточная» предполагается внедрение комплексной системы мониторинга на базе отечественных решений. Эти системы способны интегрироваться с существующей АСУ ТП, обеспечивая:

- централизованный контроль за всеми защитами;
- дистанционную диагностику и анализ работы оборудования;

- снижение времени реагирования на неисправности;
- архивирование информации для последующего технического анализа и обучения персонала.

Особое внимание должно уделяться кибербезопасности, так как передача диагностических данных по сетям связи требует защиты от несанкционированного доступа и искажения информации. Использование отечественных решений также снижает риски, связанные с импортозависимостью в условиях текущей внешнеэкономической ситуации.

Выводы по разделу 3. Организация эффективного мониторинга и диагностики - неотъемлемая часть модернизации РЗА. Это направление не только улучшает техническое обслуживание, но и служит базой для перехода к концепции «умной» подстанции, где управление, анализ и защита работают в едином цифровом контуре.

4 Расчет электрических нагрузок

Расчёт электрических нагрузок - обязательный этап проектирования и модернизации систем электроснабжения. Только благодаря точному определению токов нагрузки и короткого замыкания можно корректно выбрать защитные аппараты, сечения проводов, настроить уставки РЗА и обеспечить надёжность системы в длительной перспективе.

В рамках модернизации подстанции «Восточная», питающей завод «Нефтемаш», особое внимание уделяется анализу текущих и прогнозируемых величин нагрузки. Это нужно для:

- верного подбора уставок микропроцессорных защит;
- оценки эксплуатационных режимов оборудования;
- повышения устойчивости и селективности системы защиты.

Расчёты основаны на стандартной архитектуре промышленных сетей РФ с учётом энергоёмкого технологического оборудования, сменного графика потребления, пусковых токов и технологических перегрузок.

«Определение электрических нагрузок является первым этапом проектирования системы электроснабжения. По величине электрических нагрузок выбирают и проверяют электрооборудование СЭС, определяют потери мощности и электроэнергии» [12]

После определения нагрузки важно рассчитать токи короткого замыкания.

Только на основе этих расчётов можно обеспечить:

- минимальные значения токов срабатывания защит;
- правильное сечение кабелей и проводов;
- высокую селективность и надёжность всей системы.

4.1 Расчёт электрических нагрузок

Одной из приоритетных задач при модернизации системы электроснабжения промышленного предприятия выступает расчёт электрических нагрузок. Этот этап необходим для определения требуемой мощности оборудования, выбора трансформаторов и распределительных устройств, а также обеспечения устойчивой и энергоэффективной работы системы в текущих и перспективных условиях.

Целью расчета электрических нагрузок является:

- вычисление активной, реактивной и полной расчётной мощности;
- подбор оборудования с учётом возможного роста нагрузок;
- проектирование сети, устойчивой к перегрузкам и обладающей минимальными потерями;
- определение коэффициента загрузки оборудования и оценка энергоэффективности всей системы.

Расчёт осуществляется поэтапно и включает:

- анализ исходных данных: характеристики и количество электроприёмников, их принадлежность к определённой категории надёжности, схема размещения, режимы функционирования;
- вычисление номинальных нагрузок для технологического оборудования и систем освещения;
- применение коэффициентов спроса и одновременности для получения расчётных нагрузок. «Коэффициент одновременности представляет собой отношение величины совмещенной максимальной нагрузки к сумме максимумов нагрузок отдельных потребителей или их групп.» [4];
- определение параметров реактивной мощности с учётом компенсирующих устройств;
- расчёт полной мощности, а также потерь, возникающих при трансформации энергии;

- учёт перспективной нагрузки.

В процессе классификации все потребители электроэнергии были распределены по трём категориям надёжности, при этом в проекте учтены электроприёмники I и II категорий. К I категории отнесены электроприемники, отключение которых может привести к нарушению технологического процесса и значительным убыткам:

- заготовительный цех,
- механический цех,
- сварочно-сборочный участок,
- термический участок,
- гальванический участок,
- компрессорная станция,
- линия покраски и сушки,
- линия плазменной и лазерной резки.

К II категории отнесены электроприемники, отключение которых вызывает простой оборудования, но не приводит к тяжёлым последствиям:

- вентиляция и вытяжка,
- административно-бытовой корпус,
- складские и вспомогательные помещения.

Распределение по секциям электроснабжения принято следующим образом:

- ШМА1 — электроприемники I категории;
- ШМА2 — электроприемники II категории;
- ЩО — щит освещения.

В таблице 2 приведены данные по электроприёмникам, которые будут использованы при расчётах.

Таблица 2 - Исходные данные для расчёта электрических нагрузок

Наименование электроприемника	P_n , кВт	n	K_n	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$
Заготовительный цех	145	1	0,8	0,82	0,70
Механический цех	190	1	0,8	0,82	0,70
Сварочно-сборочный участок	210	1	0,85	0,80	0,75
Термический участок	95	1	0,8	0,82	0,70
Гальванический участок	35	1	0,7	0,84	0,65
Компрессорная станция	80	1	0,7	0,84	0,65
Линия покраски и сушки	60	1	0,7	0,84	0,65
Линия плазменной и лазерной резки	85	1	0,75	0,82	0,70
Вентиляция и вытяжка	45	1	0,6	0,86	0,60
Административно-бытовой корпус	18	1	0,5	0,86	0,60
Складские и вспомогательные помещения	12	1	0,5	0,86	0,60
Освещение	5	-	-	-	0,60

Секция ШМА1 (электроприемники I категории)

Заготовительный цех

Номинальная мощность: $P_n = 145$ кВт;

Количество: $n = 1$;

Коэффициент использования: $K_n = 0,8$;

Активная мощность:

$$P = 145 \cdot 1 \cdot 0,8 = 116,0 \text{ кВт}, \quad (1)$$

$$\cos\varphi = 0,82 \rightarrow \operatorname{tg}\varphi = \frac{\sqrt{1 - 0,82^2}}{0,82} \approx 0,70. \quad (2)$$

Реактивная мощность:

$$Q = 116,0 \cdot 0,70 = 81,2 \text{ кВАр} \quad (3)$$

Полная мощность:

$$S = \sqrt{116,0^2 + 81,2^2} \approx 141,6 \text{ кВА} \quad (4)$$

Максимальная активная мощность:

$$P_M = 116,0 \cdot 1,3 = 150,8 \text{ кВт} \quad (5)$$

Полная мощность с учётом спроса:

$$S_M = \sqrt{150,8^2 + 81,2^2} \approx 171,3 \text{ кВА} \quad (6)$$

Механический цех

$$P_H = 190 \text{ кВт}, n = 1, K_H = 0,8$$

$$P = 190 \cdot 1 \cdot 0,8 = 152,0 \text{ кВт}, \quad (7)$$

$$\cos\varphi = 0,82 \rightarrow \operatorname{tg}\varphi \approx 0,70,$$

$$Q = 152,0 \cdot 0,70 = 106,4 \text{ кВАр}, \quad (8)$$

$$S = \sqrt{152,0^2 + 106,4^2} \approx 185,5 \text{ кВА}, \quad (9)$$

$$P_M = 152 \cdot 1,3 = 197,6 \text{ кВт}, \quad (10)$$

$$S_M = \sqrt{197,6^2 + 106,4^2} \approx 224,4 \text{ кВА}. \quad (11)$$

Сварочно-сборочный участок

$$P_H = 210 \text{ кВт}, K_H = 0,85$$

$$P = 210 \cdot 0,85 = 178,5 \text{ кВт}, \quad (12)$$

$$\cos\varphi = 0,80 \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi \approx 0,75,$$

$$Q = 178,5 \cdot 0,75 = 133,9 \text{ кВАр}, \quad (13)$$

$$S = \sqrt{178,5^2 + 133,9^2} \approx 223,1 \text{ кВА}, \quad (14)$$

$$P_M = 178 \cdot 1,3 = 232,1 \text{ кВт}, \quad (15)$$

$$S_M = \sqrt{232,1^2 + 133,9^2} \approx 268,0 \text{ кВА}. \quad (16)$$

Термический участок

$$P_H = 95 \text{ кВт}, K_H = 0,8$$

$$P = 95 \cdot 0,8 = 76,0 \text{ кВт}, \quad (17)$$

$$\cos\varphi = 0,82 \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi \approx 0,70,$$

$$Q = 76,0 \cdot 0,70 = 53,2 \text{ кВАр}, \quad (18)$$

$$S = \sqrt{76^2 + 53,2^2} \approx 92,8 \text{ кВА}, \quad (19)$$

$$P_M = 76,0 \cdot 1,3 = 98,8 \text{ кВт}, \quad (20)$$

$$S_M = \sqrt{98,8^2 + 53,2^2} \approx 112,2 \text{ кВА}. \quad (21)$$

Гальванический участок

$$P_H = 35 \text{ кВт}, K_H = 0,7$$

$$P = 35 \cdot 0,7 = 24,5 \text{ кВт}, \quad (22)$$

$$\cos\varphi = 0,84 \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi \approx 0,65,$$

$$Q = 24,5 \cdot 0,65 = 15,9 \text{ кВАр}, \quad (23)$$

$$S = \sqrt{24,5^2 + 15,9^2} \approx 29,2 \text{ кВА}, \quad (24)$$

$$P_M = 24,5 \cdot 1,3 = 31,9 \text{ кВт}, \quad (25)$$

$$S_M = \sqrt{31,9^2 + 15,9^2} \approx 35,6 \text{ кВА}. \quad (26)$$

Компрессорная станция

$$P_H = 80 \text{ кВт}, K_H = 0,7$$

$$P = 80 \cdot 0,7 = 56,0 \text{ кВт}, \quad (27)$$

$$\cos\varphi = 0,84 \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi \approx 0,65,$$

$$Q = 56,0 \cdot 0,65 = 36,4 \text{ кВАр}, \quad (28)$$

$$S = \sqrt{56^2 + 36,4^2} \approx 66,8 \text{ кВА}, \quad (29)$$

$$P_M = 56,0 \cdot 1,3 = 72,8 \text{ кВт}, \quad (30)$$

$$S_M = \sqrt{72,8^2 + 36,4^2} \approx 81,4 \text{ кВА}. \quad (31)$$

Линия покраски и сушки

$$P_H = 60 \text{ кВт}, K_H = 0,7$$

$$P = 60 \cdot 0,7 = 42,0 \text{ кВт}, \quad (32)$$

$$\cos\varphi = 0,84 \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi \approx 0,65,$$

$$Q = 42,0 \cdot 0,65 = 27,3 \text{ кВАр}, \quad (33)$$

$$S = \sqrt{42^2 + 27,3^2} \approx 50,1 \text{ кВА}, \quad (34)$$

$$P_M = 42,0 \cdot 1,3 = 54,6 \text{ кВт}, \quad (35)$$

$$S_M = \sqrt{54,6^2 + 27,3^2} \approx 61,0 \text{ кВА}. \quad (36)$$

Линия плазменной и лазерной резки

$$P_H = 85 \text{ кВт}, K_H = 0,75$$

$$P = 85 \cdot 0,75 = 63,8 \text{ кВт}, \quad (37)$$

$$\cos\varphi = 0,82 \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi \approx 0,70,$$

$$Q = 63,8 \cdot 0,70 = 44,7 \text{ кВАр}, \quad (38)$$

$$S = \sqrt{63,8^2 + 44,7^2} \approx 77,9 \text{ кВА}, \quad (39)$$

$$P_M = 63,8 \cdot 1,3 = 82,9 \text{ кВт}, \quad (40)$$

$$S_M = \sqrt{82,9^2 + 44,7^2} \approx 94,2 \text{ кВА}. \quad (41)$$

Секция ШМА2 (электроприемники II категории)

Вентиляция и вытяжка

Номинальная мощность: $P_H = 45$ кВт;

Количество: $n = 1$;

Коэффициент использования: $K_{и} = 0,6$;

Активная мощность:

$$P = 45 \cdot 1 \cdot 0,6 = 27,0 \text{ кВт}, \quad (42)$$

$$\cos\varphi = 0,86 \rightarrow \operatorname{tg}\varphi = \frac{\sqrt{1 - 0,86^2}}{0,86} \approx 0,60. \quad (43)$$

Реактивная мощность:

$$Q = 27,0 \cdot 0,60 = 16,2 \text{ кВАр} \quad (44)$$

Полная мощность:

$$S = \sqrt{27,0^2 + 16,2^2} \approx 31,5 \text{ кВА} \quad (45)$$

Максимальная активная мощность:

$$P_M = 27,0 \cdot 1,3 = 35,1 \text{ кВт} \quad (46)$$

Полная мощность с учётом спроса:

$$S_M = \sqrt{35,1^2 + 16,2^2} \approx 38,7 \text{ кВА} \quad (47)$$

Административно-бытовой корпус

$$P_H = 18 \text{ кВт}, K_{и} = 0,5$$

$$P = 18 \cdot 0,5 = 9,0 \text{ кВт}, \quad (48)$$

$$\cos\varphi = 0,86 \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi \approx 0,60,$$

$$Q = 9,0 \cdot 0,60 = 5,4 \text{ кВАр}, \quad (49)$$

$$S = \sqrt{9^2 + 5,4^2} \approx 10,5 \text{ кВА}, \quad (50)$$

$$P_M = 9,0 \cdot 1,3 = 11,7 \text{ кВт}, \quad (51)$$

$$S_M = \sqrt{11,7^2 + 5,4^2} \approx 12,9 \text{ кВА}. \quad (52)$$

Складские и вспомогательные помещения

$$P_H = 12 \text{ кВт}, K_H = 0,5$$

$$P = 12 \cdot 0,5 = 6,0 \text{ кВт}, \quad (53)$$

$$\cos\varphi = 0,86 \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi \approx 0,60,$$

$$Q = 6,0 \cdot 0,60 = 3,6 \text{ кВАр}, \quad (54)$$

$$S = \sqrt{6^2 + 3,6^2} \approx 7,0 \text{ кВА}, \quad (55)$$

$$P_M = 6,0 \cdot 1,3 = 7,8 \text{ кВт}, \quad (56)$$

$$S_M = \sqrt{7,8^2 + 3,6^2} \approx 8,6 \text{ кВА}. \quad (57)$$

Секция ЩО (освещение)

Площадь помещения: $A = 1000 \text{ м}^2$

Удельная мощность освещения: $p = 0,005 \text{ кВт/м}^2$

Активная мощность: $P = 0,005 \cdot 1000 = 5,0 \text{ кВт}$

$\operatorname{tg}\varphi = 0,60, Q = 5,0 \cdot 0,60 = 3,0 \text{ кВАр}$

$$S = \sqrt{5^2 + 3^2} \approx 5,8 \text{ кВА}, \quad (58)$$

$$P_M = 5,0 \cdot 1,1 = 5,5 \text{ кВт}, \quad (59)$$

$$S_M = \sqrt{5,5^2 + 3^2} \approx 6,3 \text{ кВА}. \quad (60)$$

Общие итоги по цеху

Активная расчётная мощность:

$$P_{\text{итого}} = P_{\text{ШМА1}} + P_{\text{ШМА1}} + P_{\text{ЩО}} = 708,8 + 42,0 + 5,0 = 755,8 \text{ кВт} \quad (61)$$

Реактивная мощность:

$$Q_{\text{итого}} = Q_{\text{ШМА1}} + Q_{\text{ШМА1}} + Q_{\text{ЩО}} = 498,9 + 25,2 + 3,0 = 527,1 \text{ кВАр} \quad (62)$$

Полная мощность:

$$S_{\text{итого}} = \sqrt{Q_{\text{итого}}^2 + P_{\text{итого}}^2} = \sqrt{527,1^2 + 755,8^2} \approx 920,3 \text{ кВА} \quad (63)$$

Максимальная активная мощность:

$$P_{\text{м.итого}} = P_{\text{ШМА1.м}} + P_{\text{ШМА1.м}} + P_{\text{ЩО.м}} = 921,5 + 54,6 + 5,5 = 981,6 \text{ кВт} \quad (64)$$

Максимальная полная мощность:

$$S_{\text{м.итого}} = \sqrt{981,6^2 + 527,1^2} \approx 1120,9 \text{ кВА} \quad (65)$$

Результаты расчётов по ШМА1 сведём в таблицу 3, по ШМА в таблицу 4, секция ЩО в таблицу 5, сводную таблицу по РУ в таблице 6.

Таблица 3 – Итоги расчета нагрузок по секциям. Секция ШМА1 (I категория)

Наименование оборудования	P_n , кВт	n	$K_{и}$	$P_{см}$, кВт	$tg\phi$	$Q_{см}$, кВАр	$S_{см}$, кВА	P_m , кВт	C_m , кВА
Заготовительный цех	145	1	0,8	116,0	0,70	81,2	141,6	150,8	171,3
Механический цех	190	1	0,8	152,0	0,70	106,4	185,5	197,6	224,4
Сварочно-сборочный участок	210	1	0,8 5	178,5	0,75	133,9	223,1	232,1	268,0
Термический участок	95	1	0,8	76,0	0,70	53,2	92,8	98,8	112,2
Гальванический участок	35	1	0,7	24,5	0,65	15,9	29,2	31,9	35,6
Компрессорная станция	80	1	0,7	56,0	0,65	36,4	66,8	72,8	1,4
Линия покраски и сушки	60	1	0,7	42,0	0,65	27,3	50,1	54,6	1,0
Линия плазменной и лазерной резки	85	1	0,7 5	63,8	0,70	44,7	77,9	82,9	4,2
Итого	-	-	-	708,8	-	498,9	865,5	921,5	1054,4

Таблица 4 - Итоги расчета нагрузок по секциям. Секция ШМА2 (II категория)

Наименование оборудования	P_n , кВт	n	$K_{и}$	$P_{см}$, кВт	$tg\phi$	$Q_{см}$, кВАр	$S_{см}$, кВА	P_m , кВт	C_m , кВА
Вентиляция и вытяжка	45	1	0,6	27,0	0,60	16,2	31,5	35,1	38,7
Административно-бытовой корпус	18	1	0,5	9,0	0,60	5,4	10,5	11,7	12,9
Складские и вспомогательные помещения	12	1	0,5	6,0	0,60	3,6	7,0	7,8	8,6
Итого	-	-	-	42,0	-	25,2	49,0	54,6	60,2

Таблица 5 - Секция ЩО (освещение)

Наименование нагрузки	$P_{см}$, кВт	$Q_{см}$, кВАр	$S_{см}$, кВА	P_M , кВт	C_M , кВА
Освещение	5,0	3,0	5,8	5,5	6,3

Таблица 6 - Сводная таблица по РУ

Наименование РУ	$P_{см}$, кВт	$Q_{см}$, кВАр	$S_{см}$, кВА	P_M , кВт	C_M , кВА
ШМА1	708,8	498,9	865,5	921,5	1054,4
ШМА2	42,0	25,2	49,0	54,6	60,2
ЩО	5,0	3,0	5,8	5,5	6,3
Итого	755,8	527,1	920,3	981,6	1120,9

В результате расчетов были получены расчетные данные.

4.2 Расчёт токов короткого замыкания

Один из ключевых этапов при проектировании и техническом переоснащении систем электроснабжения - определение параметров токов короткого замыкания (КЗ). Такие токи возникают при аварийных ситуациях, когда происходит замыкание между фазами или между фазой и землёй. Расчёт токов КЗ имеет решающее значение для обеспечения надёжности и безопасности работы электроустановок, так как от него напрямую зависит:

- корректный выбор и проверка коммутационной аппаратуры по предельным токам отключения;
- анализ прочности кабельных линий и шинопроводов на воздействие термических и электродинамических нагрузок;
- точная настройка уставок релейной защиты с учётом селективности;
- оценка допустимых уровней кратковременной перегрузки элементов сети при возникновении аварий.

Для выполнения расчёта применяется укрупнённая однолинейная схема, включающая все основные компоненты цепи: источник питания (система), воздушную линию электропередачи (ВЛ) и силовой трансформатор. Определение токов производится в наиболее значимых точках цепи — на стороне высшего напряжения (точка К1) и на стороне пониженного напряжения (точка К2).

Схема, используемая в расчётах, включает все элементы, влияющие на сопротивление цепи короткого замыкания. Для каждой из точек К1 и К2 строится соответствующая схема замещения, представленная на рисунке 2. Такой подход позволяет учесть параметры трансформатора, длину и сечение линии, а также характеристики питающей системы, что необходимо для получения корректных значений токов КЗ.

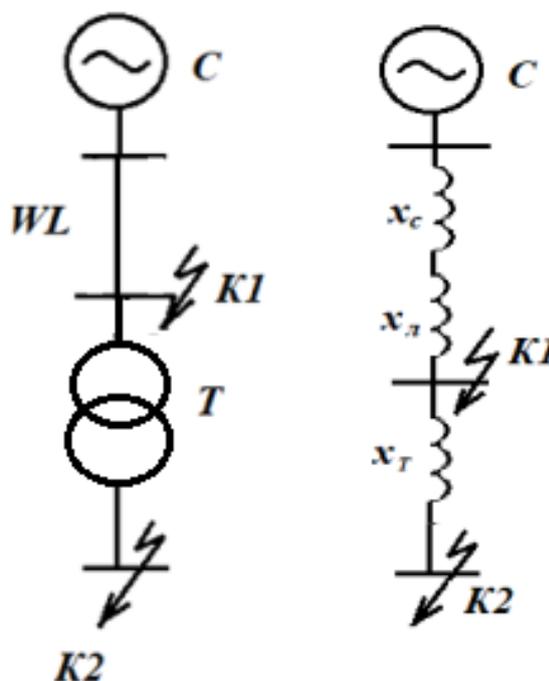


Рисунок 2 - Упрощенная схема для расчёта токов короткого замыкания.

Для выполнения расчёта приняты следующие исходные параметры, приведённые в таблице 7:

Таблица 7 - Исходные данные для расчёта токов КЗ

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Мощность системы	S_{\square}	1600 МВА
Длина ВЛ	l	19 км
Удельное сопротивление ВЛ	$x_{уд}$	0,4 Ом/км
Базисная мощность	S_e	1000 МВА
Базисное напряжение на стороне ВН	$U_e(ВН)$	35 кВ
Базисное напряжение на стороне НН	$U_e(НН)$	6 кВ

Для расчёта используется трансформатор ТДН-40000/35/6, имеющий следующие характеристики в таблице 8:

Таблица 8 — Паспортные данные трансформатора ТДН-40000/35/6

Параметр	Обозначение	Значение
Номинальная мощность	$S_{ном}$	40 МВА
Номинальное напряжение ВН	$U_{вн}$	35 кВ
Номинальное напряжение НН	$U_{нн}$	6 кВ
Напряжение КЗ	U_k	10%
Потери короткого замыкания	ΔP_k	160 кВт
Потери холостого хода	ΔP_{xx}	22 кВт
Ток холостого хода	I_{xx}	0,8%
Активное сопротивление	R_T	0,65 Ом
Реактивное сопротивление	X_T	5,25 Ом
Реактивные потери холостого хода	ΔQ_k	310 кВАр

Сопротивление системы:

$$x_{бс} = \frac{S_{\sigma}}{S_k} = \frac{1000}{1600} = 0,625 \text{ о. е.} \quad (66)$$

Сопротивление воздушной линии:

$$x_{б,вл} = x_{уд} l \frac{S_б}{U_{ср}^2} = 0,4 \cdot 19 \frac{1000}{35^2} = 6,204 \text{ о. е.} \quad (67)$$

Сопротивление трансформатора:

$$x_{б,Т} = \frac{U_{к.в. \%}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном.Т}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 2,5 \text{ о. е.} \quad (68)$$

Расчёт токов короткого замыкания в точке К₁ (сторона ВН)

Результирующее сопротивление:

$$x_{*рез(б)} = x_{*б,с} + x_{*б,л} = 0,625 + 6,204 = 6,829 \text{ о. е.} \quad (69)$$

Базисный ток:

$$I_б = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_б} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 35} = 16,50 \text{ кА} \quad (70)$$

Ток КЗ:

$$I_{п} = \frac{E_{*б}}{x_{*рез(б)}} \cdot I_б = \frac{1}{6,829} \cdot 16,50 = 2,42 \text{ кА} \quad (71)$$

Ударный ток (при $k_{уд} = 1,6$):

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{п,о} \cdot k_{уд} = \sqrt{2} \cdot 2,42 \cdot 1,6 = 5,49 \text{ кА} \quad (72)$$

Расчёт токов короткого замыкания в точке К₂ (сторона НН)

Результирующее сопротивление:

$$x_{*рез(б)} = x_{*б,c} + x_{*б,l} + x_{*б,T} = 0,625 + 6,204 + 2,5 = 9,329 \text{ о. е.} \quad (73)$$

Базисный ток:

$$I_б = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_б} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6} = 96,23 \text{ кА} \quad (74)$$

Ток КЗ:

$$I_{п} = \frac{E''_{*б}}{x_{*рез(б)}} \cdot I_б = \frac{1}{9,329} \cdot 96,329 = 10,31 \text{ кА} \quad (75)$$

Ударный ток (при $k_{уд} = 1,8$):

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{п,о} \cdot k_{уд} = \sqrt{2} \cdot 10,31 \cdot 1,8 = 26,27 \text{ кА} \quad (76)$$

Сведём результаты расчётов в таблицу 9.

Таблица 9 - Результаты расчёта токов КЗ

Точка КЗ	I, кА	$i_{уд}$, кА
К1 (35 кВ)	2,42	5,49
К2 (6 кВ)	10,31	26,27

Вывод по разделу 4. В результате выполненного расчёта были получены эффективные значения токов трёхфазного короткого замыкания, а также соответствующие ударные токи в двух ключевых точках электросхемы: на стороне высокого (К1) и низкого (К2) напряжения.

Для точки К1 (35 кВ) действующее значение тока КЗ составило 2,42 кА, а величина ударного тока достигла 5,49 кА. На низковольтной стороне трансформатора (6 кВ, точка К2) наблюдаются более высокие значения: $I_{\square} = 10,31$ кА, $i_{уд} = 26,27$ кА.

Анализ полученных результатов показывает, что токи короткого замыкания не превышают предельно допустимых значений, регламентированных в ГОСТ 14209–85. Это подтверждает, что установленное оборудование, включая трансформаторы и распределительные устройства, обладает достаточным запасом по термической и электродинамической устойчивости и способно надёжно функционировать даже при возникновении аварийных режимов.

Применение трансформатора типа ТДН-40000/35/6 признано обоснованным: его технические характеристики соответствуют требованиям по надёжности и безопасности, обеспечивая стабильную работу системы электроснабжения как в штатных условиях, так и при кратковременных нарушениях.

5 Релейная защита и автоматика силового трансформатора

«Устройства микропроцессорной защиты семейства «Сириус-Т» предназначены для выполнения функций основной защиты двухобмоточного трансформатора, включая трансформаторы с расщеплённой обмоткой НН» [4]. Для организации комплексной защиты силового трансформатора ТДН-4000/35/6 на ПС «Нефтемаш» выбран шкаф релейной защиты и автоматики ШЭРА-ТТ-40016 (внешний вид представлен на рисунке 3), обеспечивающий базовый комплект функций для работы с трансформаторами напряжением до 35 кВ. Данный шкаф содержит устройство регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) - Сириус-2-Т, которое применяется для автоматического регулирования выходного напряжения трансформатора. Выбранный шкаф обладает четырьмя комплектами микропроцессорных терминалов.

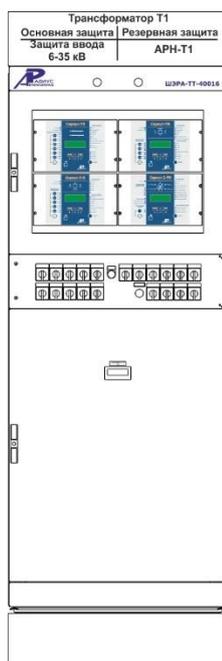


Рисунок 3 – Вид шкафа ШЭРА-ТТ-40016

Комплект регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой построен на базе устройства «Сириус-2-Т»

«Основные функции:

- автоматическое поддержание напряжения в заданном диапазоне с коррекцией уровня напряжения по току нагрузки;
- управление электроприводами РПН в импульсном и непрерывном режимах;
- контроль положения РПН и вывод текущей ступени на внешний индикатор;
- контроль исправности приводов РПН;
- одновременный контроль двух систем шин;
- оперативное переключение регулирования с одной системы шин на другую;
- оперативное изменение напряжения поддержания;
- блокировка регулирования при перегрузке по току, при пониженном и повышенном напряжении, при повышенном напряжении нулевой или обратной последовательности, а также по входным - сигналам и при неисправности электропривода РПН;
- наличие режима ручного управления электроприводом РПН.» [14]

Комплект резервных защит трансформатора и АУВ стороны ВН построен на базе устройства «Сириус-УВ»

«Основные функции:

- трехступенчатая трехфазная направленная МТЗ со стороны ВН с независимой выдержкой времени с комбинированным пуском по напряжению от стороны СН и/или НН и блокировкой по содержанию второй гармоники в фазных токах для защиты от ложных срабатываний при броске тока намагничивания (БНТ) силового трансформатора;
- четырехступенчатая направленная токовая защита нулевой последовательности от КЗ на землю с независимой выдержкой времени (ТЗНП) и блокировкой по содержанию второй гармоники в токе нулевой последовательности для защиты от ложных срабатываний при БНТ силового трансформатора;

- газовая защита трансформатора и РПН (прием сигналов от второй группы контактов газовых реле с действием на отключение или сигнализацию);
- автоматическое ускорение МТЗ и ТЗНП при включении;
- защита от обрыва фаз (ЗОФ) и несимметричного режима по току обратной последовательности с независимой выдержкой времени;
- защита минимального напряжения (ЗМН);
- защита от повышения напряжения (ЗПН);
- защита от появления в первичной сети напряжения нулевой последовательности;
- автоматика управления выключателем (АУВ) с трехфазным или пофазным приводом, с двумя электромагнитами отключения управление выключателем стороны ВН;
- контроль исправности цепей включения и отключения выключателя;
- защита электромагнитов включения и отключения от длительного протекания тока;
- защита от непереключения фаз (ЗНФ) и неполнофазного режима (ЗНФР);
- двухступенчатая защита от снижения давления элегаза (воздуха) в выключателе с действием на сигнал и на ускоренное срабатывание схемы (устройство резервирования при отказе выключателя) УРОВ при попытке отключения от одной из защит [10].
- одно или двукратное АПВ;
- контроль напряжения и/или синхронизма при командном включении или АПВ (только для комплекта БПВА.468263.102-02);
- УРОВ с автоматической проверкой исправности выключателя или с дублированным пуском от защит;
- контроль цепей трансформатора напряжения (ТН);

- контроль сопротивления изоляции цепей газовых защит с переводом действия газовых защит на сигнализацию при снижении сопротивления изоляции.» [19]

Комплект защиты и автоматики трансформаторного ввода 6-35 кВ построен на базе устройства «Сириус-2-В»

«Основные функции:

- трехступенчатая МТЗ (направленная токовая отсечка с независимой выдержкой времени и две ступени токовой защиты направленная и ненаправленная с шестью времятоковыми зависимыми характеристиками срабатывания) с комбинированным пуском по напряжению;
- автоматическое ускорение МТЗ;
- защита от обрыва фаз (ЗОФ);
- защита минимального напряжения (ЗМН);
- логическая защита шин (ЛЗШ);
- автоматика управления выключателем ввода 6-35 кВ с возможностью адаптации схемы управления под любой тип выключателя, в т.ч. с двумя электромагнитами отключения;
- контроль исправности цепей включения и отключения выключателя;
- УРОВ;
- однократное АПВ;
- контроль напряжения и/или синхронизма при командном включении или АПВ (только для комплекта БПВА.468263.103-02);
- устройство аварийного включения резерва (АВР);
- автоматическое восстановление нормального режима (АВНР) после АВР.» [17]

Комплект основных защит трансформатора для схемы ОРУ «мостик» выполнен на основе терминала «Сириус-ТЗ».

«Основные функции:

- дифференциальная токовая защита (ДЗТ) трехобмоточного трансформатора (дифференциальная токовая отсечка и дифференциальная токовая защита с торможением от сквозного тока и отстройкой от бросков тока намагничивания);
- газовая защита (прием сигналов от первой группы контактов газовых реле с действием на отключение через промежуточные реле);
- двухступенчатая максимальная токовая защита (МТЗ) со стороны ВН с возможностью комбинированного пуска по напряжению от сторон СН (НН1) и НН (НН2) и блокировкой по второй гармонике дифференциального тока от бросков тока намагничивания;
- МТЗ стороны СН (НН1) с возможностью комбинированного пуска по напряжению от стороны СН;
- МТЗ стороны НН (НН2) с возможностью комбинированного пуска по напряжению от стороны НН;
- защита от перегрузки по каждой стороне;
- прием технологических сигналов от трансформатора;
- управление схемой обдува трансформатора как по току нагрузки, так и по сигналам датчиков температуры;
- блокировка РПН по току нагрузки;
- устройство резервирования при отказе выключателя (УРОВ);
- контроль небаланса в плечах ДЗТ;
- контроль сопротивления изоляции в цепях газовых защит трансформатора и РПН.» [18]

5.1 Расчет общих уставок

Определим значения первичных токов сторон защищаемого силового трансформатора:

$$I_{\text{НОМ.ПЕРВ ВН}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ.СР}}} = \frac{4000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3} \approx 66,1 \text{ А}, \quad (77)$$

$$I_{\text{НОМ.ПЕРВ НН}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ.СР}}} = \frac{4000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} \approx 384,9 \text{ А} \quad (78)$$

где $U_{\text{НОМ.СР}}$ – номинальное напряжение стороны в среднем положении РПН, либо напряжение при среднем значении оптимального диапазона регулирования РПН

Коэффициенты трансформации трансформатора тока для ВН и НН стороны рассчитываются по указанным выражениям:

$$KI_{\text{ВН}} = \frac{100}{5} = 20, \quad (79)$$

$$KI_{\text{НН}} = \frac{400}{5} = 80 \quad (80)$$

где K_I – коэффициент трансформации ТТ соответствующей стороны;

Вторичные номинальные токи сторон, соответствующих номинальной мощности трансформатора, определяются по следующим выражениям:

$$I_{\text{НОМ.ВТОР ВН}} = \frac{I_{\text{НОМ.ПЕРВ ВН}} \cdot k_{\text{СХ}}}{KI_{\text{ВН}}} = \frac{66,1 \cdot 1}{20} \approx 3,305 \text{ А}, \quad (81)$$

$$I_{\text{НОМ.ВТОР НН}} = \frac{I_{\text{НОМ.ПЕРВ НН}} \cdot k_{\text{СХ}}}{KI_{\text{НН}}} = \frac{384,9 \cdot 1}{80} = 4,811 \text{ А}. \quad (82)$$

Принимаем значения уставок для $I_{\text{баз ВН}} = 3,3$ и $I_{\text{баз НН}} = 4,8$. Данные базисные токи попадают в допустимый диапазон выравнивания (5 – 10) А.

Полученные результаты занесем в таблицу 10.

Таблица 10 – Расчет уставок

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение для стороны	
		ВН	НН
Первичный ток на сторонах защищаемого трансформатора, соответствующий его номинальной мощности, А	$I_{НОМ.ПЕРВ\ ВН}$	66,1	384,9
Коэффициент трансформации трансформатора тока	KI	20 / 5	80 / 5
Схема соединения трансформаторов тока (электрических)	Y, D	Y	Y
Вторичный ток в плечах защиты, соответствующий номинальной мощности защищаемого трансформатора, А	$I_{НОМ.ВТОР\ ВН}$	3,3	4,8
Принятые значения уставок	«I _{баз} ВН» «I _{баз} НН» диапазон уставок: (20 – 25) А	3,3	4,8
Группа соединения измерительных ТТ	-	0	0
Группа соединения цифровых ТТ	-	11	0
Принятые значения уставок (выбираются в соответствии со значениями двух предыдущих строк таблицы)	«Группа ТТ ВН» «Группа ТТ НН» диапазон значений: (0 / 1 / 5 / 6 / 7 / 11)	11	0

5.2 Расчет уставок чувствительной дифференциальной защиты (ДЗТ-2)

Значение $I_{д1}/I_{баз}$ выбирается по условию отстройки от тока небаланса при протекании номинального (базисного) тока трансформатора:

$$\frac{I_{диф}}{I_{баз}} = K_{отс} \cdot I_{НБ\ РАСЧ} \quad (83)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, принимается равным 1,2;

$I_{НБРАСЧ}$ – относительный ток небаланса в нормальном режиме работы защищаемого трансформатора.

Расчетный ток небаланса, порождаемый сквозным током, состоит из трех составляющих:

$$I_{НБРАСЧ} = K_{ПЕР} \cdot K_{ОДН} \cdot \varepsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{ДОБАВ} = 2 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,04 + 0,04 = 0,28 \text{ о. е.} \quad (84)$$

где $K_{ПЕР}$ – коэффициент, учитывающий переходный режим;

$K_{ОДН}$ – коэффициент однотипности трансформаторов тока, принимается равным 1,0;

ε – относительное значение полной погрешности трансформаторов тока в установившемся режиме, принимается 0,05 для 5Р, 0,1 для 10Р;

$\Delta f_{ДОБАВ}$ – относительная погрешность, обусловленная неточностью задания номинальных токов сторон трансформатора – округлением при установке, а также некоторыми метрологическими погрешностями.

Согласно условию проверки принимаем $I_{диф}/I_{баз} = 0,4$.

Расчет коэффициента снижения тормозного тока выполняется по следующей формуле:

$$K_{СН.Т} = \frac{I_{ТОРМ}}{I_{СКВ}} = \sqrt{1 - I_{НБРАСЧ}} = \sqrt{1 - 0,28} = 0,85 \quad (85)$$

«Коэффициент торможения $K_{\text{ТОРМ}}$ должен обеспечить несрабатывание ступени при сквозных токах». [4] Чтобы реле не сработало, коэффициент торможения в процентах должен определяться по выражению:

$$K_{\text{ТОРМ}} \geq \frac{100I_{\text{ДИФ}}}{I_{\text{ТОРМ}}} = 100K_{\text{ОТС}} \cdot \frac{I_{\text{НБ РАСЧ}}}{\sqrt{1-I_{\text{НБ РАСЧ}}}} = 100 \cdot 1,2 \frac{0,28}{0,849} = 39,598 \quad (86)$$

Принимаем значение уставки коэффициента торможения 40%, поскольку диапазон уставки составляет от 10 до 100%.

Для второй точки излома ($I_{\text{T2}}/I_{\text{НОМ}}$) выбираем значение 2,0 поскольку это является рекомендуемым диапазоном уставки (1,0 – 2,0) $I_{\text{НОМ}}$. А также в обязательном порядке необходимо выбрать уставки по второй ($I_{\text{ДГ2}}/I_{\text{ДГ1}}$) и пятой ($I_{\text{ДГ5}}/I_{\text{ДГ1}}$) гармонике. Для второй числовое значение равняется 0,15 в диапазоне (0,06 – 0,2), а для пятой – 0,30 (0,1 – 0,5).

Расчет уставок занесем в таблицу 11.

Таблица 11 – Расчет уставок чувствительной ступени дифференциальной защиты

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение
Расчетный ток небаланса при протекании тока равного базисному (в о.е)	$I_{\text{НБ РАСЧ}}$	0,28
Выбор уставки срабатывания	$I_{\text{Д1}}/I_{\text{БАЗ}} \geq K_{\text{ОТС}} I_{\text{НБ РАСЧ}}$	0,336
Принятое значение базовой уставки срабатывания	« $I_{\text{Д1}}/I_{\text{БАЗ}}$ » диапазон уставки: (0,3 – 1,0) $I_{\text{БАЗ}}$	0,4
Коэффициент снижения тормозного тока	$K_{\text{СНТ}}$	0,85
Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение

Продолжение таблицы 11

Расчетный коэффициент торможения в процентах	$K_{ТОРМ}$	39,6
Принятое значение уставки коэффициента торможения	« $K_{ТОРМ}$ чувс. %» диапазон уставки (10 – 100) %	40
Принятое значение уставки второй точки излома	« $I_{т2}/I_{ном}$ » диапазон уставки (1,0 – 2,0) $I_{ном}$	2,0
Принятое значение уставки блокировки по второй гармонике	« $I_{д2}/I_{ном}$ » диапазон уставки (0,06 – 0,20)	0,15
Принятое значение уставки блокировки по пятой гармонике	« $I_{д5}/I_{ном}$ » диапазон уставки (0,10 – 0,50)	0,3

5.3 Расчет уставок дифференциальной токовой отсечки (ДЗТ-1)

Для расчета установок токовой отсечки ДЗТ – 1 необходимо произвести отстройку от срабатывания при КЗ на стороне НН силового двухобмоточного трансформатора. Соответственно, необходимо выполнить два условия: отстроить от тока при БНТ; отстроить от максимального первичного тока небаланса при переходном режиме расчетного внешнего КЗ.

Для обеспечения отстройки от БНТ необходимо выполнение условия:

$$\frac{I_{\text{диф}}}{I_{\text{БАЗ}}} \geq 6 \quad (87)$$

Приведем внешний ток КЗ к НН стороне, а также переведем его в именованные единицы:

$$I_{\text{КЗ ВНЕШ МАКС}} = I_{\text{КЗ ВНЕШ НН}} \cdot 10^3 \frac{10}{110} = 3,487 \cdot 10^3 \frac{10}{110} = 317,013 \text{ А} \quad (88)$$

Соотнесем рассчитанный ток КЗ к стороне к минимальному току трансформатора:

$$I_{\text{КЗ ВНЕШ МАКС}}^* = \frac{I_{\text{КЗ НН}}}{I_{\text{НОМ.ПЕРВ ВН}}} = \frac{317,013}{384,9} = 0,824 \text{ о. е.} \quad (89)$$

Рассчитаем ток небаланса при внешнем КЗ:

$$I_{\text{НБ}} = K_{\text{отс}}(K_{\text{ПЕР}} \cdot K_{\text{ОДН}} \cdot \varepsilon + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{ДОБАВ}}) \cdot I_{\text{КЗ ВНЕШ МАКС}} = \\ 1,5(3 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,04 + 0,04) \cdot 0,824 = 0,681 \text{ А} \quad (90)$$

Расчет уставок ДЗТ-1 запишем в таблицу 12.

Таблица 12 – Расчет уставок

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение
Максимальный ток внешнего КЗ, приведенный к стороне НН, А	$I_{\text{КЗ ВНЕШ МАКС}}$	317,013
Расчетный ток максимального внешнего КЗ, приведенный к номинальному току трансформатора (в о.е.)	$I_{\text{КЗ ВНЕШ МАКС}}^*$	0,824
Расчетный ток небаланса при внешнем КЗ, А	$I_{\text{НБ}}$	0,681
Выбор уставки срабатывания с учетом отстройки от БНТ и небаланса при внешнем КЗ	$I_{\text{диф}}/I_{\text{баз}} \geq 6$	6,0
Принятое значение уставки	« $I_{\text{диф}}/I_{\text{баз}}$ » диапазон уставки (4,00 – 30,0) $I_{\text{БАЗ}}$	6,0

Уставку срабатывания с учетом отстройки от БНТ и небаланса при внешнем КЗ принимаем равную 6, так как условие $I_{\text{диф}}/I_{\text{БАЗ}} \geq 6$ выполняется.

5.4 Сигнализация небаланса в плечах дифференциальной защиты (ДЗТ-3)

Уставка по току выбирается меньше, чем минимальная уставка чувствительной ступени ДЗТ-2 ($I_{д1}/I_{баз}$), а уставка по времени порядка нескольких секунд, что позволяет выявлять неисправности в токовых цепях дифференциальной защиты. Рекомендуемые значения уставок: $I_{д}/I_{баз} = 0,1$; $T, с = 10$

На рисунке 4 показана тормозная характеристика дифференциальной защиты трансформатора.

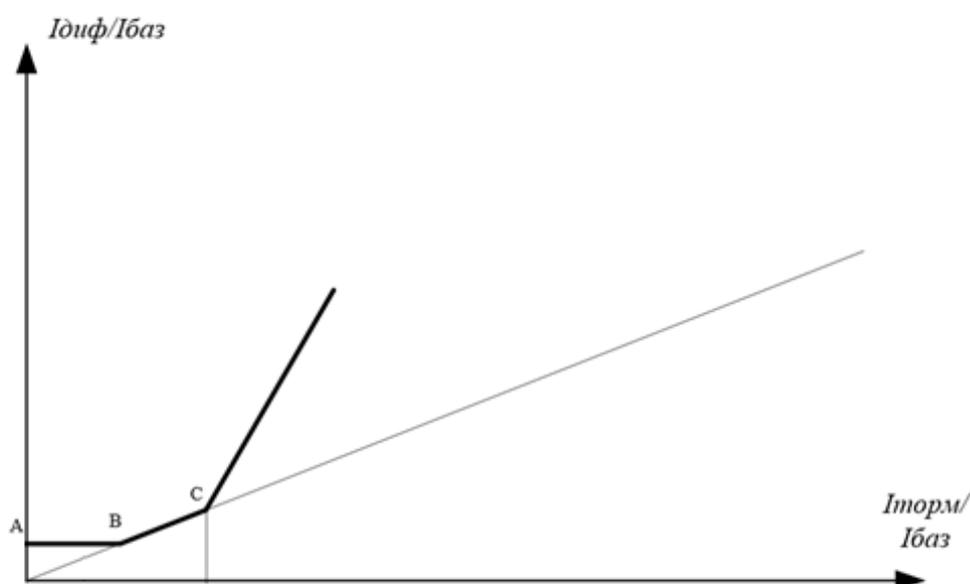


Рисунок 4 – Тормозная характеристика ступени ДЗТ – 2

Вывод по разделу. Была рассмотрена система релейной защиты силового трансформатора типа ТДН-4000/35/6, реализованная с использованием шкафа цифровой защиты ШЭРА-ТТ-40016 и многофункционального микропроцессорного терминала Сириус-2-Т. Рассматриваемая схема защиты ориентирована на обеспечение надёжной

работы трансформатора в условиях различных аварийных воздействий, включая внутренние повреждения, токи короткого замыкания и броски намагничивания.

В рамках технического обоснования были выполнены детализированные расчёты уставок для следующих функций:

ДЗТ-1 - дифференциальная токовая отсечка (жёсткая сработка на внутренние КЗ без выдержки времени);

ДЗТ-2 - чувствительная дифференциальная защита с функцией адаптации под пусковые токи и временные несимметрии;

ДЗТ-3 - сигнализация небаланса, служащая для раннего обнаружения нестабильных режимов, не приводящих к немедленному отключению.

Расчёты выполнены на основе типовой методики, принятой в отраслевых стандартах, с учётом параметров трансформатора, данных трансформаторов тока, схемы соединения (Y/Δ), а также токов короткого замыкания, рассчитанных ранее.

Выбранная архитектура защиты обеспечивает надежное обнаружение неисправностей с минимальной задержкой времени, соответствующей требованиям ГОСТ и техническим условиям эксплуатации подстанции. Кроме того, применение микропроцессорного терминала Сириус-2-Т позволяет осуществлять постоянный мониторинг параметров, ведение осциллограмм, анализ динамики аварийных процессов и дистанционную настройку логики работы защиты через АСУ ТП.

Результаты расчётов и проектные решения подтверждают, что реализация релейной защиты на базе шкафа ШЭРА-ТТ-40016 и устройства Сириус-2-Т обеспечивает комплексную, надёжную и высокотехнологичную защиту трансформатора ТДН-4000/35/6 от всех типовых аварийных воздействий. Это, в свою очередь, значительно повышает общую устойчивость системы электроснабжения и снижает риск отказов оборудования.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была решена задача повышения надёжности и эффективности функционирования системы электроснабжения предприятия за счёт модернизации релейной защиты подстанции 35/6 кВ «Восточная», обеспечивающей питание завода «Нефтемаш». Основное внимание было уделено замене устаревшего электромеханического оборудования, находящегося в эксплуатации на протяжении десятилетий, на современные микропроцессорные устройства, соответствующие требованиям цифровой энергетики.

На основании технических расчётов, сравнительного анализа и требований нормативной документации обоснован выбор современных решений - шкафов ШЭРА-ТТ-40016 и микропроцессорных терминалов Сириус-2-Т, обладающих высоким уровнем функциональной интеграции. Эти устройства обеспечивают реализацию всех необходимых алгоритмов релейной защиты, включая дифференциальную защиту трансформатора, токовую отсечку, контроль небаланса, самодиагностику и передачу данных в системы верхнего уровня, что соответствует требованиям к цифровым подстанциям нового поколения.

В ходе расчётной части были определены электрические нагрузки предприятия, произведён расчёт токов короткого замыкания и уставок релейной защиты на основе полученных данных и требований нормативной документации. Полученные результаты подтверждают, что выбранные устройства способны обеспечить надёжную защиту оборудования и персонала при аварийных ситуациях.

Реализация предложенных проектных решений обеспечит:

- повышение общей энергетической безопасности предприятия;
- улучшение показателей энергоэффективности;
- снижение эксплуатационных затрат за счёт цифровой диагностики и автоматизации;

- повышение отказоустойчивости системы к внешним возмущениям и аварийным процессам;
- возможность масштабирования решений и применения аналогичной архитектуры на других объектах с минимальной адаптацией.

Представленный проект отвечает современным требованиям промышленной энергетики, способствует цифровой трансформации энергоинфраструктуры предприятия и может служить типовым решением при модернизации аналогичных подстанций, в том числе в составе региональных распределительных сетей или объектов высокой критичности.

Внедрение разработанных решений будет способствовать как повышению надёжности энергоснабжения, так и устойчивому развитию самого завода и производственной площадки в целом.

Список используемой литературы и используемых источников

1. АBB. Автоматический Ввод Резерва. Обзор решений [Текст] / АBB Electrification. [Электронный ресурс]. URL: https://library.e.abb.com/public/eea63222f9cf4d3385bf029f32a29fd2/QT13_9CN D00000001818.pdf (дата обращения: 14.02.2025).
2. АО «Релейная защита и автоматика». Устройства защиты трансформаторов 6-220 кВ: Сириус-Т. URL: <https://www.rza.ru/catalog/ustroystva-zashchity-transformatorov-6-220-kv/sirius-t.php> (дата обращения: 18.03.2025).
3. Высоких Д. Д. Инновации в области релейной защиты и автоматике // Universum: техническая наука. 2024. № 6 (123). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsii-v-oblasti-releynoy-zashchity-i-avtomatiki> (дата обращения: 15.02.2025).
4. ЗАО «РАДИУС Автоматика». Рекомендации по выбору уставок устройства защиты двухобмоточного трансформатора «Сириус-Т» (версии 3.00 и более) [Электронный ресурс]. URL: <https://s.siteapi.org/14956361ff1a9ce.ru/docs/b484ba057e0f7cee3d0d78bae991fd8f45a989b9.pdf> (дата обращения: 19.03.2025).
5. Ефремов В.А., Ефремов А.В., Петрушков М.Ю., Смирнов С.Ю. Концепция построения релейной защиты на объектах с возобновляемыми источниками энергии // Релейная защита и автоматизация. 2023. №4 (57). URL: <https://releematika.ru/articles/kontseptsiya-postroeniya-releynoy-zashchity-na-obektakh-s-vozobnovlyаемymi-istochnikami-energii/> (дата обращения: 08.02.2025).
6. КРУН (комплектное распределительное устройство наружной установки) [Электронный ресурс] // Завод высоковольтного оборудования ЗВО. URL: <http://www.zvo.ru/krun.html> (дата обращения: 10.02.2025)
7. ООО «Уралмаш НГО Холдинг». Официальный сайт. URL: <https://www.uralmash-ngo.com/> (дата обращения: 09.03.2025).

8. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. М.: ИНФРА-М, 2018. 261 с. URL: new.znanium.com/catalog/product/944357 (дата обращения: 17.03.2025).

9. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) [Электронный ресурс] Электротехпром. URL: <https://etp-perm.ru/el/pue> (дата обращения: 25.03.2025)

10. Разъединители. Отделители. Короткозамыкатели. Выключатели нагрузки. Плавкие предохранители [Электронный ресурс] // Gigavat.com. URL: https://www.gigavat.com/razediniteli_otdeliteli_predohraniteli.php (дата обращения: 05.03.2025)

11. Релейная защита и автоматика РЗА [Электронный ресурс] // СВЭЛ Группа высоковольтного оборудования. URL: <https://svel.ru/articles/releynaya-zashchita-i-avtomatika-rza.html> (дата обращения: 07.03.2025)

12. Сазыкин В. Г., Кудряков А. Г. Расчет электрических нагрузок в системах электроснабжения АПК: методические указания [Электронный ресурс] / Краснодар: КубГАУ, 2017. 54 с. URL: <https://kubsau.ru/upload/iblock/9c8/9c84fdd278d8a5fe88fff572e33f466a.pdf> (дата обращения: 13.04.2025).

13. Сычев А. В., Евминов Л. И., Курганов В. В., Гуминский А. Н. К вопросу о проектировании и эксплуатации микропроцессорных устройств релейной защиты // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2009. №4 (39). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-proektirovanii-i-ekspluatatsii-mikroprotsessornyh-ustroystv-releynoy-zaschity> (дата обращения: 15.02.2025).

14. Устройство регулирования напряжения трансформатора «Сириус-2-РН» [Электронный ресурс] // АО «РАДИУС Автоматика». URL: <https://www.rza.ru/catalog/ustroystva-zashchity-transformatorov-6-220-kv/sirius-rn.php> (дата обращения: 09.02.2025)

15. Чебоксарский электроаппаратный завод (ЧЭАЗ). Официальный сайт. URL: <https://www.cheaz.ru/> (дата обращения: 22.04.2025)

16. Чиндин В.В., Кретов Д.А., Использование цифровых устройств релейной защиты для интеграции с системами мониторинга аварийных

ситуаций в электроэнергетических системах. // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. 2019

17. Шкаф защит двухобмоточного трансформатора и АУВ сторон ВН/НН «ШЭРА-Т-30010» [Электронный ресурс] // АО «РАДИУС Автоматика» URL: <https://www.rza.ru/catalog/rza-silovykh-transformatorov-i-avtotransformatorov/shera-t-30010.php> (дата обращения: 02.04.2025)

18. Шкаф основных защит трёхобмоточного трансформатора и автоматики ввода 6–35 кВ «ШЭРА-ДЗТТ-ВВ-3002» [Электронный ресурс] // АО «РАДИУС Автоматика». URL: <https://www.rza.ru/catalog/rza-silovykh-transformatorov-i-avtotransformatorov/shera-dztt-vv-3002.php> (дата обращения: 27.04.2025)

19. Шкаф резервных защит и АУВ высоковольтной стороны трансформатора «ШЭРА-РЗТ-1004» [Электронный ресурс] // АО «РАДИУС Автоматика». URL: <https://www.rza.ru/catalog/rza-silovykh-transformatorov-i-avtotransformatorov/shera-rzt-1004.php> (дата обращения: 05.03.2025)

20. Шкаф релейной защиты и автоматики «ШЭРА-ТТ-40016» [Электронный ресурс] // НПФ «Механотроника». URL: <https://mekhanotronika.ru/products/shera-tt-40016> (дата обращения: 05.04.2025)

21. Abdelmoumene, A., & Bentarzi, H. A review on protective relays' developments and trends [Электронный ресурс] / J. Energy in Southern Africa. 2014. Vol. 25, № 2. С. 91–95. ISSN 2413-3051. URL: https://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S1021-447X2014000200010&script=sci_arttext (дата обращения: 24.01.2025)

22. ABI Research. Schneider Electric, Siemens, ABB, and Bosch Ranked Leaders in ABI Research's Global Industrial & Manufacturing Sustainability Assessment [Электронный ресурс] // ABI Research Press Release. 18 Apr 2023. URL: <https://www.abiresearch.com/press/schneider-electric-siemens-abb-and->

bosch-ranked-leaders-in-abi-researchs-global-industrial-manufacturing-sustainability-assessment (дата обращения: 24.01.2025).

23. Home Siemens USA [Электронный ресурс]. URL: <https://www.siemens.com/us/en/home.html>.

24. Lundqvist B. 100 years of relay protection, the Swedish ABB relay history // ABB Automation Products, Substation Automation Division (Sweden). 2001.

25. Srimayi Y. Retrofit of an electromechanical relay with a digital relay: a review [Электронный ресурс]. April 2020 / L S Electricals. URL: https://www.researchgate.net/publication/340899796_RETROFIT_OF_AN_ELECTROMECHANICAL_RELAY_WITH_A_DIGITAL_RELAY_A_REVIEW (дата обращения: 27.04.2025).

26. Yao Z., Li D., Li Z., Zhou P., Li L. Relay protection mirror operation technology based on digital twin [Электронный ресурс] // Protection and Control of Modern Power Systems. 2023. Т. 8, № 1. DOI: 10.1186/s41601-023-00328-4. URL: https://www.researchgate.net/publication/374654417_Relay_protection_mirror_operation_technology_based_on_digital_twin (дата обращения: 28.03.2025).