

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)

13.04.02. Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Энергосбережение и энергоэффективность

(направленность (профиль))

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Разработка и анализ мероприятий по энергосбережению в системе  
электроснабжения ООО «ЦОП «Сибирь», г. Нижневартовск

Обучающийся

А.О. Карпенко

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

к.т.н., О.В. Самолина

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

Тольятти 2024

## Содержание

Введение.....	3
1 Анализ теоретических вопросов обеспечения энергосбережения.....	6
1.1 Анализ источников информации.....	6
1.2 Анализ способов обеспечения энергосбережения.....	12
1.2.1 Компенсация реактивной мощности.....	12
1.2.2 Энергосберегающее освещение.....	14
1.2.3 Энергосберегающее силовое электрооборудование .....	15
1.2.4 Программируемые логические контроллеры и реле.....	20
1.2.5 Технический учет электроэнергии .....	25
1.3 Анализ системы электроснабжения предприятия и возможных мероприятий по энергосбережению.....	29
2 Разработка и анализ энергосберегающих мероприятий .....	37
2.1 Энергоэффективное интеллектуальное светодиодное освещение .....	37
2.2 Адаптивная компенсация реактивной мощности.....	50
2.3 Применение энергоэффективных силовых трансформаторов .....	53
2.4 Управление потребителями с помощью программируемых логических контроллеров и реле.....	55
2.5 Технический учет электроэнергии .....	58
2.6 Применение энергоэффективных электродвигателей.....	60
2.7 Частотное регулирование электроприводов .....	63
2.8 Моделирование работы частотно-регулируемого электропривода, анализ его энергетических характеристик .....	66
3 Анализ экономической эффективности предлагаемых мероприятий по энергосбережению .....	79
3.1 Расчет сметной стоимости проекта .....	79
3.2 Ожидаемые экономический эффект и срок окупаемости.....	81
Заключение .....	84
Список используемых источников.....	87

## Введение

Обеспечение энергосбережения является важной задачей в современном мире. Энергосбережение помогает снизить зависимость от ископаемых видов топлива, уменьшить выбросы парниковых газов и сохранить природные ресурсы для будущих поколений. Существует множество методов и технологий энергосбережения, таких как использование энергоэффективных приборов, улучшение теплоизоляции зданий, применение возобновляемых источников энергии и т.д. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, поэтому выбор оптимального подхода зависит от конкретных условий и целей. Для расчета экономии энергии используются различные методы, включая анализ затрат и выгод, оценку жизненного цикла и другие. Однако, важно учитывать, что эффективность энергосберегающих мер может варьироваться в зависимости от региона, климатических условий, уровня развития инфраструктуры и других факторов. Законы и нормативные акты в области энергосбережения могут различаться в разных странах, но обычно они направлены на стимулирование использования энергоэффективных технологий, ограничение выбросов парниковых газов и поощрение инвестиций в возобновляемые источники энергии.

Обеспечение энергосбережения и наибольшей энергоэффективности в системах электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий также является критически значимой задачей в развитых странах мира и также утверждено в рамках Стратегии энергетического развития РФ до 2030 года. «По мере проведения плановых реконструкций и модернизаций СЭС промышленных предприятий, а также при разработке СЭС планируемых к постройке предприятий надлежит массово внедрять передовые технические разработки и специально спроектированное оборудование для достижения наибольшего энергосбережения. Это позволяет снизить нагрузку на энергосистему, уменьшить вредные выбросы в окружающую среду, а также

снизить себестоимость продукции и повысить конкурентоспособность предприятий» [1].

Экономические стимулы для энергосбережения могут включать субсидии на покупку энергоэффективных товаров и услуг, налоговые льготы, гранты на исследования и разработки в области энергоэффективности и т. д. Повышение осведомленности о важности энергосбережения может осуществляться через образовательные программы, информационные кампании, а также через примеры успешных проектов в этой области. Мониторинг и контроль за соблюдением требований в области энергосбережения осуществляется государственными органами, а также независимыми организациями и экспертами. Они проводят проверки, анализируют данные и предоставляют рекомендации по улучшению энергоэффективности. Роль государства в обеспечении энергосбережения заключается в разработке и реализации политики и программ, направленных на повышение энергоэффективности, а также в стимулировании инвестиций в эту область. В настоящее время в РФ и других развитых странах установлено достаточно много нормативно-правовых документов, регламентирующих надлежащее обеспечение энергосбережения и соответствующие технические решения. Например, регламентировано обязательное обеспечение автоматизированного коммерческого и технического учета электроэнергии с помощью применения систем АСТУЭ и АСКУЭ.

Международные организации, такие как ООН, Всемирный банк, также играют важную роль в продвижении идей энергосбережения и устойчивом развитии. Выбор между инвестициями в энергосбережение и другими видами деятельности зависит от многих факторов, включая экономическую ситуацию, технологические возможности и экологические требования. Важно учитывать долгосрочные последствия принимаемых решений и стремиться к балансу между различными аспектами устойчивого развития. Обеспечение долгосрочного энергосбережения требует учета возможных изменений в экономической, технологической и экологической сферах. Это включает в

себя адаптацию существующих технологий и разработку новых, более эффективных решений, а также изменение поведения потребителей в сторону более осознанного отношения к использованию энергии.

Актуальность исследования: действующая система электроснабжения (СЭС) объектов производственной базы ООО «ЦОП «Сибирь», г. Нижневартовск технологически устарела и не обеспечивает необходимую энергоэффективность, экономические потери предприятия и выбросы в окружающую среду существенно повышены, в связи с чем в ближайшее время планируется реконструкция СЭС административно-бытового корпуса и ремонтного цеха, с установкой современного энергосберегающего оборудования. Обеспечение энергосбережения в системе электроснабжения позволит сократить экономические издержки на оплату электроэнергии и увеличить доходность предприятия.

Научная новизна работы состоит в построении модели электропривода с энергоэффективным электродвигателем и частотным управлением.

Объект исследования: система электроснабжения производственной базы ООО «ЦОП «Сибирь», г. Нижневартовск.

Предмет исследования: энергосбережение в СЭС предприятия.

Цель работы – повышение прибыльности предприятия.

Задачи работы:

1. Анализ теоретических вопросов обеспечения энергосбережения;
2. Разработка и анализ энергосберегающих мероприятий;
3. Анализ экономической эффективности предлагаемых мероприятий по энергосбережению.

Практическая значимость работы заключается в снижении экономических и трудовых эксплуатационных затрат предприятия.

# **1 Анализ теоретических вопросов обеспечения энергосбережения**

## **1.1 Анализ источников информации**

Теоретические вопросы обеспечения энергосбережения рассмотрены и изучены многими современными исследователями, что отражено в их трудах. Для успешной разработки и анализа мероприятий по энергосбережению далее проводится анализ источников информации .

Современные концепции энергосбережения изложены в учебнике Абдразакова Ф.К. [1]. В учебнике показано, что они направлены на повышение энергоэффективности во всех сферах жизни. Это включает использование более эффективных технологий, изменение образа жизни и привычек, а также развитие возобновляемых источников энергии. Одним из ключевых направлений является повышение энергоэффективности зданий. Это может включать улучшение теплоизоляции, использование энергоэффективных материалов и оборудования, а также оптимизацию систем отопления и охлаждения. Также важным аспектом является развитие возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая энергия. Эти источники энергии являются экологически чистыми и не производят вредных выбросов в атмосферу. Еще одним направлением является изменение поведения потребителей. Это включает в себя обучение потребителей эффективному использованию энергии, а также разработку стимулов для использования более эффективных приборов и систем освещения. В целом, современные концепции энергосбережения направлены на создание более устойчивого и эффективного использования энергии, что поможет снизить зависимость от ископаемых источников энергии и уменьшить воздействие на окружающую среду.

Устойчивое развитие, энергоэффективность и зеленая экономика рассмотрены Ануфриевым В.П. [2]. В учебнике показано, что устойчивое развитие – это процесс, при котором удовлетворение потребностей нынешнего

поколения происходит без ущерба для возможностей будущих поколений удовлетворять свои потребности. Энергоэффективность является ключевым элементом устойчивого развития, так как позволяет снизить потребление энергии и уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу. Зеленая экономика – это экономика, которая ориентирована на сохранение окружающей среды и использование экологически чистых технологий. Она основана на принципах устойчивого развития и энергоэффективности, и способствует созданию новых рабочих мест и развитию инновационных технологий.

Энергосберегающие технологии в энергетике рассмотрены Аполлонским С.М. [3,4]. В учебниках показано, что «энергосберегающие технологии обеспечиваются использованием возобновляемых источников энергии (солнечные панели, ветрогенераторы, гидроэлектростанции и т.д.); применением тепловых насосов для отопления и охлаждения помещений, а также для нагрева воды; разработкой и внедрением интеллектуальных систем управления для оптимизации использования энергии и снижения ее потерь; созданием более эффективных двигателей и генераторов: использованием новых технологий позволяет уменьшить потери энергии при выработке электричества; развитием биоэнергетики, использованием биомассы (отходов, биогаза) для получения энергии» [3,4].

Возобновляемая энергетика и энергосбережение изучены Велькиным В.И. [5]. В учебнике рассмотрены «ветроэнергетика (использование энергии ветра для производства электроэнергии); солнечная энергетика (использование солнечной радиации для получения тепловой и электрической энергии); гидроэнергетика (использование кинетической энергии текущей воды для производства электроэнергии); геотермальная энергетика (использование тепла земных недр для производства электроэнергии и отопления); биотопливная энергетика (использование биотоплива – биогаза или биодизеля и т.д. для производства энергии)» [5].

Управление энергосбережением на промышленном предприятии изучено Головым Р.С. [6]. В учебнике показано, что оно включает разработку и реализацию программы энергосбережения, внедрение энергосберегающих технологий и оборудования, обучение персонала методам энергосбережения, контроль за соблюдением требований по энергосбережению, мотивацию сотрудников к экономии энергии. Рассмотрены современные принципы и методики реализации данных мероприятий.

Вопросы энергосбережения в светотехнике рассмотрены Горбуновым А.А. [7]. В учебном пособии показано, что «энергосбережение в светотехнике является важным аспектом в области энергетики и направлено на уменьшение потребления электроэнергии за счет использования эффективных источников света, оптимизации систем освещения и применения инновационных технологий» [7]. Основные направления энергосбережения в светотехнике включают использование энергоэффективных источников света: светодиодных (LED), компактных люминесцентных ламп (CFL) и других видов света с низким потреблением электроэнергии и долгим сроком службы; оптимизацию систем освещения; внедрение интеллектуальных систем управления освещением; применение инновационных технологий; энергоаудит и сертификацию светотехнических объектов.

Энергоменеджмент и энергосбережение в зданиях рассмотрены Котомкиным В.Н. [10]. В учебнике показано, что они являются важными аспектами в области повышения энергоэффективности и снижения выбросов парниковых газов. «Основные направления в этой области включают повышение энергетической эффективности зданий; внедрение систем автоматизации и управления энергопотреблением; применение возобновляемых источников энергии; энергоаудит зданий и сертификация на энергоэффективность; обучение и повышение осведомленности в области энергосбережения» [10]. Рекомендовано проведение образовательных программ и информационных кампаний, направленных на формирование культуры энергосбережения среди населения и профессионалов.



Энергосбережение в электротехнических комплексах рассмотрено Павловой З.Х. [14]. В учебном пособии показано, что оно является важной задачей для снижения энергопотребления и уменьшения воздействия на окружающую среду. «Основные направления энергосбережения в электротехнике включают использование энергоэффективных технологий производства и передачи электроэнергии, таких как ветрогенераторы, солнечные панели, биогазовые установки и другие возобновляемые источники энергии; оптимизацию режимов работы электротехнического оборудования, включая системы управления электропотреблением, использование частотно-регулируемого привода» [14]. Рекомендовано внедрение систем аккумулирования энергии; повышение энергоэффективности электротехнического оборудования и систем; внедрение автоматизированных систем управления и мониторинга энергосистем; проведение энергетического аудита и сертификации электротехнических комплексов.

Энергоснабжение и энергоэффективность, актуальные проблемы правового регулирования рассмотрены Ручкиной Г.Ф. [15]. В учебнике отмечено, что энергоэффективность является одним из ключевых направлений развития экономики и экологической безопасности. В связи с этим возникает ряд актуальных проблем правового регулирования, направленных на стимулирование и контроль в области энергоэффективности. В настоящее время законодательство в области энергоэффективности зачастую недостаточно четко определяет основные понятия, принципы и требования. Это создает определенные сложности при «реализации государственной политики и приводит к возникновению разночтений и противоречий. Существующие механизмы стимулирования энергоэффективности, такие как налоговые льготы, субсидирование и льготное кредитование, не всегда эффективны и доступны для всех категорий участников рынка» [15]. Требуется разработка новых стимулов и поддержка инноваций в данной сфере. Отсутствие четких и прозрачных механизмов контроля и мониторинга энергоэффективности может привести к нарушениям со стороны предприятий

и организаций. Необходимы эффективные инструменты контроля и оценки, позволяющие контролировать и оценивать результаты внедрения энергоэффективных технологий и решений. Недостаток квалифицированных специалистов и экспертов в области энергоэффективности затрудняет развитие данной сферы и внедрение новых технологий. Необходимы программы подготовки и повышения квалификации, а также создание условий для привлечения специалистов из других отраслей.

Технология энергосбережения рассмотрена Сибикиным Ю.Д. [16]. В учебнике рекомендованы использование энергоэффективных ламп, установка программируемых термостатов, энергосберегающие бытовые приборы, теплоизоляция дома, солнечные панели, утилизация тепла, повышение осведомленности об энергосбережении, использование возобновляемых источников энергии (ветровые, солнечные и геотермальные энергии являются экологически чистыми и могут заменить ископаемые виды топлива), эффективное использование воды.

Повышение энергоэффективности промышленных предприятий на основе формирования системы энергоменеджмента рассматривает Федоськина Л.А. [19]. В учебнике отмечено, что использование современных технологий и оборудования позволяет повысить энергоэффективность производства и снизить выбросы парниковых газов. Улучшение использования энергии может быть достигнуто за счет более эффективного использования оборудования, улучшения управления энергопотреблением и внедрения энергосберегающих технологий. Обучение персонала в области энергосбережения и энергоэффективности помогает улучшить понимание необходимости энергосбережения и повышает мотивацию к действиям. Создание системы поощрений за энергосбережение может стимулировать сотрудников к более активному участию в мероприятиях по энергосбережению. Внедрение системы энергетического менеджмента на предприятии помогает организовать процесс энергосбережения, контролировать его и отслеживать результаты. Разработка и реализация

программ энергосбережения позволяет определить приоритетные направления для улучшения энергоэффективности и определить необходимые инвестиции. Регулярный мониторинг и контроль энергопотребления позволяет выявить возможные потери энергии и принять меры по их устранению. Сотрудничество с поставщиками и потребителями в области энергосбережения может способствовать обмену опытом и инновациями, а также совместному решению проблем.

Энергосбережение и энергоаудит рассматривает Филин Ю.И. [20]. В учебно-методическое пособие отмечено, что энергосбережение – это комплекс мер, «направленных на снижение потребления энергии без ущерба для качества продукции и услуг. Оно включает в себя использование энергоэффективных технологий, оптимизацию режимов работы оборудования, повышение эффективности использования энергии и другие меры» [20]. Энергоаудит – это процедура, которая включает в себя анализ потребления энергии, определение потенциала энергосбережения и разработку рекомендаций по его реализации. «Энергоаудит может быть проведен как для отдельных зданий и сооружений, так и для целых предприятий. Для проведения энергоаудита используются различные методы, такие как измерение потребления энергии, анализ работы оборудования, тестирование систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха и другие» [20].

Согласно проведенному анализу источников информации и приведенных в них теоретических вопросов обеспечения энергосбережения, можно сделать вывод, что энергосбережение является важным аспектом современной экономики и экологии. Оно включает в себя множество различных мер, таких как использование энергоэффективных технологий, оптимизация режимов работы оборудования, повышение эффективности использования энергии и другие. Энергоаудит является процедурой, которая включает анализ потребления энергии, определение потенциала энергосбережения и разработку рекомендаций по его реализации. Результаты

энергоаудита могут быть использованы для разработки программ энергосбережения, определения необходимых инвестиций и оценки эффективности использования энергии. Современные авторы-исследователи отмечают значительное число способов энергосбережения на промышленных предприятиях, позволяющих значительно снизить потери электроэнергии и мощности.

Согласно результатам анализа источников информации и приведенных в них теоретических вопросов обеспечения энергосбережения, далее приводятся и анализируются изложенные в них современные способы обеспечения энергосбережения в системах электроснабжения и электрических сетях промышленных предприятий.

## **1.2 Анализ способов обеспечения энергосбережения**

### **1.2.1 Компенсация реактивной мощности**

Компенсация реактивной мощности (КРМ) – это процесс, при котором избыточная реактивная мощность (РМ) в электрической системе компенсируется с помощью специальных устройств, таких как конденсаторы или синхронные компенсаторы. Это «позволяет уменьшить потери электроэнергии, повысить эффективность работы оборудования и улучшить качество электроэнергии. Автоматическая компенсация реактивной мощности – это система, которая автоматически регулирует уровень компенсации реактивной мощности в зависимости от нагрузки на систему. Это позволяет поддерживать оптимальный уровень компенсации реактивной мощности, снижая затраты на электроэнергию и улучшая качество электроэнергии» [27,30].

«Смысл КРМ приведен на рисунке 1.

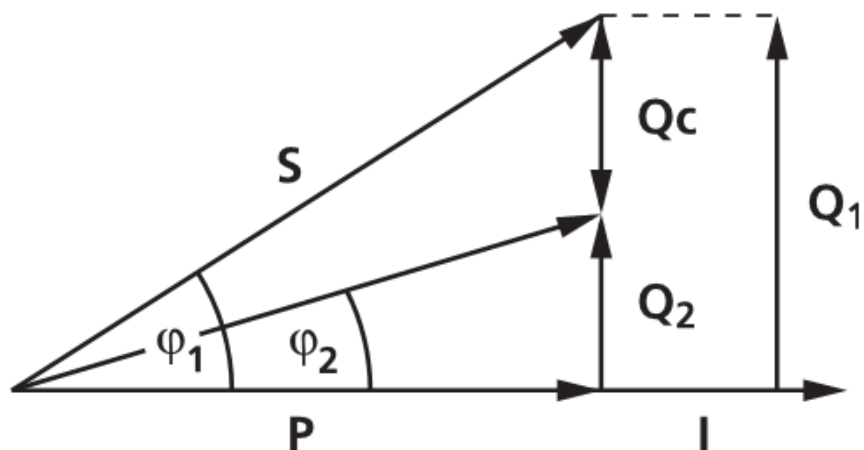


Рисунок 1 – Смысл КРМ

Реактивная мощность  $Q_1$  компенсируется на величину  $Q_c$  до значения  $Q_2$ , что вызывает снижение полной потребляемой мощности  $S$  на существенную величину (рисунок 1).

Выдаваемая в сеть компенсирующими устройствами реактивная мощность обеспечивает снижение или компенсацию общей потребляемой реактивной мощности, что снижает рабочие токи электрооборудования, а также потери мощности, напряжения и электроэнергии в линиях электропередачи и элементах электрических сетей, таких как силовые трансформаторы.

Внедрение компенсации реактивной мощности на предприятии может принести ряд экономических выгод, таких как снижение потерь электроэнергии, увеличение производительности оборудования, уменьшение затрат на электроэнергию и улучшение качества электроэнергии, снижение себестоимости продукции предприятия» [11]. Кроме того, КРМ может помочь снизить выбросы углекислого газа и других вредных веществ, что также является экономическим преимуществом.

## 1.2.2 Энергосберегающее освещение

При выборе источника света следует учитывать несколько факторов. К ним относятся светоотдача, цветовая температура, срок службы, энергоэффективность и воздействие на окружающую среду. Выбор источника света также должен руководствоваться конкретными потребностями применения. Важным фактором, который следует учитывать, является светоотдача, измеряемая в люменах. Сегодня на рынке доступно несколько типов современных источников света. К ним относятся светодиодные, галогенные, компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) и усовершенствованные версии ламп накаливания. Каждый из этих источников света имеет свой уникальный набор характеристик, что делает их пригодными для различных применений.

Сравнительные характеристики современных ламп разных типов приведены на рисунке 2.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАМП	накаливания	люминисцентная	светодиодная
стоимость	низкая	средняя	высокая
расходы на эксплуатацию	высокие	средние	низкие
срок службы, час	до 1 000	до 10 000	около 50 000
пульсации - мерцания	15 - 25%	5 - 15%	0 - 5%
эффективность (КПД)	низкая	средняя	высокая
содержание ртути	нет	высокое	нет

Рисунок 2 – Сравнительные характеристики современных ламп

Энергосберегающее освещение – это освещение, которое использует меньше энергии, чем традиционное освещение. Оно может быть реализовано

с помощью различных технологий, таких как светодиодные лампы, компактные люминесцентные лампы и другие. Энергосберегающее освещение не только экономит энергию, но и снижает выбросы углекислого газа, что является важным аспектом для защиты окружающей среды [28].

Светодиоды на сегодняшний день являются наиболее популярными и эффективными источниками света. Они известны своей высокой энергоэффективностью, длительным сроком службы и превосходной цветопередачей. Они идеально подходят как для внутреннего, так и для наружного освещения и доступны в различных формах и размерах. Галогенные лампы – еще один тип современного источника света. Они похожи на лампы накаливания, но более эффективны и имеют более длительный срок службы. Они излучают яркий белый свет, что делает их идеальными для точечного или рабочего освещения. КЛЛ более энергоэффективны, чем галогенные лампы и лампы накаливания, и имеют больший срок службы [8]. Однако они содержат небольшое количество ртути, что делает их менее экологически чистыми. «Светодиодные лампы потребляют минимальное количество электроэнергии и требуют редкой замены, а их утилизация не представляет проблем (как например, утилизация люминесцентных или дуговоротутных ламп). В настоящее время можно отметить массовое внедрение систем освещения на основе светодиодных источников света под интеллектуальным автоматизированным управлением на основе цифровых программируемых реле» [28].

### **1.2.3 Энергосберегающее силовое электрооборудование**

«Энергосберегающее силовое электрооборудование – это оборудование, которое потребляет меньше энергии при работе. Оно может быть изготовлено из более энергоэффективных материалов или иметь более эффективную конструкцию. Например, использование IGBT-транзисторов в инверторах позволяет снизить потери энергии и повысить эффективность системы.

Частотное регулирование электропривода – это метод управления электроприводом, при котором частота вращения двигателя регулируется изменением частоты питающего напряжения. Это позволяет достичь более точного контроля скорости вращения, уменьшить пусковые токи и снизить потери энергии. Частотный преобразователь – это устройство, которое изменяет частоту переменного тока для управления скоростью вращения электродвигателя» [28,29]. Он состоит из трех основных частей: выпрямителя, инвертора и электронного блока управления.

Принцип работы частотного преобразователя показан на рисунке 3.



Рисунок 3 – Принцип работы частотного преобразователя

Выпрямитель преобразует входной переменный ток в постоянный ток. Инвертор преобразует постоянный ток обратно в переменный, но уже с другой частотой. Электронный блок управления контролирует частоту выходного сигнала в зависимости от параметров электродвигателя и нагрузки на него. Таким образом, частотный преобразователь позволяет изменять частоту



вращения электродвигателя, что в свою очередь позволяет регулировать скорость работы оборудования и экономить электроэнергию.

«Далее рассмотрим устранение некоторых недостатков асинхронного электропривода (напрямую влияющих на его энергоэффективность) при непосредственном подключении (без изменения параметров питающего напряжения) с помощью ТрЧП.

#### 1) Малый пусковой момент и большой пусковой ток

Запатентованное решение Оптимальный поток было разработано в целях создания асинхронного электропривода, способного иметь наибольший пусковой момент при наименьшем токе. Данное решение заключается в максимальной оптимизации магнитного потока путем постоянного контроля параметров работы электропривода и корректировки параметров питания, что приводит к минимизации потерь на тепло и гистерезис. Оптимизация магнитного потока для электродвигателей с классами изоляции *B* и *F* показана на рисунке 4.

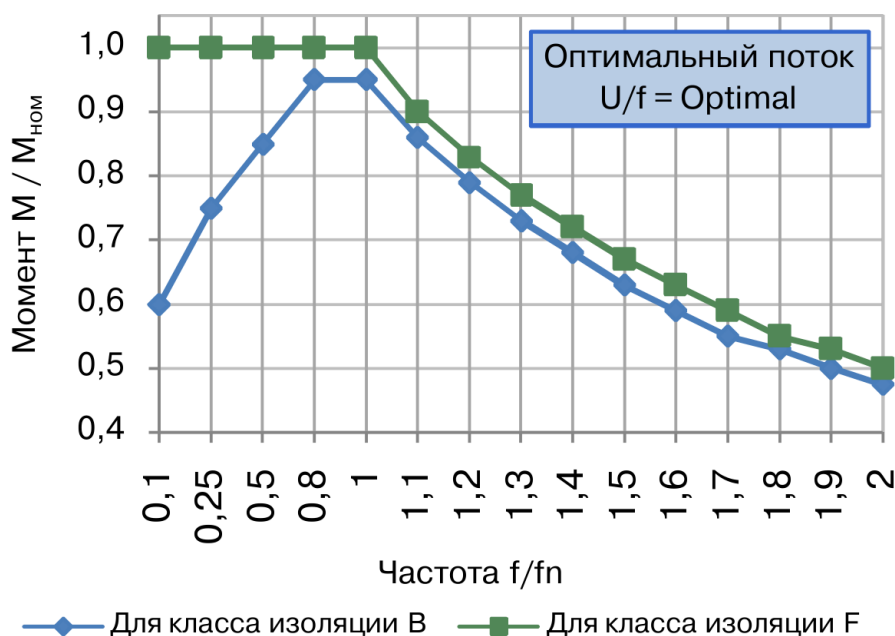


Рисунок 4 – Оптимизация магнитного потока для электродвигателей

При пуске двигателя плотность магнитного потока необходимо увеличить для обеспечения достаточного пускового момента. При этом частота питающего напряжения выбирается очень небольшой (порядка 0,1–0,2 Гц), чтобы минимизировать потери на гистерезис. Таким образом, становится возможным выполнить пуск с максимальным напряжением и током и, соответственно моментом. Таким образом, подбирается оптимальное соотношение напряжения и частоты питания электродвигателя ( $U/f$ ). В соответствии со стандартом *NEMA MG1* частей 30 и 31, пусковой момент должен быть не менее 140% от номинального, а ток при этом не более 150% от номинального» [9].

«Оптимизация магнитного потока минимизирует пусковые токи асинхронных электроприводов, обеспечивая повышение КПД при пуске двигателей и снижая возникновение снижающих общую энергоэффективность сети вредных гармоник напряжения.

## 2) Чувствительность к изменениям параметров в сети.

Для сети переменного тока асинхронный электропривод является нелинейной нагрузкой, ток которой содержит определенные гармоники.

Характеристики гармоник при питании от ТрЧП определяются выражением  $h=np\pm 1$  на стороне переменного тока, то есть на линии электропередачи ( $p$  – число импульсов инвертора и  $n=1,2,3$ ). Таким образом, в случае с типовым шести диодным выпрямительным мостом (6 импульсов), наиболее выраженными генерируемыми гармониками будут 5-я и 7-я. Их величины могут варьироваться от 10% до 40% от основной компоненты, в зависимости от параметров питающей сети.

Общий уровень гармоник определяется коэффициентом *THD* (*Total Harmonic Distortion* - коэффициент нелинейных искажений). Стандарт *IEEE Std.519(1992)* рекомендует максимальный  $THD=5\%$  для мощных систем напряжением  $\leq 69$  кВ.

В современных *IGBT*-ТрЧП фильтрация нежелательных гармоник осуществляется сетевыми дросселями, что увеличивает КПД

электродвигателя и продлевает его срок службы. Частотный преобразователь с фильтрующими устройствами стабилизируют параметры питания электродвигателя, что повышают его КПД и гарантирует сохранность изоляции» [24].

Энергосберегающие силовые трансформаторы – это трансформаторы, которые имеют более высокую эффективность по сравнению с традиционными трансформаторами. Они могут быть изготовлены из более эффективных материалов или иметь улучшенную конструкцию, что позволяет снизить потери энергии и уменьшить воздействие на окружающую среду. Энергосберегающие трансформаторы имеют более высокую эффективность, чем традиционные трансформаторы. Это достигается за счет использования новых материалов и технологий, которые позволяют снизить потери энергии и увеличить срок службы трансформатора. Кроме того, такие трансформаторы могут быть более компактными и легкими, что облегчает их установку и эксплуатацию.

Энергосберегающие электродвигатели – это электродвигатели, которые потребляют меньше энергии по сравнению с традиционными электродвигателями. «Это достигается за счет использования современных материалов и технологий, а также оптимизации конструкции двигателя. Энергосберегающие электродвигатели также имеют более высокий КПД и меньшую массу, что делает их более эффективными и экологичными. Так как энергосберегающие электродвигатели потребляют меньше электроэнергии, они снижают затраты на электроэнергию и улучшают общую энергоэффективность системы электропривода.

В стандарте IEC 60034-30 установлены три класса энергоэффективности трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, что показано на рисунке 5.

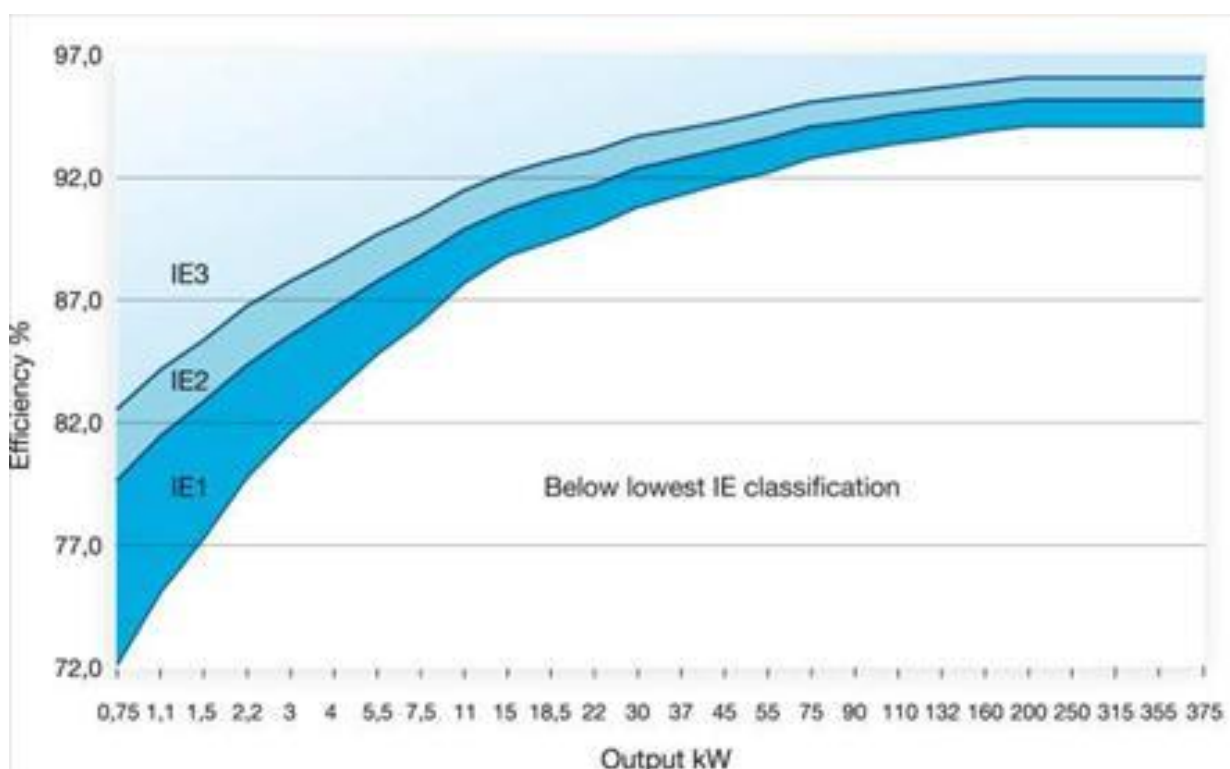


Рисунок 5 – Классификация энергоэффективности электродвигателей

Современные энергосберегающие электродвигатели принадлежат к классам не ниже IE2» [16].

#### 1.2.4 Программируемые логические контроллеры и реле

Программируемый логический контроллер (ПЛК) – это электронное устройство, предназначенное для автоматизации технологических процессов. Он работает по принципу выполнения запрограммированной последовательности действий (алгоритма) без участия человека. ПЛК применяются в различных отраслях промышленности, а также в системах управления зданиями и в автоматизации производства. Программирование ПЛК осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения. Обычно используется язык программирования стандарта МЭК 61131-3, который включает в себя несколько типов инструкций (например, SFC, ST, IL, FBD и др.). После написания программы она загружается в память контроллера, где и выполняется без участия человека.

Программируемые логические контроллеры (ПЛК) и цифровые программируемые реле (ЦПР) являются современными электронными аппаратами управления электроприемниками (электроприводами производственных механизмов, освещением, сервоприводами исполнительных механизмов и т.д.), в настоящее время массово внедряемыми в современные системы электроснабжения. Электронная база обеспечивает эффективную и очень гибкую программную настройку, позволяющие реализовать наибольшее энергосбережение для самых разных сценариев использования электроприемников. Поддерживается также удаленная настройка и дистанционное управление.

Структурная схема ПЛК показана на рисунке 6.



Рисунок 6 – Структурная схема ПЛК

Цифровые программируемые реле – это электронные устройства, которые используются для управления различными процессами и системами.

Они являются альтернативой традиционным электромеханическим реле и обладают рядом преимуществ, таких как высокая точность, быстродействие, компактность и экономичность.

ЦПР обычно имеют несколько входов для подключения различных датчиков и других источников информации, а также несколько выходов для управления исполнительными механизмами. «Программирование осуществляется с помощью специального программного обеспечения, которое позволяет создавать сложные алгоритмы работы реле.

Структурная схема ЦПР показана на рисунке 7.



Рисунок 7 – Структурная схема ЦПР» [6]

Таким образом, ЦПР являются упрощенной версией программируемого логического контроллера, предлагая несколько урезанный ввиду отсутствия процессорного модуля функционал.

Одним из главных преимуществ ЦПР является их гибкость и возможность адаптации к различным условиям работы. Они могут быть использованы для управления технологическими процессами, в автомобильной промышленности, в бытовой технике и многих других областях.

Кроме того, ЦПР обладают высокой надежностью и долговечностью, что обеспечивает стабильную работу систем управления в течение длительного времени. Благодаря своей компактности и простоте монтажа, они легко интегрируются в существующие системы и не требуют значительных затрат на установку и обслуживание.

«Подключение освещения с ЦПР показано на рисунке 8.

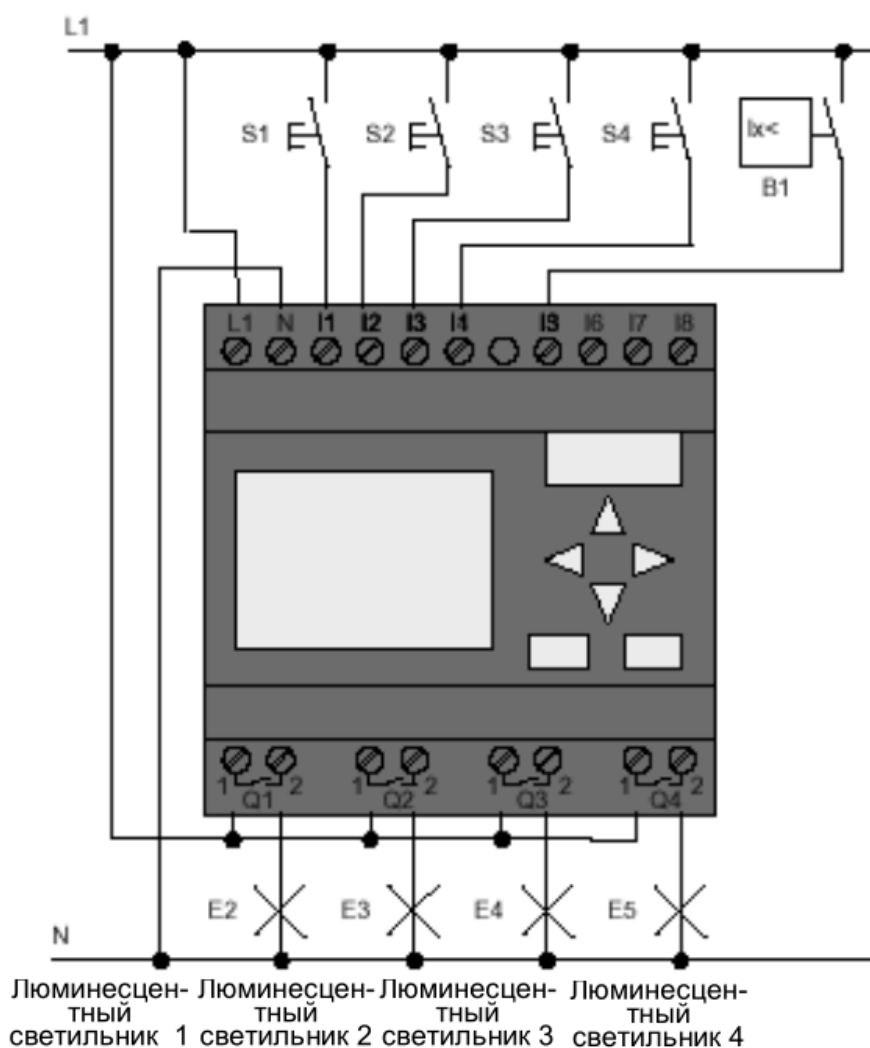
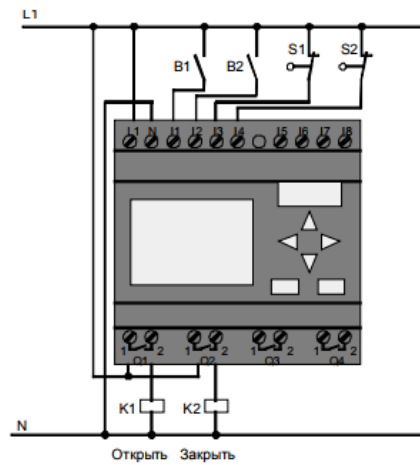


Рисунок 8 – Подключение системы освещения с ЦПР

Система управления автоматическими дверями с ЦПР – на рисунке 9.



**Используемые компоненты**

- K1                                    Линейный контактор *Открытие*
- K2                                    Линейный контактор *Закрывтие*
- S1 (НЗ контакт)                  Конечный выключатель *Замкнут*
- S2 (НЗ контакт)                  Конечный выключатель *Открыт*
- B1 (НО контакт)                  Инфракрасный датчик перемещения *Снаружи*
- B2 (НО контакт)                  Инфракрасный датчик перемещения *Внутри*

Рисунок 9 – Управление автоматическими дверями с ЦПР

Система управления вентиляцией с ЦПР показана на рисунке 10.

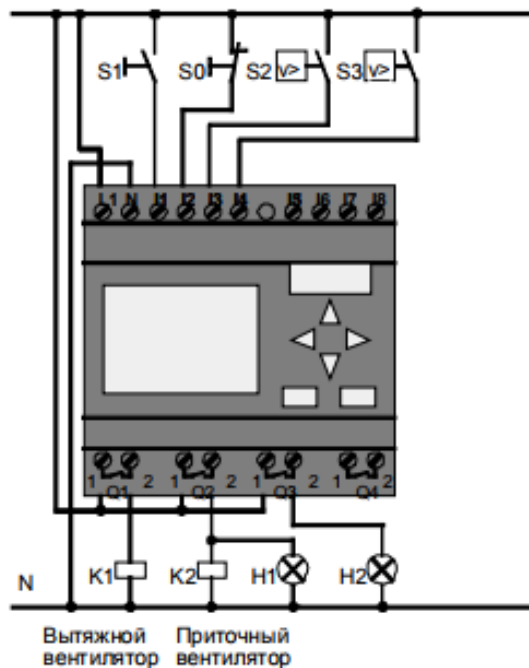


Рисунок 10 – Система управления вентиляцией с ЦПР



ЦПР являются эффективным современным средством для повышения энергоэффективности систем электроснабжения и автоматизации систем управления и могут быть рекомендованы к применению на самых различных объектах» [6].

### **1.2.5 Технический учет электроэнергии**

Технический учет электроэнергии – это система измерений и сбора информации о потреблении электроэнергии на предприятии или в организации. Учет электроэнергии необходим для контроля за ее расходом, определения потерь и оптимизации потребления. В состав системы технического учета электроэнергии входят счетчики электроэнергии, устройства сбора и передачи данных (УСПД), сервер и программное обеспечение. «Система технического учета электроэнергии может быть интегрирована с другими системами автоматизации и диспетчеризации, такими как системы управления освещением, системами отопления и вентиляции, а также с системами контроля доступа и видеонаблюдения.

Благодаря техническому учету электроэнергии можно контролировать потребление электроэнергии и выявлять несанкционированные подключения; определять потери электроэнергии и разрабатывать меры по их снижению; оптимизировать загрузку оборудования и повышать эффективность использования электроэнергии; планировать инвестиции в энергоснабжение и прогнозировать расходы на электроэнергию» [6].

«Технический учет электроэнергии применяется для внутренних нужд предприятий и организаций с целью оптимизации режимов электропотребления по производственным участкам, достижения максимальной энергоэффективности основного технологического процесса производства в целом. В настоящее время с этой целью используются автоматизированные системы технического учета электроэнергии (АСТУЭ). Применение современных АСТУЭ также позволяет эффективно согласовывать общий график электропотребления предприятия с графиком

питающей энергосистемы, что позволяет использовать более выгодные тарифы и иные пути экономии средств оплаты электроэнергии. Постоянный мониторинг электропотребления по производственным участкам, отдельным технологическим линиям и электрооборудованию (ЭО) позволяет также своевременно выявлять ненормативные режимы работы производственного оборудования и оборудования системы электроснабжения (СЭС) предприятия, предупреждая аварийные ситуации, поломку ЭО и негативные последствия от остановки технологического процесса производства. Также в программном обеспечении (ПО) АСТУЭ ведется постоянная архивация данных по учету электроэнергии и режимам работы оборудования, обеспечивается передача данных в общую цифровую сеть предприятия. Таким образом вопросы реализации АСТУЭ на современных предприятиях являются важными и актуальными» [6].

АСТУЭ позволяет получать информацию о расходе электроэнергии в режиме реального времени, а также анализировать данные за определенные периоды времени. Это помогает оптимизировать потребление электроэнергии и снижать ее потери. Основные преимущества АСТУЭ: повышение точности учета электроэнергии, возможность удаленного контроля и управления потреблением электроэнергии, снижение затрат на электроэнергию за счет оптимизации ее потребления, улучшение экологической ситуации за счет снижения выбросов парниковых газов, увеличение эффективности работы энергосистемы в целом. Программное обеспечение АСТУЭ предназначено для сбора, обработки и анализа данных о потреблении электроэнергии [26]. Оно позволяет отслеживать текущее состояние системы, выявлять нарушения и оптимизировать энергопотребление. Кроме того, программа может формировать отчеты о потреблении энергии за определенные периоды, что позволяет оптимизировать затраты на электроэнергию и снижать ее потери. Каналы связи в автоматизированной системе технического учета электроэнергии используются для передачи данных от счетчиков электроэнергии к устройствам сбора и передачи данных, а затем на сервер для

обработки и хранения информации. В качестве каналов связи могут использоваться проводные и беспроводные сети, а также GSM-модемы для передачи данных на удаленные объекты.

«Необходимо различать АСТУЭ и автоматизированную систему коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ). Сравнение АСТУЭ и АСКУЭ показано в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение АСТУЭ и АСКУЭ

Показатели	АСТУЭ	АСКУЭ
Первичная цель создания	Обеспечение максимальной энергоэффективности	Эффективный расчет за энергоресурсы, исключение хищений энергоресурсов
Главная функция	Мониторинг и контроль режимов электропотребления внутри предприятия	Точный учет общего количества потребления электроэнергии
Требования к реализации	Определяются конкретным заказчиком	Определяются действующими нормативными документами

Указанные различия между АСТУЭ и АСКУЭ требуется учитывать при проектировании данных систем. Для достижения максимальной эффективности работы АСТУЭ проектируются для каждого конкретного предприятия индивидуально.

Накопление АСТУЭ статистических данных по электропотреблению позволяет предприятию проводить мероприятия по оптимизации режимов работы производственного ЭО с учетом согласования с графиком питающей энергосистемы.

Анализ баланса отдачи электроэнергии и электропотребления позволяет эффективно выявлять ненормативные режимы работы ЭО. На рисунке 11 показано окно анализа баланса отдачи электроэнергии и электропотребления с выявлением явного небаланса (вероятного факта неисправности или ненадлежащего технического состояния производственного электрооборудования).

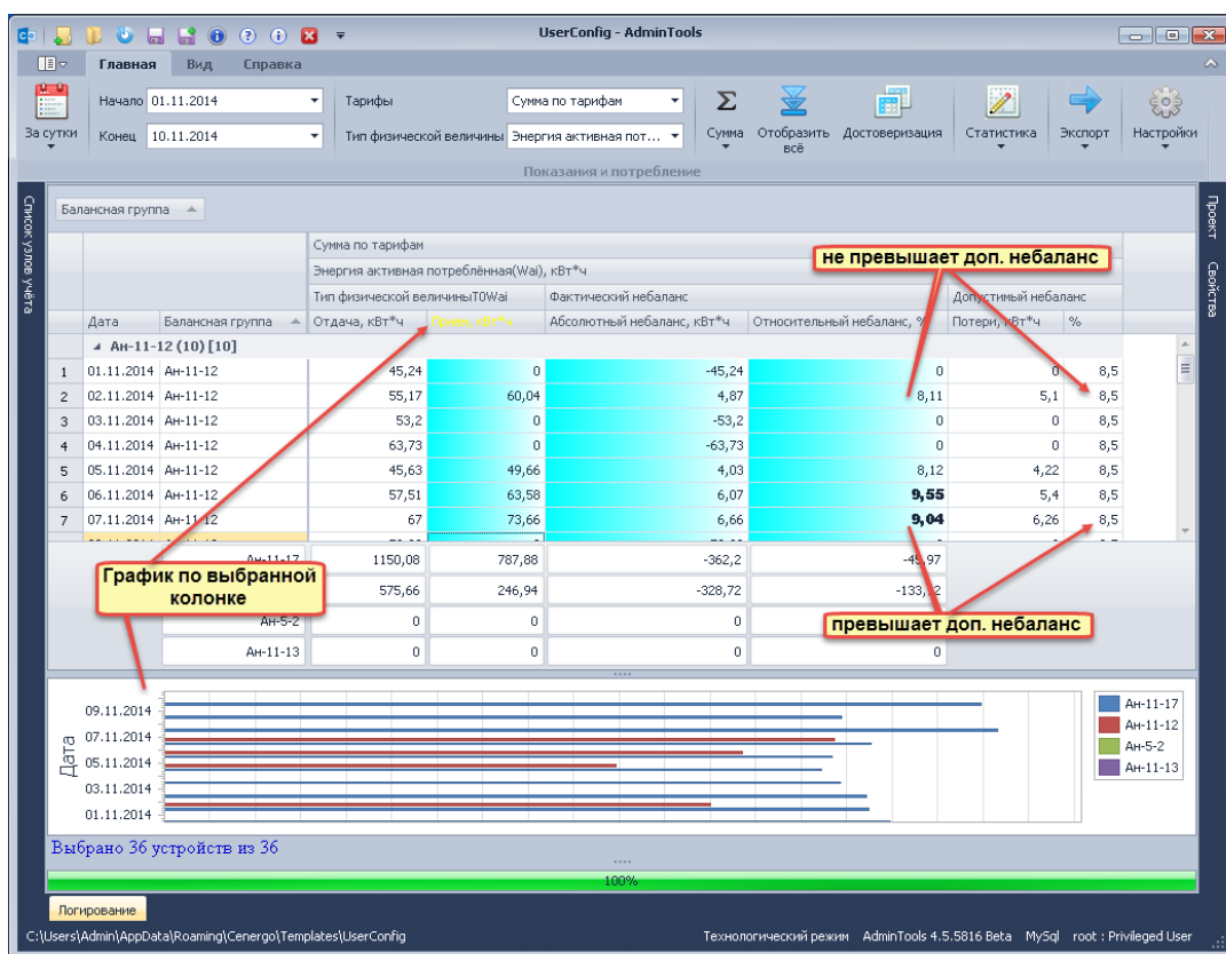


Рисунок 11 – Окно анализа баланса электроэнергии

Функции АСТУЭ может выполнять и АИИСКУЭ, предоставляющая также автоматизацию расчетов за электроэнергию» [19].

«В окне анализа баланса электроэнергии можно увидеть информацию о текущем потреблении, генерации и хранении электроэнергии, а также о

прогнозируемых нагрузках на систему. Это позволяет определить, достаточно ли у вас энергии для удовлетворения потребностей в данный момент и в будущем. Таким образом, автоматизированная система технического учета электроэнергии является важным инструментом для контроля и оптимизации энергопотребления на предприятиях и объектах ЖКХ. Она позволяет получать точную информацию о расходе электроэнергии, выявлять потери и принимать меры по их устранению. Кроме того, АСТУЭ может интегрироваться с другими системами, такими как управление освещением, отоплением и вентиляцией, что повышает эффективность работы всей энергосистемы в целом. Внедрение АСТУЭ обеспечивает повышение точности учета электроэнергии, возможность удаленного контроля и управления потреблением электроэнергии, снижение затрат на электроэнергию за счет оптимизации потребления и уменьшения потерь, улучшение экологической ситуации за счет снижения выбросов парниковых газов и повышения энергоэффективности, увеличение эффективности работы энергосистемы благодаря оптимизации режимов работы оборудования и улучшению качества электроэнергии» [26].

### **1.3 Анализ системы электроснабжения предприятия и возможных мероприятий по энергосбережению**

Предприятие имеет собственную производственную базу, обеспечивающую выполнение основного объема производимых работ. На территории базы находится несколько производственных участков, включая административно-бытовой корпус (АБК) и ремонтный цех (РЦ). В системе электроснабжения предприятия планируется постепенно массово внедрять мероприятия и технические решения для достижения энергосбережения в электрических сетях. Реконструкция системы электроснабжения и внедрение технических решений по повышению энергоэффективности начнется с АБК и РЦ, на примере которых далее проведены разработка и анализ мероприятий по

энергосбережению. План помещений АБК и действующая система распределения электроэнергии показаны на рисунке 12.

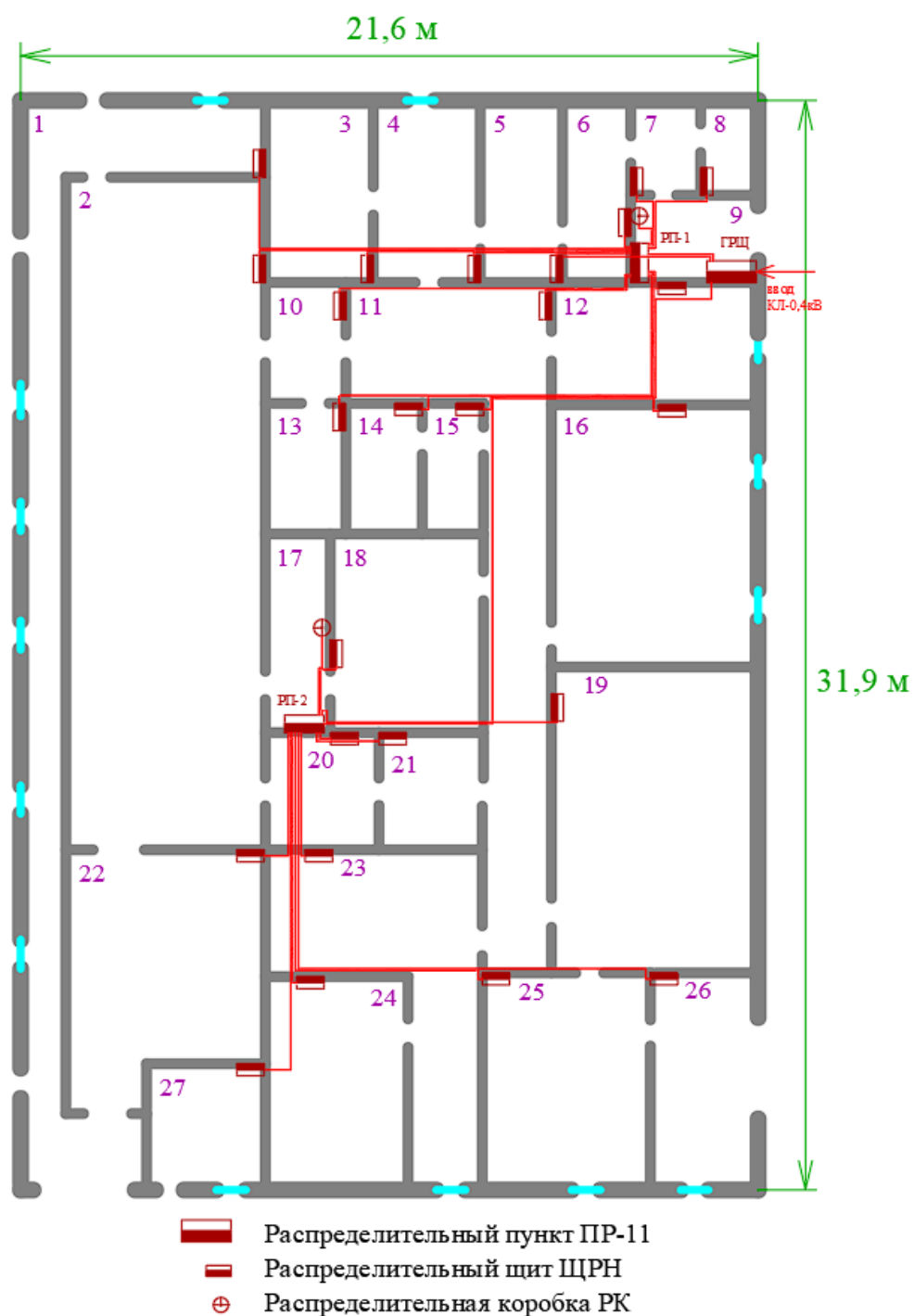


Рисунок 12 – План помещений АБК и действующая система распределения электроэнергии

Перечень помещений АБК приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Перечень помещений АБК

№ на плане	Наименование помещения
1	Коридор
2	Офисы
3	Бытовка
4	Туалет
5	Серверная
6	Проходная
7	Бытовка
8	Кладовая
9	Щитовая
10	Административное помещение
11	Коридор
12	Административное помещение
13	Венткамера
14	Административное помещение
15	Административное помещение
16	Административное помещение
17	Щитовая
18	Административное помещение
19	Административное помещение
20	Туалет
21	Туалет
22	Административное помещение
23	Административное помещение
24	Кладовая
25	Медицинский кабинет
26	Вентиляционная
27	Насосная

Административно-бытовой корпус – это здание или сооружение, предназначенное для обеспечения бытовых и административных нужд сотрудников предприятия, организации или учреждения. Обычно в таких корпусах располагаются раздевалки, комнаты отдыха, столовые, медицинские пункты, офисы администрации и другие помещения, необходимые для комфортного и эффективного выполнения работы. Административно-бытовые корпуса являются неотъемлемой частью многих промышленных предприятий, офисных зданий и других объектов, где работает большое количество людей. Электроснабжение административно-бытового корпуса должно обеспечивать надежное и бесперебойное питание всех потребителей электрической энергии, установленных в корпусе.

Административно-бытовой корпус включает значительное число помещений и занимает существенную площадь. В состав электрических нагрузок входит значительное число асинхронных электродвигателей систем вентиляции, водоснабжения, водоотведения и канализации, а также других электроприводов. Значительную долю нагрузки составляет освещение помещений. Текущие актуальные средневзвешенные нагрузки АБК, без учета освещения, составляют 229,008 кВт; 148,1 квар, коэффициент мощности силовой сети  $\cos\varphi$  составляет 0,84, что значительно меньше нормативного значения 0,95, отмечается повышенное потребление реактивной мощности. Нагрузка действующей системы освещения составляет 16,221 кВт и составляет значительную долю общей нагрузки, при этом уровень освещенности в некоторых помещениях недостаточен. Таким образом, очевидна неэффективность существующей СЭС и оборудования с точки зрения энергосбережения.

План ремонтного цеха показан на рисунке 13.



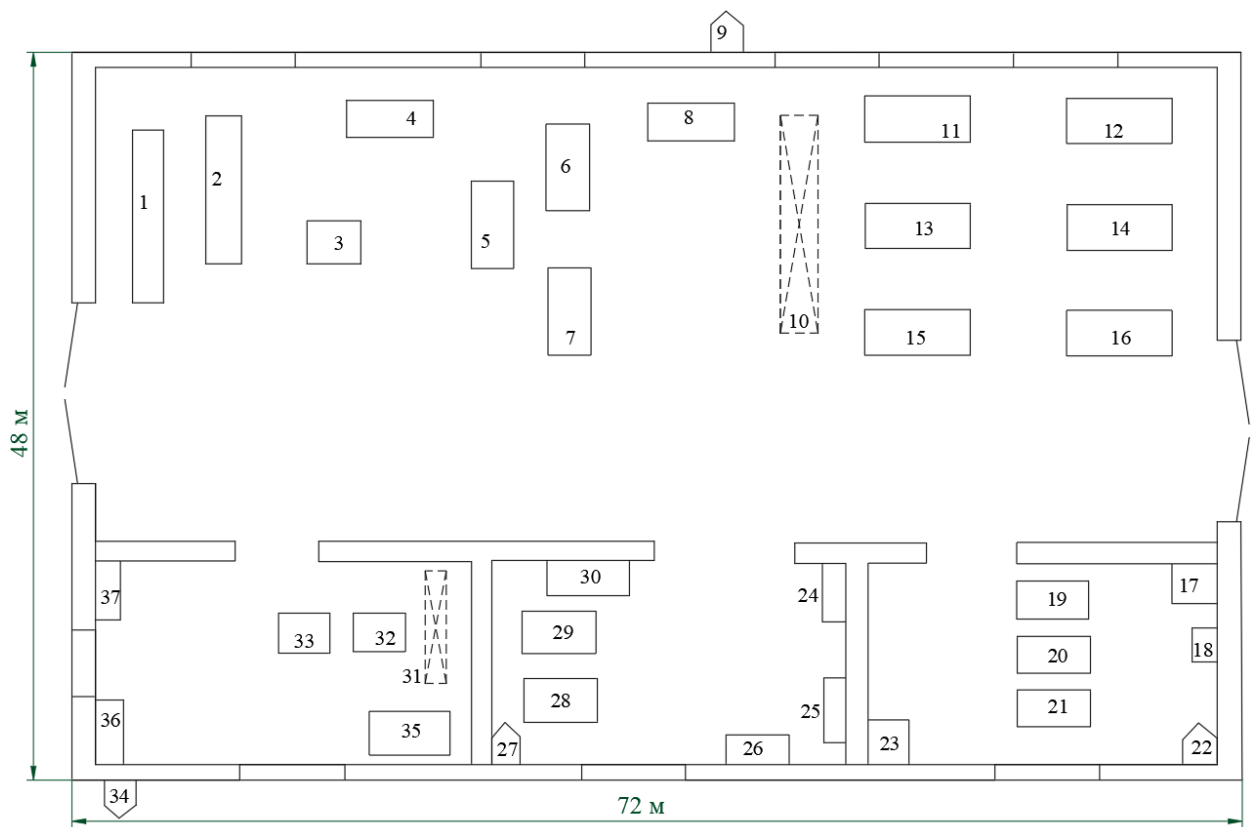


Рисунок 13 – План ремонтного цеха

Перечень электроприемников РЦ приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Электроприемники ремонтного цеха

№ приемника на плане	Наименование	Установленная мощность, кВт
1	Фрезерный станок	3,9
2	Сверлильный станок	13,9
3	Шлифовальный станок	1,9
4	Токарный станок	4,8
5	Универсальный станок	6,9
6	Токарный станок	10,8
7		3,8
8	Строгальный станок	5,1
9	Вентилятор	5,5
10	Кран мостовой	7,5

Продолжение таблицы 3

№ приемника на плане	Наименование	Установленная мощность, кВт
11	Шлифовальный станок	1,1
12	Заточной станок	4
13	Универсальный станок	7,2
14	Точило	2,2
15	Фрезерный станок	4,1
16	Сверлильный станок	4
17	Молот	9,1
18	Точило	1,1
19	Электропечь	6,2
20		9,8
21		14,6
22	Вентилятор	5,5
23	Молот	9,1
24,25	Преобразователь сварочный	11,8
26	Сварочный пост	17
27	Вентилятор	5,5
28,29	Сварка точечная	19,2
30	Сварочный пост	42
31	Кран мостовой	22
32,33	Намоточный стенд	1,8
34	Вентилятор	4
35	Электропечь	4,2
36,37	Токарный станок	1,1

Ремонтный цех – это подразделение предприятия или организации, занимающееся проведением ремонтных работ и технического обслуживания оборудования, транспортных средств и других технических объектов. В состав ремонтного цеха обычно входят участки механической обработки, слесарный участок, сварочный участок, участок покраски и другие подразделения, необходимые для выполнения ремонтных работ. РЦ предназначен для проведения ремонтных работ и технического обслуживания оборудования, автомобилей и других технических средств. В ремонтном цехе выполняются

работы по замене изношенных деталей, восстановлению работоспособности оборудования, проведению профилактических мероприятий и т.д.

Цех включает значительное число помещений и занимает существенную площадь. В состав электрических нагрузок РЦ входит значительное число мощных асинхронных электродвигателей производственного оборудования, а также других электроприводов. Значительную долю нагрузки составляет освещение помещений. Текущие актуальные средневзвешенные нагрузки РЦ, без учета освещения, составляют 410,22 кВт; 308,25 квар, коэффициент мощности силовой сети  $\cos\varphi$  составляет 0,799, что значительно меньше нормативного значения 0,95, отмечается повышенное потребление реактивной мощности. Нагрузка действующей системы освещения составляет 31,532 кВт и составляет значительную долю общей нагрузки, при этом уровень освещенности в некоторых помещениях недостаточен. Таким образом, очевидна неэффективность существующей СЭС и оборудования с точки зрения энергосбережения.

По результатам анализа технико-эксплуатационной документации по АБК и РЦ, а также технико-эксплуатационной документации по действующим системам электроснабжения данных объектов, можно предложить мероприятия по энергосбережению:

- реализовать адаптивную компенсацию реактивной мощности на шинах главного распределительного щита (ГРЩ) АБК;
- светильники с галогеновыми лампами накаливания, лампами ДРЛ и люминесцентными лампами заменить на светодиодные;
- реализовать интеллектуальную автоматическую систему управления освещением;
- в цеховой ТП реализовать адаптивную компенсацию реактивной мощности на шинах 0,4 кВ, установить энергосберегающие силовые трансформаторы;
- обеспечить эффективное управление потребителями с помощью программируемых логических контроллеров и реле;

- обеспечить эффективный технический учет электроэнергии путем реализации АСТУЭ;
- в мощных электроприводах, работающих продолжительное время, заменить электродвигатели на энергоэффективные и обеспечить питание от частотных преобразователей.

#### Выводы.

Энергосбережение – это комплекс мер, направленных на снижение потребления энергии и повышение эффективности использования энергетических ресурсов. Энергосбережение позволяет снизить затраты на энергию, уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу и сохранить природные ресурсы для будущих поколений. По результатам анализа источников информации и приведенных в них теоретических вопросов обеспечения энергосбережения, можно сделать вывод, что энергосбережение является важным аспектом современной экономики и экологии. Оно включает в себя множество различных мер, таких как использование энергоэффективных технологий, оптимизация режимов работы оборудования, повышение эффективности использования энергии и другие. Современные авторы-исследователи отмечают значительное число способов энергосбережения на промышленных предприятиях, позволяющих значительно снизить потери электроэнергии и мощности. Рассмотрены и проанализированы современные способы обеспечения энергосбережения в системах электроснабжения и электрических сетях промышленных предприятий. Проведен анализ системы электроснабжения предприятия и возможных мероприятий по энергосбережению, систематизированы исходные данные для разработки мероприятий по энергосбережению и повышению энергоэффективности на предприятии.

## 2 Разработка и анализ энергосберегающих мероприятий

### 2.1 Энергоэффективное интеллектуальное светодиодное освещение

«На данный момент СО административных и бытовых помещений выполняется с учетом обеспечения максимального комфорта для работников и других людей. Кроме положительных эффектов для физиологического и психологического состояния людей, учет этих факторов при проектировании систем освещения приводит к повышению трудоспособности и моральной мотивации персонала, что, в свою очередь, повышает эффективность использования рабочего времени и трудовые показатели организации в целом. Минимизация нагрузки на зрительный аппарат и психологический комфорт обеспечиваются:

- гибким автоматизированным управлением параметрами освещения (уровнем освещенности, цветовой температурой и т.д.), предусматривается возможность дистанционного управления, в том числе по сетям Bluetooth, Wi-Fi и Internet;
- минимизацией уровня пульсаций светового потока (использованием светодиодных источников света с высококачественными драйверами питания, галогеновых ламп накаливания и т.д.);
- источники света должны быть долговечными и высоконадежными, для исключения миганий (характерно, например, для люминесцентных ламп и низкокачественных светодиодных источников света)» [22].

В целом, в настоящее время качественно спроектированные и выполненные системы освещения являются достаточно безопасными, надежными и энергоэффективными техническими системами. Можно отметить массовое внедрение СО на основе светодиодных источников света под интеллектуальным автоматизированным управлением. Таким образом, для освещения помещений административно-бытового корпуса и РЦ

предлагается использовать светодиодную систему освещения под управлением программируемых реле (ПР). Это обеспечит наибольшую энергоэффективность, удобство управления и комфортность пользования освещением.

Разработка энергоэффективного освещения АБК.

Светотехнический расчет помещений проводится по методу коэффициента использования светового потока [22].

«Для каждого помещения определяются:

– индексы помещений:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \quad (1)$$

где  $A, B, h$  – длина, ширина и высота помещений м.

– требуемый световой поток от светильников:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{K_u}, \quad (2)$$

где  $E$  – нормируемая освещенность, лк;

$S$  – площадь помещения, м<sup>2</sup>;

$K_z, Z, K_u$  – коэффициенты запаса, минимальной освещенности, использования светового потока» [22].

Пример светотехнического расчета для помещения №1 АБК – коридор. Согласно технической документации и СП 52.13330.2016, требуемая минимальная освещенность составляет 100 лк. Коэффициент использования светового потока для индекса помещения 0,45 равен 0,72 [22].

По (1.2):

$$i = \frac{30,93 \cdot 1,51}{3,2 \cdot (30,93 + 1,51)} = 0,45,$$

$$\Phi = \frac{100 \cdot 30,93 \cdot 1,51 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{0,72} = 10876 \text{ лм.}$$

Для остальных помещений АБК расчеты аналогичны, результаты – в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты светотехнического расчета помещений АБК

№ помещения на плане	Е <sub>нор</sub> , лк	Φ, лм
1	100	10876
2	400	124901
3	50	2035
4	300	14071
5		13891
6	100	1801
7	300	3786
8	75	844
9	300	9812
10	400	7530
11	100	8049
12	300	12380
13	75	1181
14	400	8450
15		5763
16		53480
17	300	8162
18	400	21408
19		42274
20	150	3123
21		2669
22	400	36364
23		27720
24	50	2310
25	75	4884

Продолжение таблицы 4

№ помещения на плане	$E_{\text{нор}}$ , лк	$\Phi$ , лм
26	75	1922
27	400	11448

Необходимое число светильников для каждого помещения:

$$N = \frac{\Phi}{\Phi_c}, \quad (3)$$

где  $\Phi_c$  – световой поток светильника, лм.

Пример расчета и выбора светильников для помещения №1 АБК.

Принимаются к установке светильники СВО, 20 Вт, со световым потоком 1700 лм [25].

$$N = \frac{10876}{1700} \approx 7 \text{ шт.}$$

Устанавливается 7 светильников. Для остальных помещений АБК выбор светильников проводится аналогично, результаты – в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты выбора светильников для помещений АБК

№ помещения	N, шт.	$\Phi_c$ , лм	Светильники
1	7	1700	СВО, 20 Вт
2	20	6150	СВО, 80 Вт
3	5	490	Вартон 6 Вт
4	5	3200	СВО, 40 Вт



Продолжение таблицы 5

№ помещения	Н, шт.	Фс, лм	Светильники
5	5	3200	СВО, 40 Вт
6	2	1700	СВО, 20 Вт
7	2	3200	СВО, 40 Вт
8	2	490	Вартон 6Вт
9	4	2900	ССП-458, 36 Вт
10	5	1700	СВО, 20 Вт
11	5		
12	8		
13	3	490	Вартон 6 Вт
14	3	2900	ССП-458, 36 Вт
15	2		
16	9	6150	СВО, 80 Вт
17	3	3200	СВО, 40 Вт
18	7	3200	СВО, 40 Вт
19	7	6150	СВО, 80 Вт
20	2	1700	СВО, 20 Вт
21	2		
22	6	6150	СВО, 80 Вт
23	9	3200	СВО, 40 Вт
24	5	490	Вартон 6Вт
25	10		
26	4		
27	4	3200	СВО, 40 Вт

Наружное освещение рассчитывается методом удельной мощности освещения [22].

«Общая нагрузка наружного освещения:

$$P_{po} = P_0 \cdot K_{co} \cdot F, \quad (4)$$

где  $P_0$  – удельная нагрузка, Вт/м<sup>2</sup>;

$K_{co}$  – коэффициент спроса освещения;

$F$  – освещаемая площадь территории, м<sup>2</sup>.

Требуемое число светильников наружного освещения:

$$N = \frac{P_{po}}{P_{ce}}, \quad (5)$$

где  $P_{ce}$  – мощность одного светильника, Вт» [22].

Принимаются специализированные влагозащищенные светодиодные светильники NT-PROM 48 Ex мощностью 48 Вт, адаптированные для наружного освещения.

$$P_{po} = 0,2 \cdot 1,0 \cdot 2850 = 570 \text{ Вт},$$

$$N = \frac{570}{48} = 11,9 \approx 12 \text{ шт.}$$

На фасаде здания АБК будет установлено 12 светильников NT-PROM 48 Ex.

Электрическая схема и план системы освещения АБК показаны на рисунке 14.

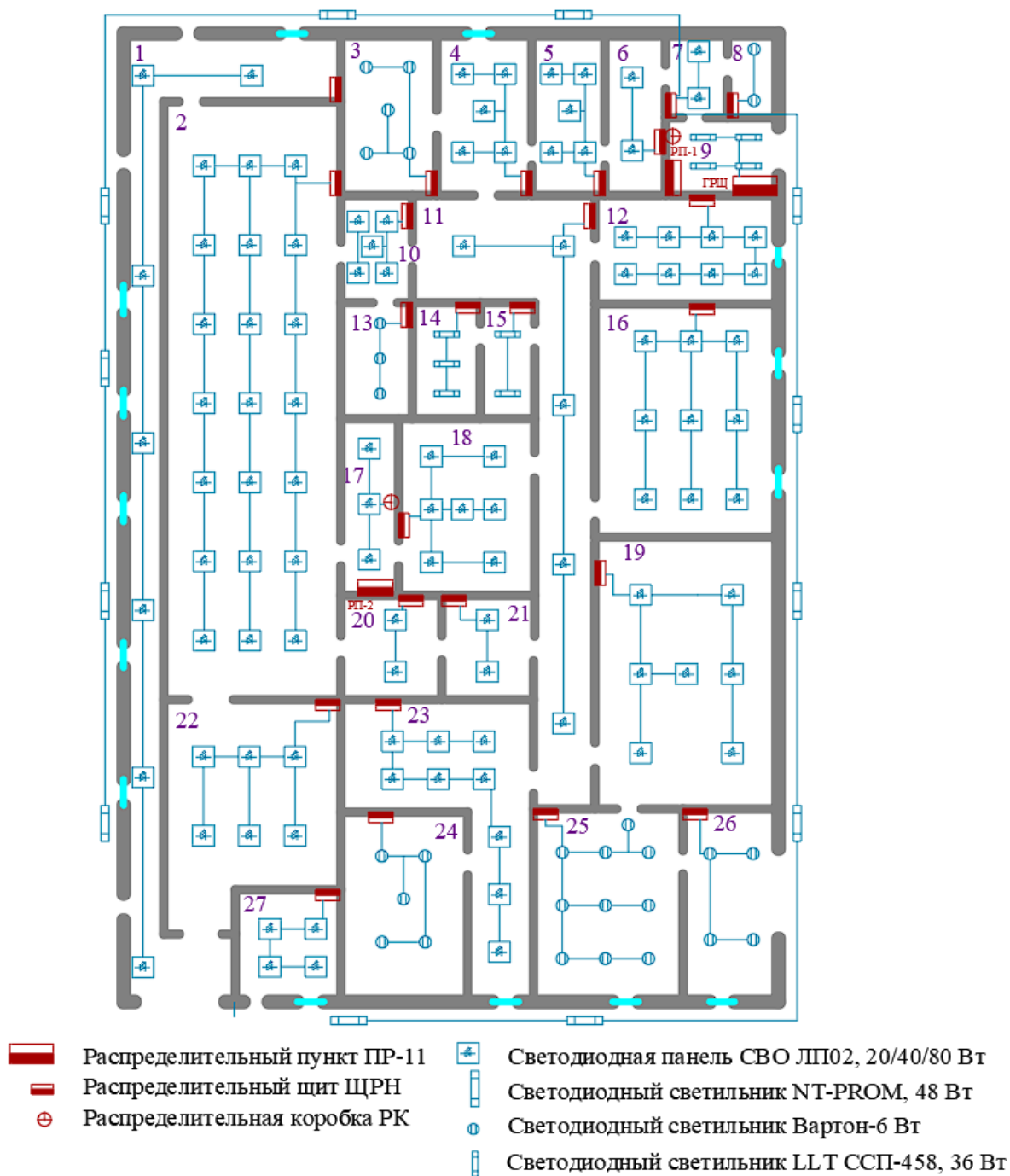


Рисунок 14 – Электрическая схема и план системы освещения АБК

«Питание осветительной сети предполагается выполнить от распределительных коробок (РК) и распределительных щитков (ЩРН) силовой сети, установленных на стенах помещений.

Расчетная активная нагрузка освещения помещений:

$$P_p = P_{св} \cdot n_{св}, \quad (6)$$

где  $P_{св}$  – паспортная мощность светильника, Вт;

$n_{св}$  – число светильников, шт.

Максимальный рабочий ток линии:

$$I_p = \frac{P_p}{U_n \cdot \cos \varphi}, \quad (7)$$

где  $P_p$  – расчетная нагрузка, Вт;

$U_n$  – напряжение КЛ, В» [22].

Для помещения №1:

$$P_p = 20 \cdot 7 = 140 \text{ Вт},$$

$$I_p = \frac{7 \cdot 20}{0,22 \cdot 0,75} = 0,81 \text{ А}.$$

Для остальных помещений АБК расчет проводится аналогично, результаты – в таблице 6.

Таблица 6 – Расчет параметров осветительной сети АБК

№ пом. на плане	Расчетная мощность, $P_p$ , Вт	Рабочий ток $I_p$ , А
1	140	0,81
2	1600	9,28
3	30	0,17
4	200	1,16

Продолжение таблицы 6

№ пом. на плане	Расчетная мощность, P <sub>p</sub> , Вт	Рабочий ток I <sub>p</sub> , А
5	200	1,16
6	40	0,23
7	80	0,46
8	12	0,07
9	80	0,46
10	100	0,58
11	100	0,58
12	160	0,93
13	18	0,10
14	60	0,35
15	40	0,23
16	720	4,17
17	120	0,70
18	280	1,62
19	560	3,25
20	40	0,23
21	40	0,23
22	480	2,78
23	360	2,09
24	30	0,17
25	60	0,35
26	24	0,14
27	160	0,93
Итого по помеще- ниям	5734	0,07...4,17
Наружн. освещ.	576	3,34
Итого	6310	0,07...4,17

Итого суммарная нагрузка энергоэффективного освещения АБК составит 6,31 кВт, что более чем в 2,5 раза меньше значения 16,221 кВт для

действующей системы освещения. С учетом реализации интеллектуального управления на основе ПР эффект по энергосбережению будет еще существенно более значительным.

Разработка энергоэффективного освещения ремонтного цеха.

Цех разобьем на четыре участка:

- механическое отделение (расположено оборудование № 1-16 на плане);
- кузнечное отделение (расположено оборудование № 17-23 на плане);
- сварочное отделение (расположено оборудование № 24-27 на плане);
- электроремонтное отделение (расположено оборудование № 28-37 на плане).

Освещаемая площадь участков:

$$F_1 = 71,5 \cdot 29,5 = 2109,25 \text{ м}^2,$$

$$F_2 = 23,1 \cdot 17,2 = 397,32 \text{ м}^2,$$

$$F_3 = 23,1 \cdot 17,2 = 397,32 \text{ м}^2,$$

$$F_4 = 23,1 \cdot 17,2 = 397,32 \text{ м}^2.$$

Для примера рассматривается расчет участка 1 (механическое отделение).

Индекс помещения и необходимый минимальный световой поток от светильников, по (1,2):

$$i = \frac{71,5 \cdot 29,5}{8 \cdot (71,5 \cdot 29,5)} = 2,61,$$

$$\Phi = \frac{200 \cdot 2109,25 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{0,42} = 912496 \text{ лм.}$$

Светотехнический расчет участков ремонтного цеха сведен в таблицу 7.

Таблица 7 – Светотехнический расчет участков ремонтного цеха

Наименование участков	Енор, лк	F, м <sup>2</sup>	Φ, лм
Механическое отделение	200	2109,25	912496
Кузнечное отделение	200	397,32	261320
Сварочное отделение			
Электроремонтное отделение			

Освещение в цехе выполняется специализированными промышленными светодиодными светильниками WebStar-105W. Используются модули по 5 светильников.

Для механического отделения, требуемое число модулей светильников, по (3):

$$N \geq \frac{912496}{5 \cdot 13120} \approx 14 \text{ шт.}$$

Принимаем 14 модулей по 5 светильников WebStar-105W для основного освещения механического отделения. Результаты выбора светильников для участков ремонтного цеха №2 приведены в таблице 8.

Расчёт аварийного освещения.

Аварийное освещение – это система освещения, предназначенная для обеспечения безопасности и удобства в помещениях или на открытых пространствах в случае отключения основного источника света. Оно используется в различных ситуациях, включая аварии, перебои в электроснабжении, технические работы и т.д.

Таблица 8 – Выбор светильников для участков ремонтного цеха

Участок	Ф, лм	N, шт	С ед.св, лм	Марка светильника
Механическое отделение	912496	14	5·13120	5·WebStar-105W
Кузнечное отделение	261320	4		
Сварочное отделение		4		
Электроремонтное отделение		4		

Аварийное освещение может быть выполнено в виде автономных светильников, которые работают от аккумуляторов или батарей и включаются автоматически при пропадании основного питания [13]. Также аварийное освещение может быть интегрировано в общую систему освещения и управляться автоматически или вручную.

«Аварийное освещение выбирается как не менее 5% от основного» [22].

Итого требуемая суммарная мощность аварийного освещения:

$$P_{ав} = 0,05 \cdot (105 \cdot 5 \cdot 26) = 682,5 \text{ Вт.}$$

Выбираем для аварийного освещения светильники Атлант, 70 Вт.

Требуемое число светильников аварийного освещения, по (5):

$$N_{ав} \geq \frac{682,5}{70} \approx 10 \text{ шт.}$$

Принимаем 10 светильников Атлант, 70 Вт для аварийного освещения.

Электрическая схема и план системы освещения АБК показаны на рисунке 15.



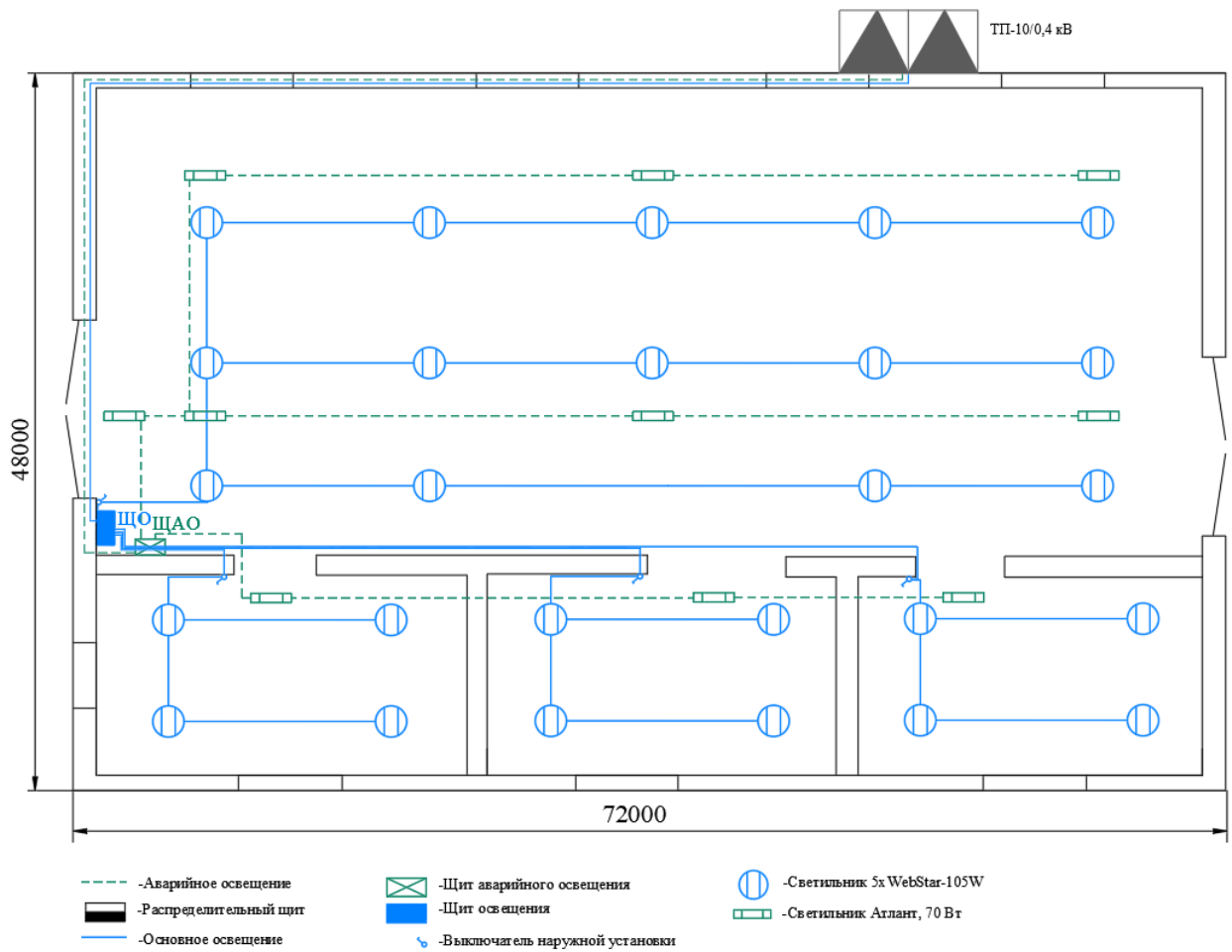


Рисунок 15 – Электрическая схема и план системы освещения РЦ

Нагрузка освещения для механического отделения, по (6):

$$P_o = (105 \cdot 5) \cdot 14 = 7350 \text{ Вт.}$$

Нагрузка освещения для кузнечного, сварочного, электроремонтного отделений, по (6):

$$P_o = (105 \cdot 5) \cdot 4 = 2100 \text{ Вт.}$$

Нагрузка освещения в целом для цеха, по (6):

$$P_o = (105 \cdot 5) \cdot (14 + 4 + 4 + 4) = 13650 \text{ Вт},$$

$$Q_o = P_o \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (8)$$

$$Q_o = 13650 \cdot 0,46 = 6279 \text{ вар.}$$

Итого суммарная нагрузка энергоэффективного освещения РЦ составит 13,65 кВт, что более чем в 2,2 раза меньше значения 31,532 кВт для действующей системы освещения. С учетом реализации интеллектуального управления на основе ПР эффект по энергосбережению будет еще существенно более значительным.

## 2.2 Адаптивная компенсация реактивной мощности

Компенсация реактивной мощности в СЭС административно-бытового корпуса.

На шинах главного распределительного щита АБК и шинах 0,4 кВ подстанции РЦ будут установлены автоматические установки серии АУКРМ, обеспечивающие автоматическую адаптивную КРМ согласно изменениям величины нагрузки и уровня РМ в сети.

Текущие актуальные средневзвешенные нагрузки АБК, без учета освещения, составляют 229,008 кВт; 148,1 квар.

С учетом нового энергоэффективного освещения расчетные нагрузки АБК составят:

$$P_{po} = 229,008 + 6,31 = 235,318 \text{ кВт},$$

$$Q_{po} = 148,1 + 6,31 \cdot 0,46 = 151,003 \text{ квар.}$$

«Требуемая мощность компенсирующих устройств (КУ):

$$Q_{к.у.} = 0.9 \cdot P_p \cdot (tg\varphi - tg\varphi_k), \quad (9)$$

где  $P_p$  – активная нагрузка, кВт;

$tg\varphi$  – тангенс угла  $\varphi$  до КРМ;

$tg\varphi_k$  – нормативное значение» [17].

$$Q_{к.у.} = 0,9 \cdot 235,318 \cdot (0,639 - 0,33) = 65,5 \text{ квар.}$$

Для КРМ принимается две установки АУКРМ-0,4-35 по 35 квар.

Расчет КРМ показан в таблице 9.

Таблица 9 – Расчет КРМ

Показатели	cosφ	tgφ	Pp, кВт	Qp, квар	Sp, кВА
Всего на НН	0,843	0,639	235,318	151,003	279,294
КУ, квар	-	-	-	70	-
Всего на НН с КРМ	0,946	0,344	235,318	81,003	248,869

После КРМ потребление реактивной мощности снизится в 1,86 раза, а потребление полной мощности – на 12 %. Очевидна высокая эффективность КРМ в плане энергосбережения.

Компенсация реактивной мощности в СЭС ремонтного цеха.

Текущие актуальные среднесменные нагрузки РЦ, без учета освещения, составляют 423,87 кВт; 314,529 квар.

С учетом нового энергоэффективного освещения расчетные нагрузки АБК составят:

$$P_{po} = 410,22 + 13,65 = 423,87 \text{ кВт,}$$

$$Q_{po} = 308,25 + 6,279 = 314,529 \text{ квар.}$$

Требуемая мощность КУ, по (9):

$$Q_{к.у.} = 0,9 \cdot 423,87 \cdot (0,742 - 0,33) = 157,19 \text{ квар.}$$

Для КРМ принимается две установки АУКРМ-0,4-80 по 80 квар [23].

Расчет КРМ показан в таблице 10.

Таблица 10 – Расчет КРМ

Показатели	cosφ	tgφ	Pp, кВт	Qp, квар	Sp, кВА
Всего на НН	0,803	0,742	423,870	314,529	527,820
КУ, квар	-	-	-	160	-
Всего на НН с КРМ	0,940	0,365	423,870	154,529	451,160

После КРМ потребление реактивной мощности снизится в 2,04 раза, а потребление полной мощности – на 17 %. Очевидна высокая эффективность КРМ в плане энергосбережения.

АУКРМ – это автоматизированная установка компенсации реактивной мощности. Она предназначена для повышения коэффициента мощности электрической системы и улучшения качества электроэнергии. АУКРМ состоит из конденсаторов, которые могут автоматически регулироваться в зависимости от нагрузки на систему. Это позволяет снизить затраты на электроэнергию и улучшить работу оборудования.

«Внешний вид АУКРМ – на рисунке 16.



Рисунок 16 – Внешний вид АУКРМ

Применение АУКРМ позволит обеспечить точный уровень КРМ при широком диапазоне изменения нагрузок, исключить перекомпенсацию РМ» [3].

### **2.3 Применение энергоэффективных силовых трансформаторов**

В ТП ремонтного цеха предлагается установить энергосберегающие силовые трансформаторы серии ТМГ35. Трансформатор масляный герметичный ТМГ35 используется для преобразования и распределения электроэнергии в сетях напряжением 10 кВ. Он предназначен для работы в условиях умеренного или холодного климата. Трансформаторы ТМГ35 используются для установки в распределительных подстанциях промышленных предприятий, коммунальных и бытовых объектов для

обеспечения надежного и качественного электроснабжения потребителей. Конструкция трансформатора включает передовые разработки в области энергосбережения.

«Требуемая мощность трансформаторов с учетом КРМ:

$$S_m \geq K_{з.н.} \cdot S_{р.к.}, \quad (10)$$

где  $K_{з.н.}$  – нормативный коэффициент загрузки;

$S_{р.к.}$  – нагрузка, кВА» [12].

$$S_m \geq 0,7 \cdot 451,16 = 315,81 \text{ кВА.}$$

Устанавливается 2хТМГ35-400 по 400 кВА.

«Коэффициент загрузки в аварийном режиме:

$$K_{з.ав.} = \frac{S_{р.к.}}{S_m}, \quad (11)$$

где  $S_m$  – номинальная мощность, кВА» [12].

$$K_{з.ав.} = \frac{451,16}{400} = 1,13 \leq 1,4.$$

«Потери мощности в силовых трансформаторах:

$$\Delta P_m = \frac{\Delta P_{\kappa}}{n} \cdot \frac{P_p^2 + Q_p^2}{S_n^2} + n \cdot \Delta P_{xx}, \quad (12)$$

где  $\Delta P_{\kappa}$  – потери КЗ, кВт;

$n$  – число трансформаторов, шт;

$\Delta P_{xx}$  – потери ХХ, кВт.

$$\Delta Q_m = \frac{U_k}{n \cdot 100} \cdot \frac{P_p^2 + Q_p^2}{S_n^2} + \frac{n \cdot I_{xx}}{100} \cdot S_n, \quad (13)$$

где  $U_k$  – напряжение КЗ, %;

$I_{xx}$  – ток XX, %» [12].

В новых энергосберегающих трансформаторах потери мощности составят, по (12,13):

$$\Delta P_m = \frac{4,6}{2} \cdot \frac{423,87^2 + 154,529^2}{400^2} + 2 \cdot 0,63 = 3,85 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_m = \frac{4,5}{2 \cdot 100} \cdot \frac{423,87^2 + 154,529^2}{400^2} + \frac{2 \cdot 0,8}{100} \cdot 400 = 14,87 \text{ квар}.$$

В действующих силовых трансформаторах потери мощности составляют 8,87 кВт и 31,42 квар. Таким образом, ожидается снижение потерь электроэнергии в силовых трансформаторах более чем в 2 раза, энергоэффективность электроснабжения будет существенно повышена.

## **2.4 Управление потребителями с помощью программируемых логических контроллеров и реле**

Программируемые логические контроллеры (ПЛК) и реле используются для управления различными процессами и устройствами на производстве, в быту и других сферах деятельности. Они позволяют автоматизировать процессы, сократить затраты на обслуживание, повысить безопасность и эффективность работы оборудования.

ПЛК являются основой систем автоматизации и управления. Они принимают данные от датчиков, обрабатывают их по заранее запрограммированным алгоритмам и выдают управляющие сигналы на

исполнительные устройства (например, электродвигатели, насосы, клапаны, нагреватели и т.д.). Это позволяет контролировать и оптимизировать работу оборудования без участия человека.

Реле используются для коммутации электрических цепей и управления различными устройствами. Они могут быть программируемыми, то есть иметь возможность настройки параметров срабатывания, времени задержки и других характеристик.

В целом, использование ПЛК и реле позволяет значительно улучшить управление потребителями, автоматизировать процессы и повысить эффективность работы оборудования.

Для управления сложными и требующими обширных и многозадачных алгоритмов управления электроприемниками предлагается использовать ПЛК марки PLR-M-CPU-26R02ADC серии ONI (IEK), отечественного производства.

Отличительные особенности данного ПЛК:

- ПЛК имеет встроенное программное обеспечение, которое позволяет программировать логику контроллера и управлять работой оборудования;
- модульная конструкция, что позволяет легко добавлять или удалять модули в зависимости от потребностей системы;
- графический интерфейс пользователя (GUI), который упрощает процесс программирования и настройки;
- высокий уровень безопасности и защиты оборудования от сбоев и ошибок;
- встроенные профили энергосбережения для разных типов оборудования и сценариев использования.

Внешний вид ПЛК марки PLR-M-CPU-26R02ADC показан на рисунке

17.



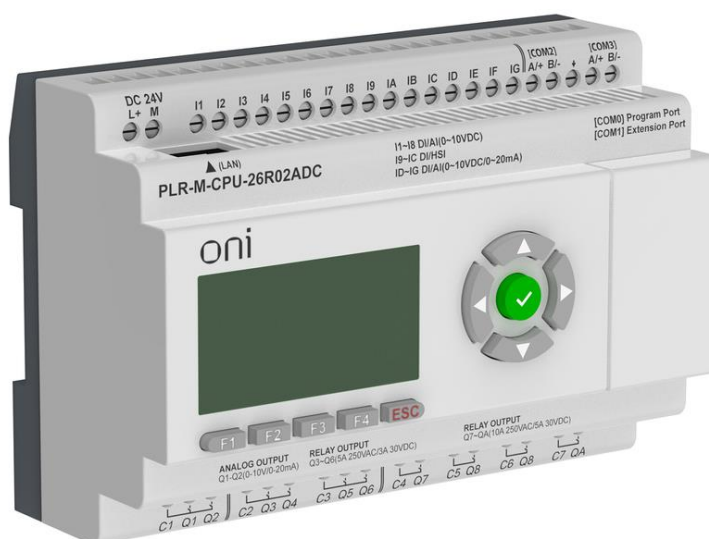


Рисунок 17 – Программируемый логический контроллер марки PLR-M-CPU-26R02ADC

Для управления более простыми электроприемниками предлагается использовать ЦПР марки PLR-S-CPU-0804T-DC-BN серии ONI (IEK), отечественного производства.

Отличительные особенности данного ЦПР:

- встроенное программное обеспечение, которое позволяет управлять работой оборудования;
- модульная конструкция, что позволяет легко добавлять или удалять модули в зависимости от потребностей системы;
- высокий уровень безопасности и защиты оборудования от сбоев и ошибок;
- встроенные профили энергосбережения для разных типов оборудования и сценариев использования.

Внешний вид ЦПР марки PLR-S-CPU-0804T-DC-BN показан на рисунке

18.



Рисунок 18 – Программируемое реле марки PLR-S-CPU-0804T-DC-BN

Согласно проведенным производителем испытаниям, встроенные профили энергосбережения для ПЛК и ЦПР обеспечивают повышение энергоэффективности на величину от 15,2 % до 71,2 % (в зависимости от характера нагрузки и сценариев ее работы) [25].

## 2.5 Технический учет электроэнергии

Выбирается оборудование АСТУЭ «Энергомера» от АО Концерн Энергомера. «Данный продукт работает на базовом специализированном ПО *sEnergO* 4.7. Отличительные особенности данной АСТУЭ:

- отечественный производитель и поставщик комплектующих;
- отечественный разработчик ПО;
- повышенная отказоустойчивость ПО;
- дополнительные возможности по программному управлению приборами учета.

Достоинства данной АСТУЭ:

- отечественный производитель и поставщик комплектующих;
- отечественный разработчик ПО;
- повышенная отказоустойчивость ПО;
- расширенные возможности ПО.
- дополнительные возможности по программному управлению приборами учета;
- относительно невысокая стоимость;
- производитель и поставщик – это крупный и известный концерн, что гарантирует отличную техническую, информационную поддержку и долгосрочное сотрудничество.

В составе АСТУЭ используется оборудование: счетчики СЕ 303, СЕ 304, ЦЭ 6850М, УСПД СЕ 805 (рисунок 19)» [25].

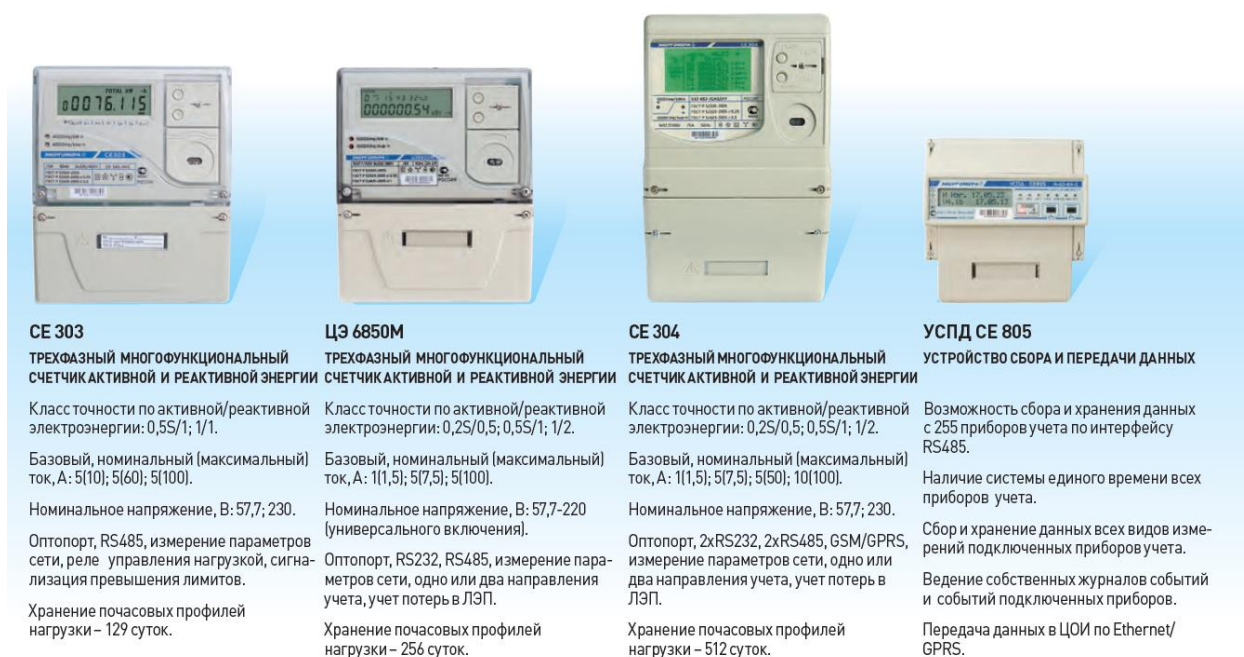


Рисунок 19 – Оборудование АСТУЭ

«Для передачи данных по силовым линиям используется *PLC*-модем *CE 832C5*. Для организации центра обработки информации (ЦОИ) используется центральный сервер предприятия.

Применение АСТУЭ позволит максимально эффективно оптимизировать электропотребление потребителей. Применение АСТУЭ позволяет также своевременно выявлять отклонения от нормативных режимов работы электроприемников, тем самым предупреждая и минимизируя аварийные ситуации и связанные с ними экономические и другие потери» [14].

Согласно практическому опыту внедрения данной АСТУЭ на промышленных предприятиях, отмечено повышение энергоэффективности на величину от 14,2 % до 36,4 % [25]. Таким образом, очевидна высокая эффективность внедрения АСТУЭ в плане энергосбережения.

## **2.6 Применение энергоэффективных электродвигателей**

Выбор электродвигателей для электроприводов в АБК.

Для систем вентиляции, водоснабжения, водоотведения и канализации требуется выбрать АД номинальной мощностью 5,5 кВт 1000 об/мин и 7,5 кВт 1500 об/мин.

Выбираем энергосберегающие АД серии *7AVER*. «Электродвигатели серии *7AVER* имеют следующие преимущества:

- специальная адаптация для применения в составе частотно-регулируемого привода;
- высокая энергоэффективность;
- повышенное значение сервис фактора (способность сохранять работоспособность при перегрузках);
- улучшенная эргономичность, сниженный уровень шума и вибрации» [25].

Внешний вид электродвигателя серии *7AVER* показан на рисунке 20.

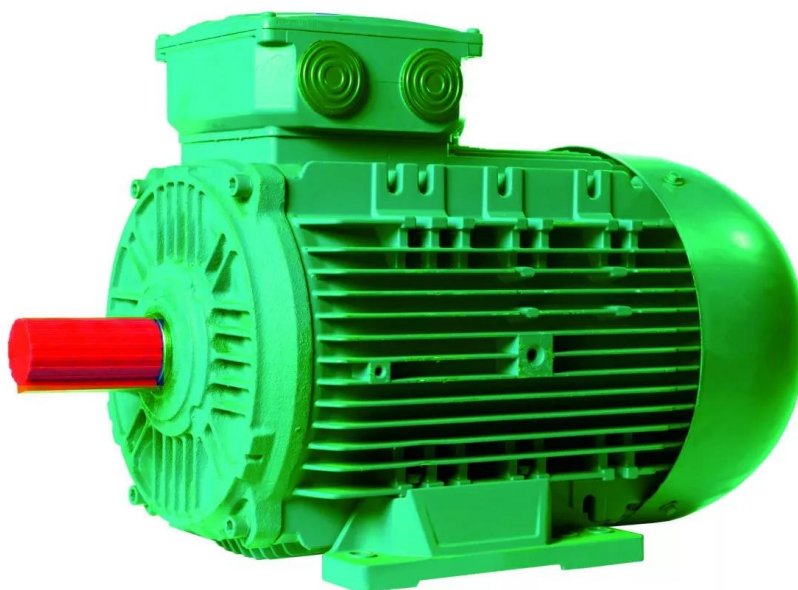


Рисунок 20 – Электродвигатель серии 7AVER

«Расшифровка полей паспортной таблички электродвигателей серии 7AVER показана на рисунке 21.

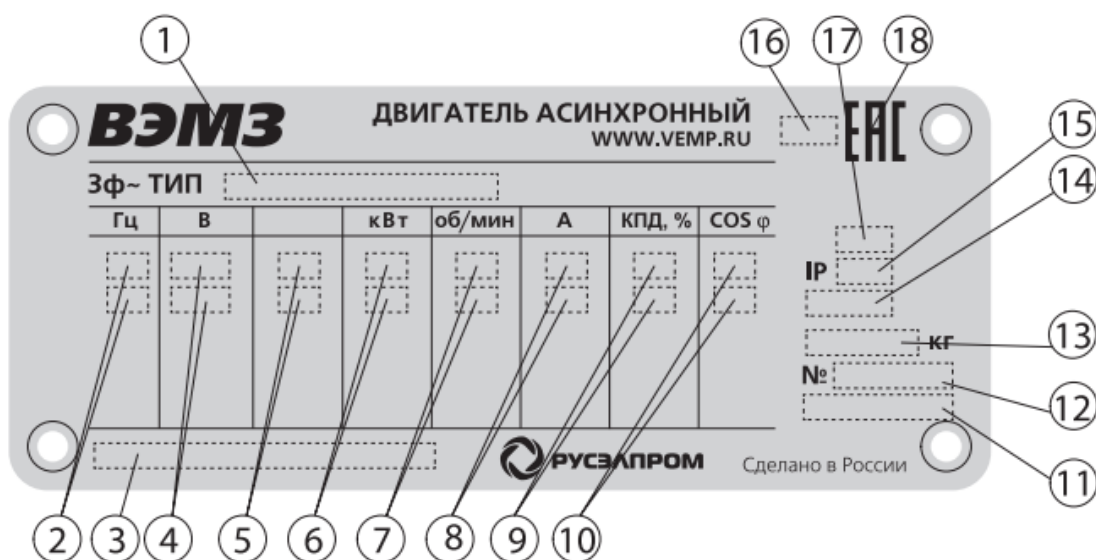


Рисунок 21 – Расшифровка полей паспортной таблички электродвигателей

На рисунке 3.2 обозначено:

- 1 - наименование типа двигателя;
- 2 - частота сети, Гц;
- 3 - обозначение нормативного документа;
- 4 - напряжение, В;
- 5 - схема соединения;
- 6 - мощность, кВт;
- 7 - частота вращения, об/мин;
- 8 - номинальный ток, А;
- 9 - КПД;
- 10 - коэффициент мощности;
- 11- дата выпуска двигателя (месяц и год);
- 12 - заводской номер двигателя;
- 13 - масса двигателя, кг;
- 14 - класс изоляции;
- 15 - степень защиты;
- 16 - класс энергоэффективности;
- 17 - режим работы двигателя;
- 18 - знак соответствия *EAC*.

Например, расшифровка обозначения для электродвигателя  
*7AVER132S6IE2*:

*7AVER* – серия;

132 – высота оси вращения, мм;

S – установочный размер;

6 – число полюсов статора;

*IE2* – высокий класс энергоэффективности, по *IEC60034*» [25].

Выбираем АД марок *7AVER132S6IE2* и *7AVER132S4IE2*, характеристики приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Характеристики АД

Параметры	7AVER132S6IE2 (вентиляция)	7AVER132S4IE2 (водоснабжение, водоотведение и канализация)
Напряжение, В	380	380
Мощность, кВт	5,5	7,5
КПД, %	85	87,5
$\cos \varphi$	0,8	0,86
Частота вращения (синхронная), об/мин	1000	1500
Степень защиты, IP	55	54
Масса, кг	63	64

Для электроприводов ремонтного цеха также выбираются специализированные энергосберегающие АД серии 7AVER. Действующие устаревшие, изношенные и неэкономичные ЭД будут заменены на современные энергоэффективные аналоги 7AVER соответствующих мощностей. Например, на электроприводе подъема мостового крана будет установлен электродвигатель 7AVER180S2IE2 номинальной мощностью 22 кВт.

## 2.7 Частотное регулирование электроприводов

Частотное регулирование электроприводов будет обеспечиваться современными транзисторными частотными преобразователями (ТрЧП).

«Функциональные схемы управления электроприводом с ТрЧП показаны на рисунке 22.

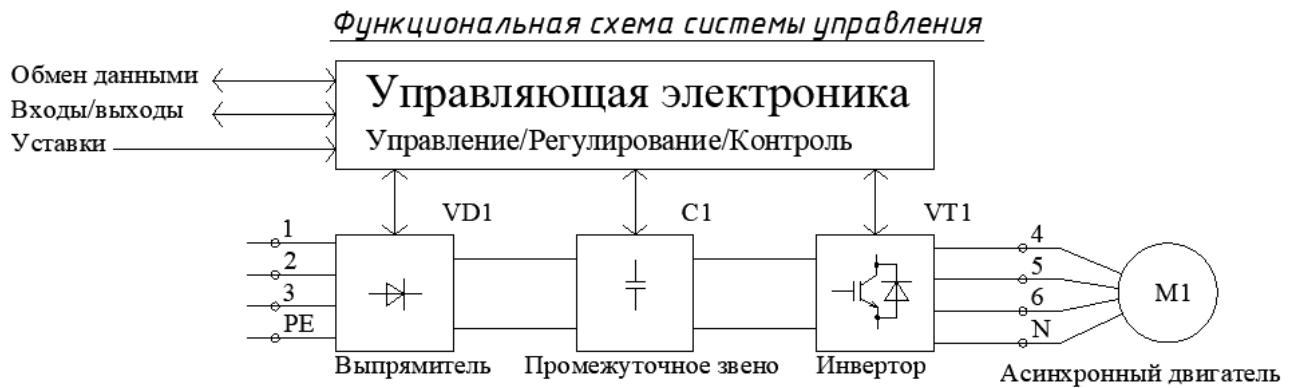


Рисунок 22 – Функциональные схемы управления электроприводом с ТрЧП

Напряжение сети подается через сглаживающий импульсы тока входной реактор на неуправляемый трехфазный выпрямитель. Далее через фильтр, сглаживающий пульсации, постоянное напряжение подается на транзисторный инвертор, где происходит генерация переменного тока с задаваемой частотой и напряжением, что обеспечивает широкий диапазон и точную регулировку частоты вращения и мощности ЭП. Через сглаживающий импульсы тока выходной реактор, переменный ток с задаваемой частотой и напряжением подается на электродвигатель. Применение частотного регулирования обеспечивает существенное повышение энергоэффективности и значительное энергосбережение. Современные ТрЧП на основе *IGBT*-



транзисторов могут быть рекомендованы для применения в электроприводах систем вентиляции и водоснабжения самых различных объектов» [24].

Выбираем современные ТрЧП серии «Веспер» отечественного производителя «Компания Веспер».

«Данные ТрЧП имеет следующие особенности:

- возможность интеграции со специализированными контроллерами;
- перегрузка по току 200%;
- 64-битная архитектура процессора;
- поиск скорости для достижения максимального КПД; 15 программируемых установок скорости;
- векторное управление с автоматической настройкой и коррекцией параметров двигателя при нагреве);
- многоязыковое программное обеспечение (*VFD-Setup*) под *Windows* для программирования и управления;
- встроенные профили энергосбережения для разных типов оборудования и сценариев использования» [25].

Внешний вид ТрЧП показан на рисунке 23.



Рисунок 23 – Внешний вид ТрЧП

Для ЭП вентиляции АБК (мощности АД 5,5 кВт) выбирается ТрЧП марки Веспер Е4-8400-007Н. Для ЭП водоснабжения, водоотведения и канализации АБК (мощности АД 7,5 кВт) выбирается ТрЧП марки Веспер Е4-8400-010Н.

Для электроприводов ремонтного цеха также выбираются ТрЧП серии «Веспер». Действующие релейно-контакторные системы управления будут заменены на современные энергоэффективные ТрЧП соответствующих мощностей. Например, на электроприводе подъема мостового крана будет установлен ТрЧП марки Веспер Е4-8400-030Н номинальной мощностью 22 кВт. Для данного электропривода (после внедрения ТрЧП в его состав) далее проводится моделирование в среде MatLab Simulink и анализ его энергетических характеристик.

## **2.8 Моделирование работы частотно-регулируемого электропривода, анализ его энергетических характеристик**

Исходные данные (характеристики электродвигателя и электропривода подъема мостового крана ремонтного цеха), после внедрения ТрЧП в его состав, для построения модели в среде Simulink приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Исходные данные для построения модели в среде Simulink

Параметры	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Частота сети	f	50	Гц
Число фаз сети	m	3	-
Ном. мощность	$P_2$	22	кВт
Фазн. напряжение	$U_{1n}$	220	В
Лин. напряжение	$U_s$	380	В
Синхр. частота вращения	$n_1$	1000	об/мин
Ном. частота вращения	$n_2$	945	об/мин

Продолжение таблицы 12

Параметры	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Число пар полюсов	$p_n$	3	-
Ном. КПД	$\eta_n$	0,87	-
Момент инерции ротора	$J_{дв}$	0,52	кг/м <sup>2</sup>
Ном. коэфф. мощности	$\cos\varphi_n$	0,84	-
Кратн. пуск. тока	$i_k$	6,5	-
Перегрузочная способность по моменту	$m_k$	3,3	-

На рисунке 24 показана используемая структурная схема АД во вращающейся системе координат с ориентацией на вектор потокосцепления ротора [21].

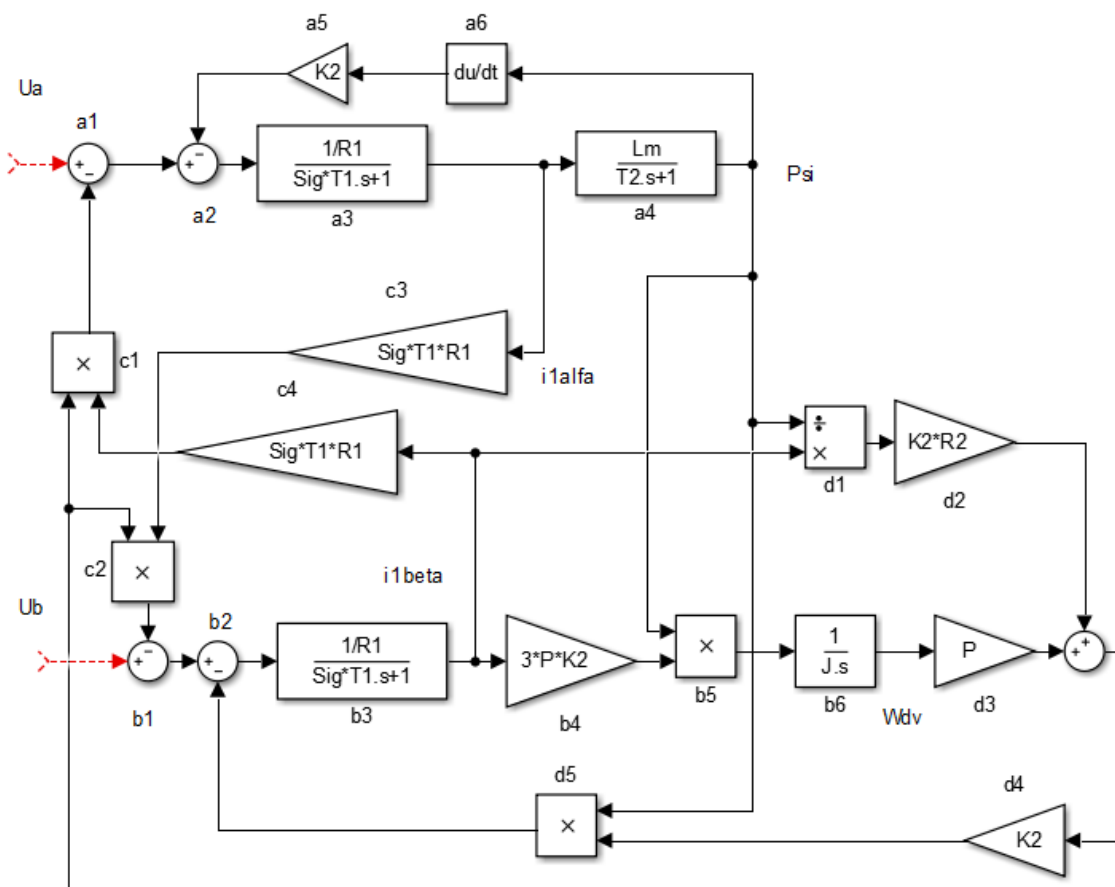


Рисунок 24 – Структурная схема АД при ориентации координат по вектору потокосцепления ротора  
Синтез регулятора контура тока.

Используется настройка на оптимум по модулю [21].

Постоянная времени регулятора:

$$T_{p-1} = \text{Sig} \cdot T_1, \quad (14)$$

$$T_{p-1} = 0,14 \cdot 0,1033 = 0,0145 \text{ с.}$$

Динамический коэффициент усиления:

$$K_{\text{рез-1}} = \frac{\text{Sig} \cdot T_1}{2 \cdot T_{\text{ПЧ}} \cdot K_{\text{ПЧ}} \cdot \frac{1}{R_1}}, \quad (15)$$

$$K_{\text{рез-1}} = \frac{0,14 \cdot 0,1033}{2 \cdot 0,0001 \cdot 220 \cdot \frac{1}{0,274}} = 0,09.$$

Структурная схема контура тока – на рисунке 25.

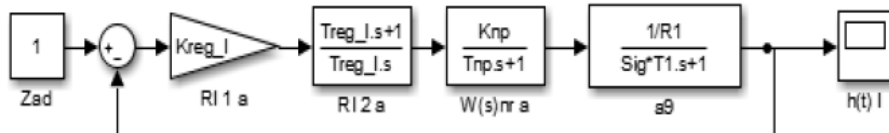


Рисунок 25 – Структурная схема контура тока

Структурная схема эквивалентного контура тока – на рисунке 26.

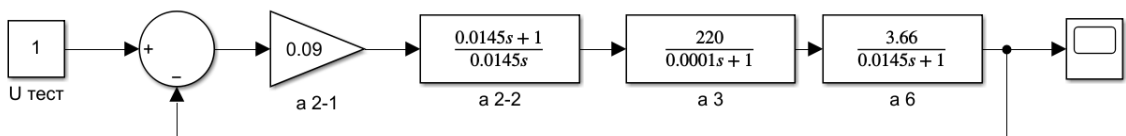


Рисунок 26 – Структурная схема эквивалентного контура тока

«Передаточная функция внутреннего контура тока – аperiodическое звено второго порядка, его можно заменить на звено первого порядка с постоянной времени, равной двум малым постоянным времени контура тока, согласно выражению:

$$W_{(S)\text{-т.экв}} = \frac{1}{2 \cdot T_{ПЧ} \cdot s + 1}, \quad (16)$$

где  $W_{(S)\text{-т.экв}}$  – передаточная функция;

$s$  – безразмерная величина для построения модели.

Переходная функция контура тока показана на рисунке 27.

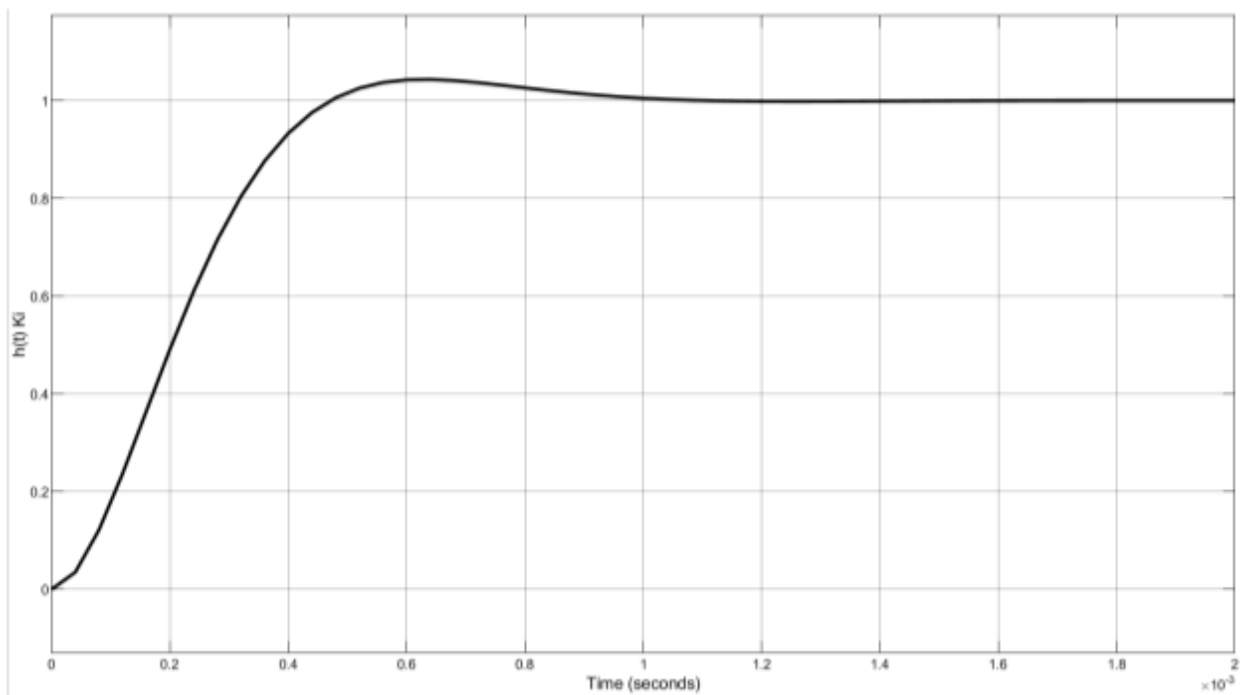


Рисунок 27 – Переходная функция контура тока

Анализ переходной функции контура тока показывает его точную настройку на оптимум по модулю.

Синтез регулятора контура момента.

Контур момента является внутренним по отношению к внешнему контуру скорости и внешним по отношению к контуру тока, контур момента необходимо настраивать на оптимум по модулю» [21].

На рисунке 28 изображена общая типовая структурная схема контура момента.

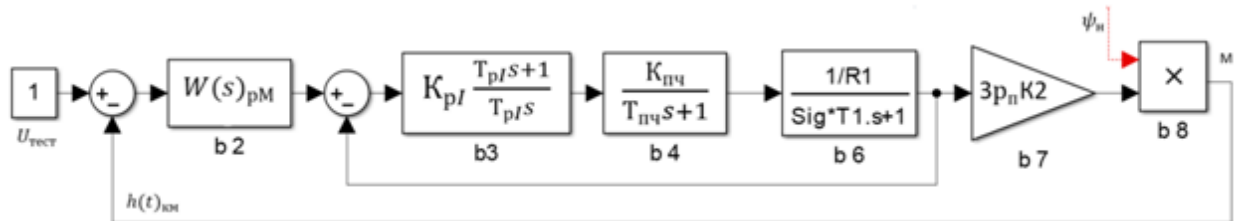


Рисунок 28 – Структурная схема контура момента

На рисунке 29 – упрощённая структурная схема контура момента.

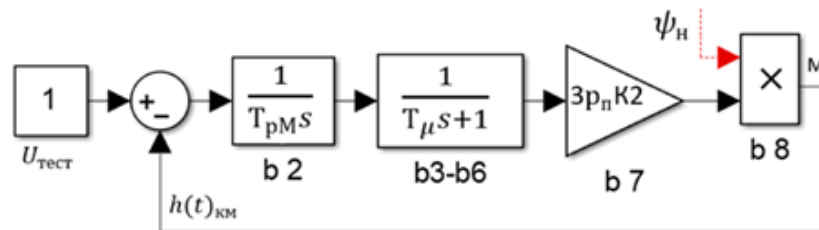


Рисунок 29 – Упрощённая структурная схема контура момента

Постоянная времени регулятора:

$$T_{p-M} = 2 \cdot T_{\mu} \cdot 3 \cdot p_n \cdot K_2 \cdot \psi_n, \quad (17)$$

где  $T_{p-M}$  – постоянная времени регулятора, с;

$T_{\mu} = 2 \cdot T_{пч}$  – передаточная функция аperiodического звена.

$$T_{p-M} = 2 \cdot 0,0002 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 0,927 \cdot 0,877 = 0,00293 \text{ с.}$$

Схемы реального рассчитанного контура момента – на рисунке 30:  
 а) упрощённая, б) реальная.

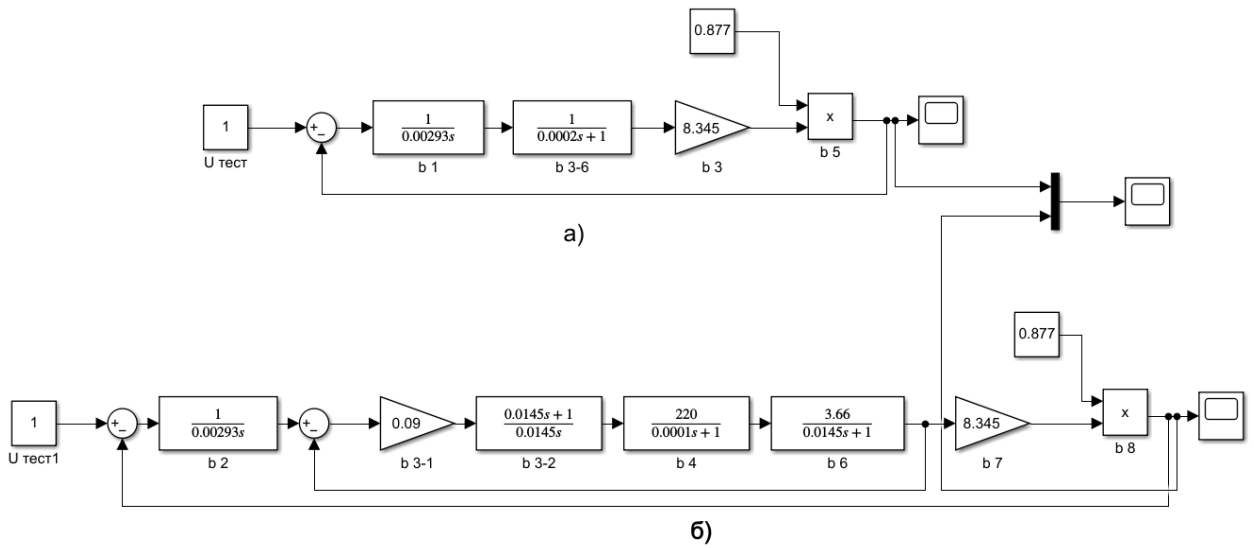


Рисунок 30 – Схемы рассчитанного контура момента

Для сравнения переходных функций, упрощённого и реального контуров момента их графики – на рисунке 31.

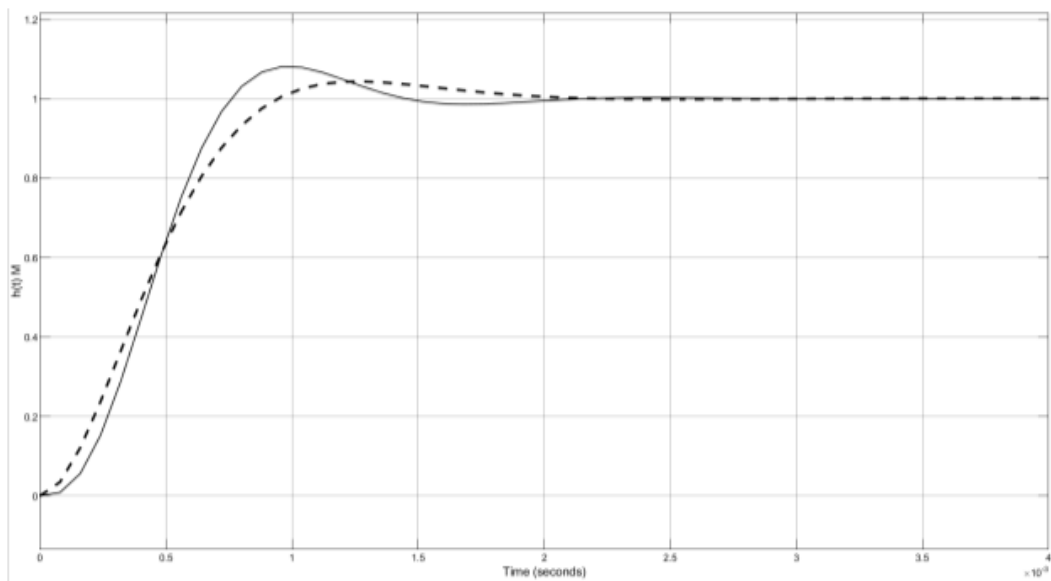


Рисунок 31 – Графики переходных функций контура момента: реального – сплошная линия, упрощённого – штриховая линия

Переходные функции отличаются незначительно, что показывает правильность проведённых расчётов и принятых параметров структурной схемы контура момента.

Синтез регулятора контура скорости.

Внутренний контур момента заменяется на апериодическое звено первого порядка с постоянной времени  $T_{\mu} = 2 \cdot T_{ПЧ}$ . В качестве регулятора следует использовать пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор [21].

Динамический коэффициент усиления:

$$K_{p\omega} = \frac{\sum J}{2 \cdot (4 \cdot T_{ПЧ}) \cdot K_{Д\omega}}, \quad (18)$$

где  $K_{p\omega}$  – динамический коэффициент усиления;

$\sum J$  – суммарный момент инерции, кг·м<sup>2</sup>.

$$\sum J = J' + J_{\text{дв}}, \quad (19)$$

где  $J_{\text{дв}}$  – момент инерции ротора для двигателя, кг·м<sup>2</sup> [9].

$$\sum J = 0,4086 + 0,52 = 0,9286 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$K_{p\omega} = \frac{0,9286}{2 \cdot (4 \cdot 0,0001) \cdot 1} = 1161.$$

Постоянная времени регулятора:

$$T_{p\omega} = 4 \cdot (4 \cdot T_{ПЧ}), \quad (20)$$

$$T_{p\omega} = 0,0016 \text{ с.}$$

«Структурная схема контура скорости – на рисунке 32.



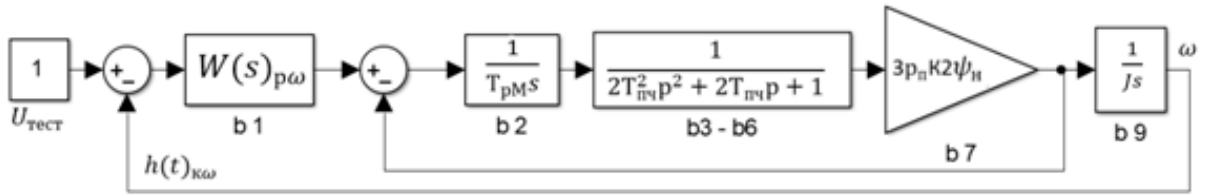


Рисунок 32 – Структурная схема контура скорости

Структурная схема упрощённого контура скорости – на рисунке 33.

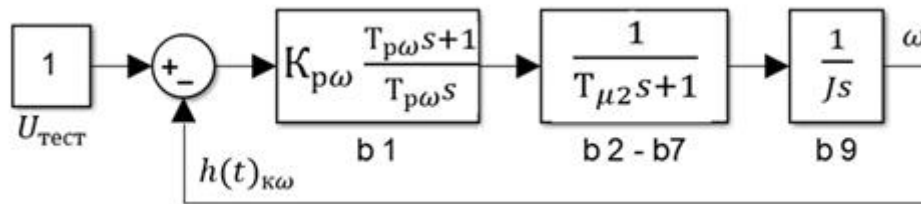


Рисунок 33 – Структурная схема упрощённого контура скорости

Структурные схемы контура скорости с рассчитанными параметрами: – на рисунке 34: а) упрощённая, б) реальная.

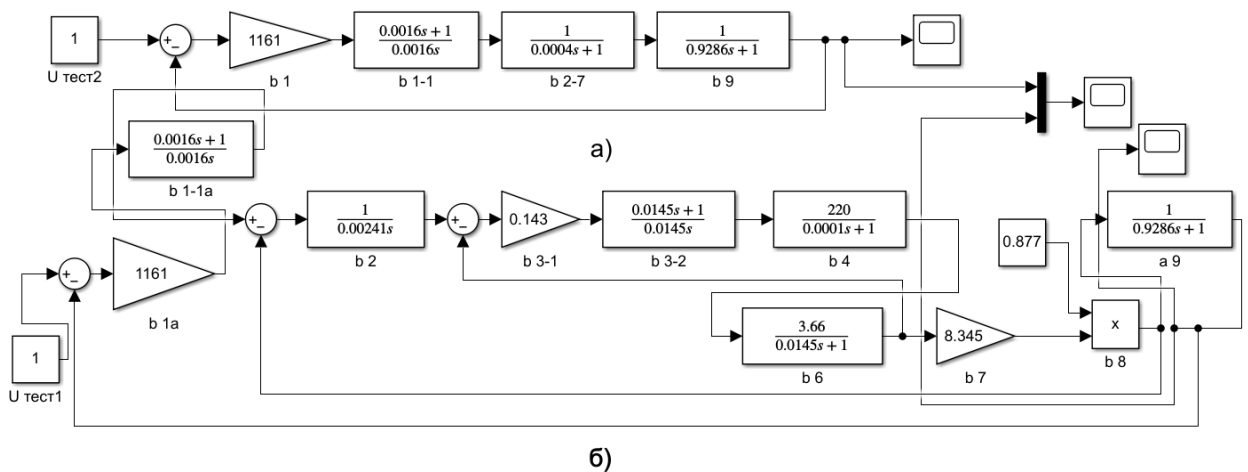


Рисунок 34 – Структурные схемы реального контура скорости с рассчитанными параметрами

Графики переходных функций показаны на рисунке 35.

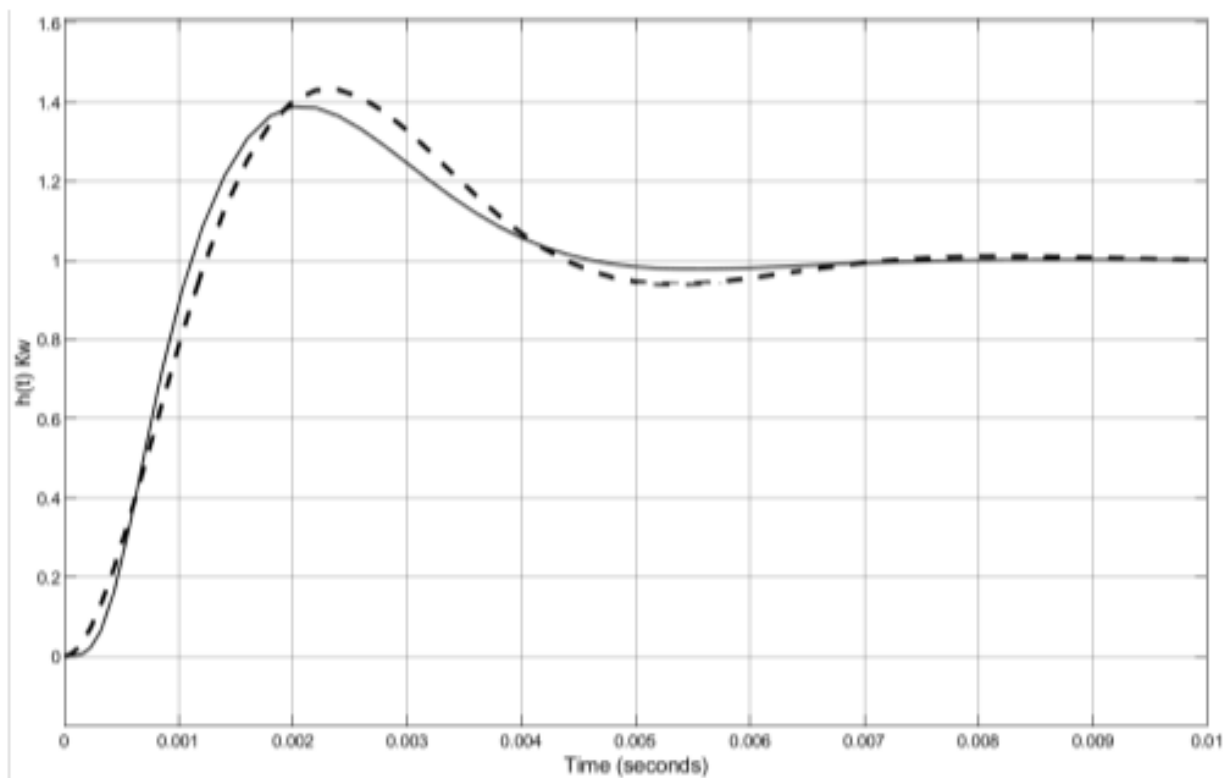


Рисунок 35 – Графики переходных функций контура скорости: сплошная линия – реального контура, штриховая линия – упрощённого контура» [21]

Графики переходных функций отличаются незначительно, что показывает правильность проведённых расчётов и принятых параметров структурной схемы контура скорости. На основании полученных данных строится структурная схема ЭП после внедрения частотного преобразователя (рисунок 36).

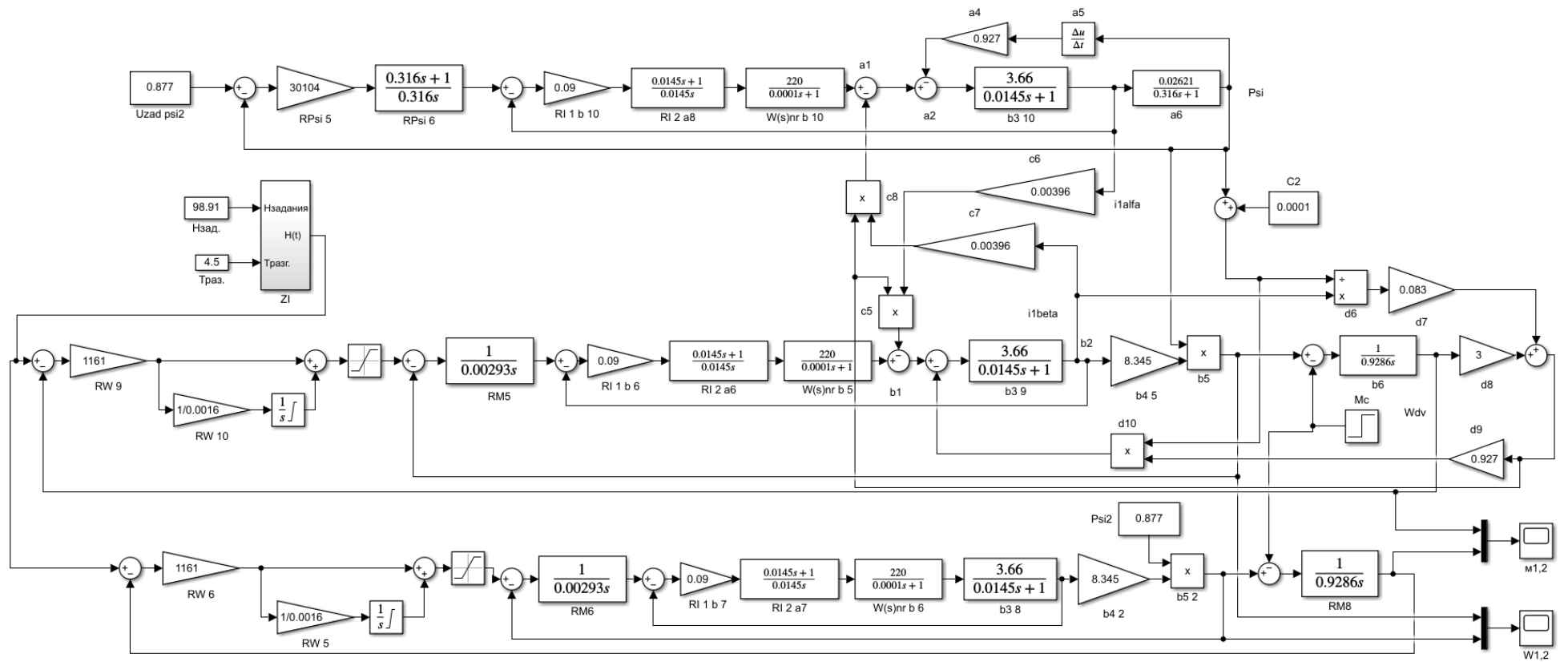


Рисунок 36 – Модель энергосберегающего электропривода с частотным регулированием

Согласно полученной структурной схеме асинхронного электропривода проводится моделирование работы электропривода.

Результаты моделирования (график скорости) по структурной схеме показаны на рисунке 37.

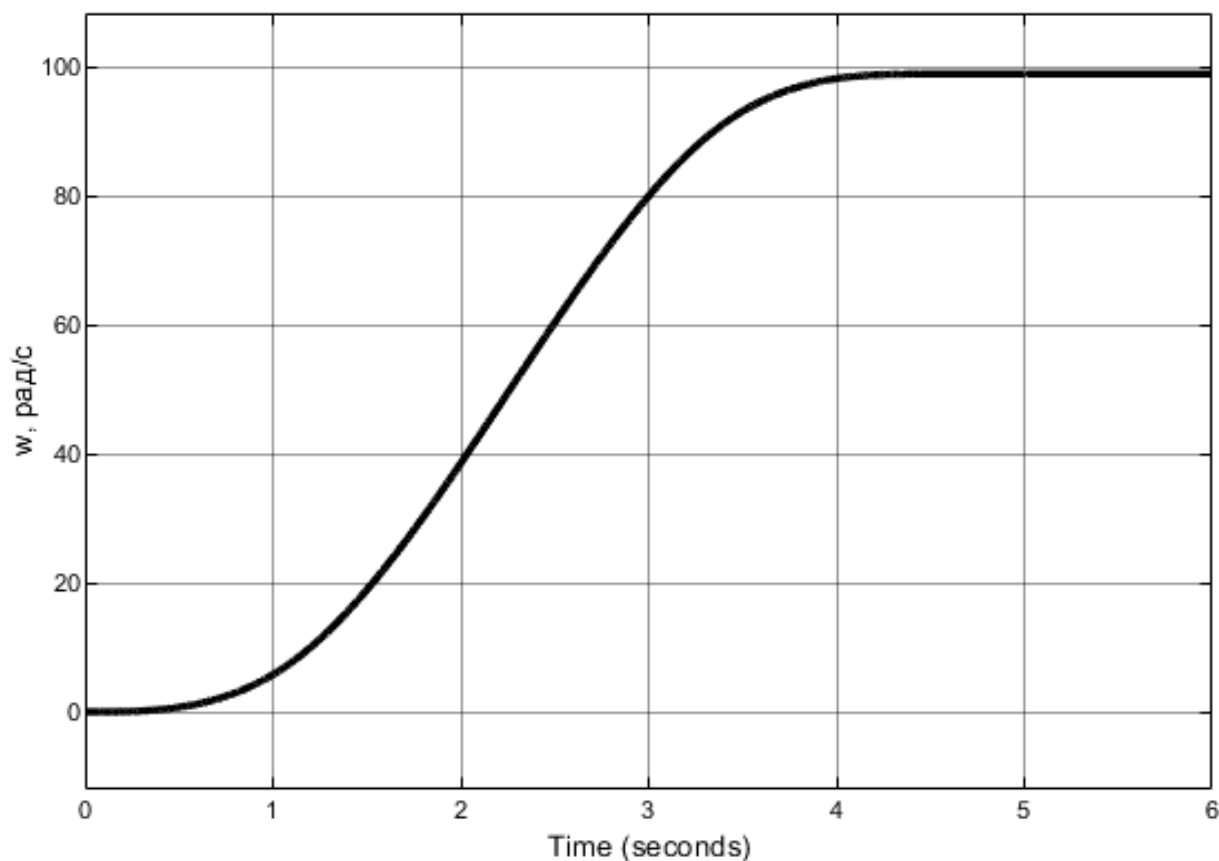


Рисунок 37 – График скорости электропривода

Электропривод выходит на заданную скорость за заданное время, что подтверждает правильность выбора параметров структурной схемы. S-образный задатчик интенсивности обеспечивает плавный разгон электропривода и снижение механических нагрузок на силовые элементы, а также оптимальное потребление энергии при изменении нагрузки.

Результаты моделирования (график момента) показаны на рисунке 38.

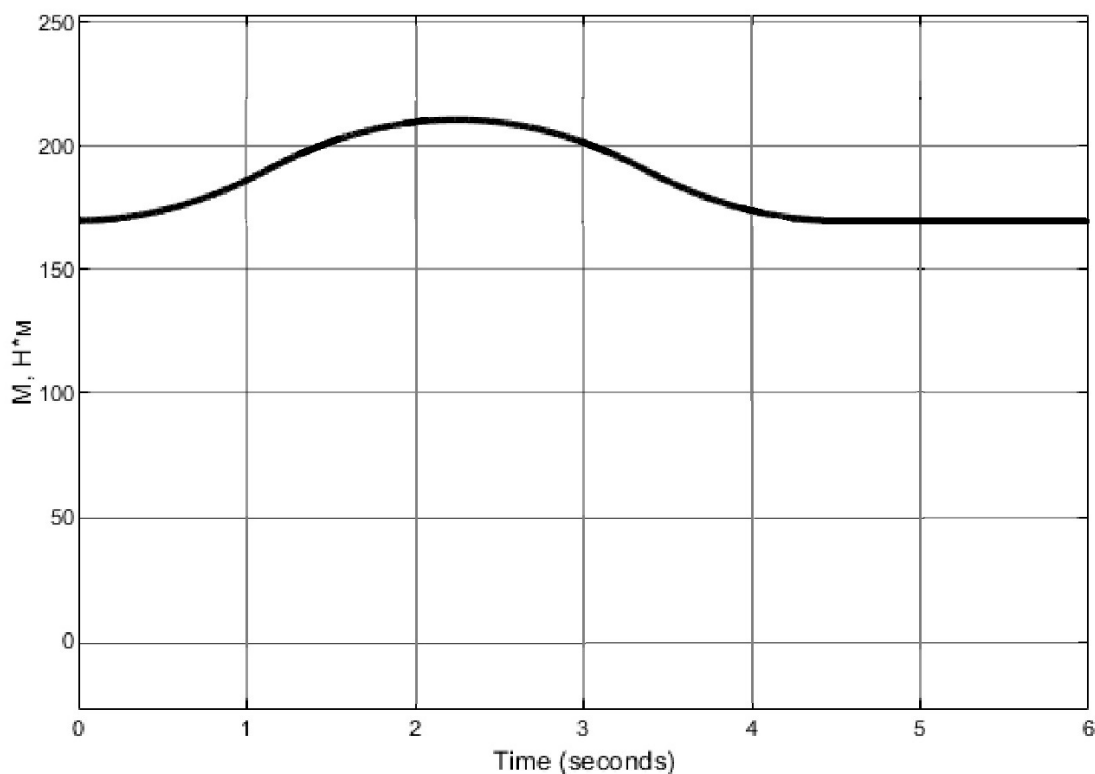


Рисунок 38 – График развиваемого двигателем момента

Кратковременный выброс на графике момента объясняется ступенчатым характером изменения момента сопротивления от нуля до значения, соответствующего номинальному значению момента двигателя. Развиваемый электродвигателем момент изменяется плавно точно в соответствии с изменением скорости электропривода и величины его нагрузки, таким образом, частотное регулирование минимизирует общие потери энергии при работе и обеспечивает высокую энергоэффективность.

#### Выводы.

Проведена разработка комплекса мероприятий по энергосбережению в системе электроснабжения, выполнен анализ их эффективности. Суммарная нагрузка энергоэффективного освещения АБК составит 6,31 кВт, что более чем в 2,5 раза меньше значения 16,221 кВт для действующей системы освещения. Суммарная нагрузка энергоэффективного освещения РЦ составит 13,65 кВт, что более чем в 2,2 раза меньше значения 31,532 кВт для

действующей системы освещения. С учетом реализации интеллектуального управления на основе ПР эффект по энергосбережению будет еще существенно более значительным. После КРМ потребление реактивной мощности для АБК снизится в 1,86 раза, а потребление полной мощности – на 12 %. После КРМ потребление реактивной мощности для РЦ снизится в 2,04 раза, а потребление полной мощности – на 17 %. Очевидна высокая эффективность КРМ в плане энергосбережения. В ТП ремонтного цеха предлагается установить энергосберегающие силовые трансформаторы серии ТМГ35. В действующих силовых трансформаторах потери мощности составляют 8,87 кВт и 31,42 квар, а после замены трансформаторов потери составят 3,85 кВт и 14,87 квар. Таким образом, ожидается снижение потерь электроэнергии в силовых трансформаторах более чем в 2 раза, энергоэффективность электроснабжения РЦ будет существенно повышена. Реализация современной АСТУЭ, использование программируемых реле, энергоэффективных электроприводов и частотных преобразователей также существенно повысят общую энергоэффективность предприятия. Моделирование работы электропривода с ПЧ показывает его высокую эффективность в плане энергосбережения, будет обеспечен плавный разгон электропривода и снижение механических нагрузок на силовые элементы, а также оптимальное потребление энергии при изменении нагрузки. Потребление реактивной мощности значительно снизится, а общий коэффициент мощности электрической сети приблизится к нормативному значению 0,95.

Таким образом, выбрано современное оборудование и технические решения для повышения энергоэффективности в системе электроснабжения предприятия. Это значительно снизит экономические и трудовые затраты на эксплуатацию, повысит общую прибыльность предприятия, снизит негативные экологические выбросы, уменьшит нагрузку на питающую энергосистему и увеличит в ней величину резервной мощности.

### 3 Анализ экономической эффективности предлагаемых мероприятий по энергосбережению

#### 3.1 Расчет сметной стоимости проекта

«Для оценки экономической эффективности предлагаемых мероприятий, в первую очередь, необходимо выполнить расчет сметной стоимости проекта.

Суммарная стоимость электрооборудования (ЭО) каждого типа:

$$C = C_{\text{ед}} \cdot n, \quad (21)$$

где  $C_{\text{ед}}$  – стоимость единицы ЭО, тыс.руб.;

$n$  – число единиц ЭО, шт (м)» [18].

Например, цена ТМГ35-400 составляет 312,5 тыс. руб. [25]. Стоимость данного типа ЭО:

$$C = 312,5 \cdot 2 = 625 \text{ тыс. руб.}$$

Стоимость всего ЭО:

$$\sum C = C_1 + C_2 + \dots C_i, \quad (22)$$

$$\sum C = 625 + 105,4 + \dots 305,6 = 8104,24 \text{ тыс. руб.}$$

«Дополнительные расходы рассчитываются исходя из суммарной сметной стоимости ЭО, например, транспортные расходы (5% от стоимости ЭО)» [18]:

$$C_{\text{тр}} = 0,05 \cdot \sum C, \quad (23)$$

$$C_{mp} = 0,05 \cdot 8104,24 = 405,21 \text{ тыс. руб.}$$

Расчеты сведены в таблице 13.

Таблица 13 – Определение сметной стоимости проекта

Оборудование	кол-во, шт (м)	Цена, тыс. руб.	∑ стоимость, тыс. руб.
ТМГ35-400	2	312,5	625,00
АУКРМ-0,4-35	2	52,7	105,40
АУКРМ-0,4-80	2	84,36	168,72
7AVER132S8IE2	1	27,22	27,22
7AVER132S6IE2	2	25,2	50,40
7AVER132S4IE2	21	26,46	555,66
7AVER180S2IE2	1	57,84	57,84
7AVER132S6IE2	12	35,64	427,68
Веспер E3-8100B-010H	6	35,7	214,20
Веспер E4-8400-030H	1	106,6	106,60
Веспер E4-8400-007H	8	39	312,00
Веспер E4-8400-010H	10	47,8	478,00
PLR-M-CPU-26R02ADC	19	56,96	1082,24
PLR-S-CPU-0804T-DC-BN	52	21,54	1120,08
WebStar-105W	130	12,75	1657,50
СВО 20 Вт	49	6,68	327,32
СВО 40 Вт	25	7,51	187,75
СВО 80 Вт	22	9,25	203,50
Вартон-6 Вт	29	0,61	17,69
ССП-458	9	5,36	48,24



Продолжение таблицы 13

Оборудование	кол-во, шт (м)	Цена, тыс. руб.	∑ стоимость, тыс. руб.
Атлант, 70 Вт	10	2,56	25,60
комплект АСТУЭ «Энергомера»	1	305,6	305,60
Итого стоимость оборудования (СО)			8104,24
Стоимость тары и упаковки (6% от СО)			486,25
Транспортные расходы (5% от СО)			405,21
Складские расходы (0,5% от СО)			40,52
Стоимость строительно-монтажных работ (20 % от СО)			1620,85
Сметная прибыль 20%			3241,70
Всего			13898,77

Всего расчетные капиталовложения в проект, с учетом всех дополнительных затрат, составили 13898,77 тыс. руб.

### 3.2 Ожидаемые экономический эффект и срок окупаемости

Ожидаемый экономический эффект и срок окупаемости являются важными показателями для любого инвестиционного проекта. Они позволяют оценить потенциальную прибыль, которую проект может принести, а также определить, когда инвестиции начнут окупаться. Срок окупаемости – это период времени, за который инвестиции в проект полностью окупятся за счет полученной прибыли. Он рассчитывается как отношение суммы инвестиций к среднегодовой прибыли от проекта. Ожидаемый экономический эффект – это разница между доходами и расходами проекта. Он может быть выражен в виде чистой прибыли, рентабельности инвестиций или других показателей. Таким образом, ожидаемый экономический эффект и срок окупаемости позволяют

инвесторам оценить потенциальную прибыльность проекта и принять решение о его реализации. Важно учитывать, что эти показатели могут изменяться в зависимости от рыночных условий, конкуренции и других факторов, поэтому необходимо проводить постоянный мониторинг и анализ проекта.

Согласно данным проведенного на предприятии энергоаудита, дополнительные расходы на эксплуатацию действующего электроснабжения рассматриваемых объектов вследствие недостаточной энергоэффективности составляют, в среднем, 4725,23 тыс.руб./год (без учета амортизационных отчислений). Амортизационные отчисления для действующего заменяемого ЭО составляют 1425,62 тыс. руб./год.

«Расчет амортизационных отчислений (АО) для заменяемого ЭО производится по нормам в зависимости от типа:

$$O_{ам} = n_{ам} \cdot C_{о.ф.}, \quad (24)$$

где  $n_{ам}$  – норма АО, %;

$C_{о.ф.}$  – суммарная стоимость ЭО данного типа, тыс. руб.» [18].

$$O_{ам} = 0,07 \cdot 13898,77 = 972,91 \text{ тыс. руб./год.}$$

«Снижение АО после реализации проекта составит:

$$\Delta O_{ам} = O_{ам1} - O_{ам}, \quad (25)$$

где  $O_{ам1}$  – АО для действующего заменяемого ЭО, тыс. руб./год» [18].

$$\Delta O_{ам} = 1425,62 - 972,91 = 452,71 \text{ тыс. руб./год.}$$

«Прогнозируемый приблизительный срок окупаемости:

$$T_{ок} = \frac{\sum C_{см}}{P_{доп} + \Delta O_{ам}}, \quad (26)$$

где  $\sum C_{см}$  – сметная стоимость проекта, тыс. руб.;

$P_{доп}$  – дополнительные расходы на эксплуатацию действующей СЭС ввиду недостаточной энергоэффективности (без учета АО), тыс.руб./год;

$\Delta O_{ам}$  – снижение АО после реконструкции, тыс.руб./год.

Ожидаемый экономический эффект» [18]:

$$\mathcal{E} = P_{доп} + \Delta O_{ам}, \quad (27)$$

$$T_{ок} = \frac{13898,77}{4725,23 + 452,71} \approx 2,68 \text{ года,}$$

$$\mathcal{E} = 4725,23 + 452,71 = 5177,94 \text{ тыс. руб./год.}$$

Выводы.

Выполнен анализ экономической эффективности предлагаемых мероприятий по энергосбережению. Определены ожидаемый экономический эффект и срок окупаемости, которые являются важными показателями для любого инвестиционного проекта. Предполагается, что проект реализации предлагаемых мероприятий по энергосбережению в системе электроснабжения ООО «ЦОП «Сибирь», г. Нижневартовск окупится в течение приблизительно 2,68 года и далее начнет приносить чистую прибыль. Данный показатель ввиду малого расчетного срока окупаемости указывает на высокую экономическую эффективность предлагаемых мероприятий, и они планируются к реализации в ближайшее время.

## Заключение

Выполнена разработка и проведен анализ мероприятий по энергосбережению в системе электроснабжения ООО «ЦОП «Сибирь», г. Нижневартовск.

По результатам анализа источников информации и приведенных в них теоретических вопросов обеспечения энергосбережения, сделан вывод, что энергосбережение является важным аспектом современной экономики и экологии. Оно включает в себя множество различных мер, таких как использование энергоэффективных технологий, оптимизация режимов работы оборудования, повышение эффективности использования энергии и другие. Современные авторы-исследователи отмечают значительное число способов энергосбережения на промышленных предприятиях, позволяющих значительно снизить потери электроэнергии и мощности. Рассмотрены и проанализированы современные способы обеспечения энергосбережения в системах электроснабжения и электрических сетях промышленных предприятий. Проведен анализ системы электроснабжения предприятия и возможных мероприятий по энергосбережению, систематизированы исходные данные для разработки мероприятий по энергосбережению.

Выбрано современное оборудование и технические решения для повышения энергоэффективности. Моделирование работы электропривода с ПЧ показывает его высокую эффективность в плане энергосбережения.

По результатам анализа технико-эксплуатационной документации по административно-бытовому корпусу и ремонтному цеху, а также технико-эксплуатационной документации по действующим системам электроснабжения данных объектов, можно предложить мероприятия по энергосбережению:

- реализовать адаптивную компенсацию реактивной мощности на шинах главного распределительного щита (ГРЩ) АБК с помощью автоматических установок АУКРМ;

- светильники с галогеновыми лампами накаливания, лампами ДРЛ и люминесцентными лампами заменить на светодиодные;
- реализовать интеллектуальную автоматическую систему управления освещением;
- в цеховой ТП реализовать адаптивную компенсацию реактивной мощности на шинах 0,4 кВ с помощью автоматических установок АУКРМ, установить энергосберегающие силовые трансформаторы серии ТМГ35;
- обеспечить эффективное управление потребителями с помощью программируемых логических контроллеров и реле;
- обеспечить эффективный технический учет электроэнергии путем реализации АСТУЭ;
- в мощных электроприводах, работающих продолжительное время, заменить электродвигатели на энергоэффективные, специализированной серии 7AVER и обеспечить питание от частотных преобразователей соответствующей номинальной мощности; при этом комплексное применение энергосберегающих технологий в данных электроприводах, работающих продолжительное время, окажет значительный эффект экономии электроэнергии и денежных средств.

Общая нагрузка предлагаемого энергоэффективного освещения АБК составит 6,31 кВт, что более чем в 2,5 раза меньше значения 16,221 кВт для действующей системы освещения. Нагрузка предлагаемого энергоэффективного освещения РЦ составит 13,65 кВт, что более чем в 2,2 раза меньше значения 31,532 кВт для действующей системы освещения. С учетом реализации интеллектуального управления на основе ПР и программируемых логических контроллеров, эффект по энергосбережению будет еще существенно более значительным. После КРМ потребление реактивной мощности для АБК снизится в 1,86 раза, а потребление полной мощности – на 12 %. После КРМ потребление реактивной мощности для РЦ

снизится в 2,04 раза, а потребление полной мощности – на 17 %. Очевидна высокая эффективность КРМ в плане энергосбережения. В ТП ремонтного цеха предлагается установить энергосберегающие силовые трансформаторы серии ТМГ35. В действующих силовых трансформаторах потери мощности составляют 8,87 кВт и 31,42 квар, а после замены трансформаторов потери составят 3,85 кВт и 14,87 квар. Таким образом, ожидается снижение потерь электроэнергии в силовых трансформаторах более чем в 2 раза, энергоэффективность электроснабжения РЦ будет существенно повышена. Реализация современной АСТУЭ, использование программируемых реле, энергоэффективных электроприводов и частотных преобразователей также существенно повысят общую энергоэффективность предприятия. Моделирование работы электропривода с ПЧ показывает его высокую эффективность в плане энергосбережения, будет обеспечен плавный разгон электропривода и снижение механических нагрузок на силовые элементы, а также оптимальное потребление энергии при изменении нагрузки. Потребление реактивной мощности значительно снизится, а общий коэффициент мощности электрической сети приблизится к нормативному значению 0,95.

Проведен анализ экономической эффективности предлагаемых мероприятий. Рассчитаны ожидаемый экономический эффект и срок окупаемости, определено, что проект реализации предлагаемых мероприятий по энергосбережению окупится в течение приблизительно 2,68 года и далее начнет приносить чистую прибыль. Данный показатель ввиду малого расчетного срока окупаемости указывает на высокую экономическую эффективность предлагаемых мероприятий, и они планируются к реализации и одобрены руководством предприятия.

## Список используемых источников

1. Абдразаков Ф.К. Современные концепции энергосбережения. Саратов : Вавиловский университет, 2023. 72 с.
2. Ануфриев В.П. Устойчивое развитие. Энергоэффективность. Зеленая экономика : монография. М. : ИНФРА-М, 2023. 201 с.
3. Аполлонский С.М. Энергосберегающие технологии в энергетике. Том 1. Энергосбережение в энергетике. СПб : Лань, 2023. 436 с.
4. Аполлонский С.М. Энергосберегающие технологии в энергетике. Том 2. Инновационные технологии энергосбережения и энергоменеджмент. СПб : Лань, 2023. 320 с.
5. Велькин В.И. Возобновляемая энергетика и энергосбережение : учебник. М. : ФЛИНТА : Изд-во Урал. ун-та, 2022. 312 с.
6. Голов Р.С. Управление энергосбережением на промышленном предприятии : монография. М. : Дашков и К, 2023. 458 с.
7. Горбунов А.А. Вопросы энергосбережения в светотехнике : учебное пособие. Саранск : МГУ им. Н.П. Огарева, 2022. 88 с.
8. Грунтович Н.В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2023. 271 с.
9. Кобозев В.А. Электрические машины : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 480 с.
10. Котомкин В.Н. Энергоменеджмент. Энергосбережение в зданиях. СПб : Лань, 2024. 376 с.
11. Куксин А.В. Электроснабжение промышленных предприятий : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.
12. Немировский А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2023. 176 с.
13. Правила устройства электроустановок: действующие разделы 6-го и 7-го изданий. М. : ИНФРА-М, 2023. 832 с.

14. Павлова З. Х. Энергосбережение в электротехнических комплексах : учебное пособие. Уфа : УГНТУ, 2023. 72 с.
15. Ручкина Г.Ф. Энергоснабжение и энергоэффективность: актуальные проблемы правового регулирования : монография. М. : ИНФРА-М, 2022. 201 с.
16. Сибикин Ю.Д. Технология энергосбережения : учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 336 с.
17. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение : учебное пособие. – 2-е изд., стер. М. : ИНФРА-М, 2023. 328 с.
18. Ушакова Е. О. Экономика : учебное пособие. Новосибирск : СГУГиТ, 2022. 64 с.
19. Федоськина Л.А. Повышение энергоэффективности промышленных предприятий на основе формирования системы энергоменеджмента : монография. М. : ИНФРА-М, 2022. 192 с.
20. Филин Ю.И. Энергосбережение и энергоаудит : учебно-методическое пособие. Брянск : Брянский ГАУ, 2023. 54 с.
21. Фурсов В.Б. Моделирование электропривода : учебное пособие. СГ : Лань, 2022. 220 с.
22. Шеховцов В.П. Осветительные установки промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2022. 158 с.
23. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению : учебное пособие. – 3-е изд. М. : ИНФРА-М, 2023. 136 с.
24. Энергосбережение. Информационный портал. [Электронный ресурс]. – <http://energo-save.ru/> (дата обращения: 21.03.2024).
25. ЭТМ компания. Каталог товаров. [Электронный ресурс]. – <https://www.etm.ru/> (дата обращения: 21.03.2024).
26. Biegelmeier G. Electro supply system. – Bulletin. Int. Sek, 2023. 428 p.
27. Dalziel C.F., Lee W. Electricity and power supply – IEEE Spectrum, 2022, №2. p. 44-50.



28. Discussion on construction of green power grid enterprises. Zhang Hong; Guiyang Power Supply Bureau. 2021-08. P 87–91.
29. K. A. Khomiakov. Improving the accuracy of calculations of electrical loads for industrial enterprises. Journal of Physics, 06 October 2021.
30. Vlasyuk, I.V. The influence of reactive power compensation on energy saving by agricultural enterprises. AGRIS, 2023, P 40–46.