На правах рукописи

Соколовский Михаил Александрович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор **Климаш Владимир Степанович**

Официальные оппоненты:
Зюзев Анатолий Михайлович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», профессор;

Скорик Виталий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», кафедра «Электротехника, электроника и электромеханика», заведующий кафедрой.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Защита состоится 11.02.2022 г. в 10 час. 00 мин.
на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.086.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет»

по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «КнАГУ», корпус 3, аудитория 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «КнАГУ» и на официальном веб-сайте http://sovet.knastu.ru/diss_defense/.

Автореферат разослан «____»_____2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Гудим Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Тема диссертационной работы направлена на повышение эффективности энергопотребления комплексом технологического оборудования горноперерабатывающего предприятия. Она согласуется с общей направленностью в электротехнике и соответствует государственным и отраслевым программам.

Наличие сложного энергоемкого технологического оборудования, высокая степень автоматизации и непрерывность производственных процессов, характерны для всех современных горноперерабатывающих предприятий. Большое количество частотно-регулируемых электроприводов на основе автономного инвертора напряжения задействованы в комплексах технологических процессов, объединенных общей автоматизированной системой управления. К недостаткам существующего комплекса технологического оборудования предприятия, следует отнести низкую энергетическую и экономическую эффективность.

К снижению энергетической эффективности приводят потери электрической энергии в частотно-регулируемых электроприводах при динамическом торможении электрических машин и значительное искажение тока питающей сети диодными выпрямителями в составе электроприводов, которые вместе с реактивными потерями силовых трансформаторов создают дополнительные потери в распределительных сетях. Низкая экономическая эффективность обусловлена сложностью управления графиком нагрузки комплекса технологического оборудования, в соответствии с требованиями сетевого оператора единой электроэнергетической системы в условиях непрерывного производства.

Таким образом, разработка комплекса технологического оборудования, с повышенной эффективностью энергопотребления и рациональным управлением графиком нагрузки, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования.

Большой вклад в развитие преобразовательной техники для электротехнических комплексов внесли отечественные и зарубежные авторы: Т.А. Глазенко, Ф.И. Ковалев, Ю.М. Иньков, П.Д. Андриенко, А.С. Сандлер, Р.Т. Шрейнер, И.В. Жежеленко, А.В. Праховник, Ю.К. Розанов, Г.С. Зиновьев, В.П. Розен, М.П. Белов, В.А. Новиков, H. Akagi.

Цель исследования – повышение эффективности энергопотребления комплексом технологического оборудования горноперерабатывающего предприятия.

Основные задачи исследования:

1. Исследование комплексов технологических электроустановок и производственных процессов, при помощи разработанного программно-аппаратного комплекса, а также анализ системы ценообразования конечной стоимости электрической энергии, с последующей разработкой мероприятий по повышению электроэнергетической эффективности промышленного предприятия.

2. Разработка выпрямительно-инверторного преобразователя с двухсторонним обменом энергией между сетью и объединенным звеном постоянного напряжения для комплекса технологического оборудования предприятия.

3. Разработка и исследование на имитационной модели, системы управления транзисторным коммутатором для выпрямительно-инверторного преобразователя.

4. Разработка и внедрение системы управления и контроля энергопотребления комплексом технологического оборудования для обеспечения требуемого графика нагрузки и повышения экономической эффективности предприятия.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Разработана система энергопотребления комплексом частотно-регулируемых электроприводов промышленного предприятия с формированием синусоидального тока сети и сниженным энергопотреблением.

2. Предложен оригинальный подход для двухстороннего обмена энергией, между комплексом частотно-регулируемых электроприводов технологического оборудования и сетью, за счет переключения диодного выпрямителя с активным фильтром тока сети на транзисторный выпрямитель.

3. Предложен принцип построения системы управления транзисторным коммутатором для выпрямительно-инверторного преобразователя, обеспечивающий синусоидальный ток сети и снижение энергопотребления комплексом технологического оборудования.

4. Разработана имитационная модель выпрямительно-инверторного преобразователя, позволившая установить пределы прямого и обратного переключения диодного выпрямителя с активным фильтром тока сети и транзисторного выпрямителя, для наиболее эффективного режима энергопотребления комплексом технологического оборудования

5. Применительно к горноперерабатывающему предприятию с усовершенствованным комплексом технологического оборудования, предложены и реализованы алгоритмы смещения графика нагрузки непрерывного производственного процесса для снижения стоимости электрической энергии, с учетом требований системного оператора единой электроэнергетической системы.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Разработано устройство для двухстороннего обмена электрической энергией между сетью и объединенным звеном постоянного напряжения с обеспечением синусоидального тока в силовом трансформаторе подстанции и в ЛЭП.

2. Разработаны математическая и имитационная модель системы управления выпрямительно-инверторного преобразователя, для исследования физических процессов, протекающих при обмене энергией в системе электроснабжения.

3. Разработана система и устройство рационального управления комплексом технологического оборудования.

4. Разработаны математическая и имитационная модель системы ограничения энергопотребления комплексом технологического оборудования.

5. Разработан программно-аппаратный комплекс для дистанционного исследования параметров энергопотребления регулируемых систем электропривода и системы электроснабжения технологических процессов.

Объектом исследования является комплекс технологического оборудования горноперерабатывающего предприятия.

Предметом исследования являются преобразовательные устройства и электротехнические комплексы технологических электроустановок промышленных предприятий.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы математического моделирования электротехнических систем, теории электрических цепей, теории электропривода, автоматического управления и вычислительного эксперимента.

Положения, выносимые на защиту:

1. Система энергопотребления комплексом частотно-регулируемых электроприводов с формированием синусоидального тока потребления, рациональным использованием энергии генераторного торможения и снижением энергопотребления технологических электроустановок.

2. Устройство и алгоритм переключения активного фильтра тока сети, на инвертор, ведомый сетью, при рекуперации энергии генераторного торможения электроприводами подъемно-транспортного оборудования.

3. Система управления и контроля энергопотребления комплексом технологического оборудования горноперерабатывающего предприятия, обеспечивающая снижение стоимости электрической энергии.

4. Алгоритмы смещения энергопотребления комплекса технологического оборудования на заданном интервале времени, с адаптацией их в действующей автоматизированной системе управления технологическими процессами горноперерабатывающего предприятия.

Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует следующим областям исследования паспорта научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы:

П.1 Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

П. 3 Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов, с приемлемой погрешностью, подтверждена при помощи численного исследования, имитационного моделирования, стендовых испытаний и экспериментальными исследованиями в условиях промышленной эксплуатации.

Основное содержание и результаты диссертационной работы были представлены на всероссийских и международных конференциях:

Международная научно-практической конференция «Технические науки: теоретический и практический взгляд» (г. Уфа, 2014 г.);

Конкурс научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета «Наука молодых - основа будущего России» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2014 г.);

46-й научно-технической конференции студентов и аспирантов Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре, 2016 г.);

18-м краевом конкурсе молодых ученых и аспирантов «Молодые ученые - Хабаровскому краю» (г. Хабаровск, 2016 г.);

Международная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «Far East Con-2019» (г. Владивосток, остров Русский, 2019 г.)

III Всероссийская национальная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2020 г.).

Результаты работы внедрены в систему автоматизированного управления технологическими процессами, промышленного предприятия ООО «Амурский гидрометаллургический комбинат», для снижения энергопотребления комплексом технологического оборудования в часы пиковых нагрузок энергосистемы.

Личный вклад автора. Автор принял непосредственное участие в научно-исследовательских и научно-изыскательских работах по совершенствованию комплекса технологического оборудования горноперерабатывающего предприятия. Разработал алгоритм переключения режимов, математическую и имитационную модель системы управления выпрямительно-инверторным преобразователем. Также, автором разработано устройство и алгоритмы смещения энергопотребления на заданном интервале времени для комплекса технологического оборудования, математическая и имитационная модель системы управления комплексами. Сделано внедрение алгоритма управления комплексами технологического оборудования на промышленном предприятии.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 20 научных работах, из них пять статей в научных изданиях, рекомендованных ВАК и одна публикация в издании, входящем в международную базу цитирования Scopus.

Также получены два патент на изобретение, четыре патента на полезную модель и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 119 наименований. Текст диссертации изложен на 189 страницах, включая 6 приложений. Из них 125 страниц основного текста, который содержит 71 рисунок и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит основные положения выполненного диссертационного исследования. Раскрыта актуальность темы, определены цель и задачи работы,

сформулированы научная новизна и практическая значимость выполненного исследования, определены пункты соответствия паспорту научной специальности и положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрены существующие способы рационального использования энергии динамического торможения частотно-регулируемого электропривода, норм показателей качества, потребляемого электроустановкой тока, применяемых подходов при снижении искажений тока в системах электроснабжения, а также способов управления комплексами электроприводов технологических электроустановок, для снижения стоимости электрической энергии.

Для полезного использования генерируемой электрической машиной энергии, известными промышленными компаниями разработана система электроснабжения частотно-регулируемых электроприводов от общей сети постоянного напряжения, которая позволяет осуществлять обмен электрической энергией между подключенными к ней электроприводами, функционирующими как в генераторном, так и в двигательном режимах. Однако такая система является источником значительных искажений тока питающей сети и нуждается в дополнительных мерах защиты от высоких значений напряжения, возникающих при динамическом торможении электрической машины. В соответствии с нормами, закрепленными в отечественных и зарубежных стандартах, величина эмиссии гармонических составляющих тока трехфазного мостового выпрямителя значительно превышает допустимые значения.

В настоящее время активный фильтр наиболее перспективное техническое решение для фильтрации вносимых электроустановками гармонических искажений тока. Положительные качества активных фильтров в сравнении с фильтрами на пассивных элементах состоят в высоком быстродействии, за счет применения современных транзисторных коммутаторов, которые позволяют перестроить характеристики фильтра в соответствии с изменением параметров электрической сети.

В таких системах компенсации искажений, используется инвертор напряжения на основе трехфазного мостового транзисторного коммутатора с индивидуальным управлением каждым транзистором. Сигналы управления коммутатором формируются в результате последовательности математических преобразований системы координат токов и напряжений.

В первую очередь при помощи преобразования Кларка выполняется вычисление двухфазных неподвижных координат напряжения (U_α и U_β) и тока (I_α и I_β) для трехфазной системы напряжения питающей сети (U_a, U_b и U_c) и трехфазной системы токов нагрузки (I_a, I_b и I_c).

Мгновенная мощность в комплексной форме может быть представлена следующим образом:

$$S = \vec{U} \times \vec{I} = \left(U_\alpha + jU_\beta\right) \times \left(I_\alpha + jI_\beta\right) = \left(U_\alpha I_\alpha + U_\beta I_\beta\right) + j\left(U_\beta I_\alpha - U_\alpha I_\beta\right), \quad (1)$$

где $\vec{U}$ – вектор напряжения; $\vec{I}$ – вектор тока.

Исходя из этого определяем мгновенную реальную p и мнимую q мощности:

$$p = U_\alpha I_\alpha + U_\beta I_\beta, \quad (2)$$

$$q = U_\beta I_\alpha - U_\alpha I_\beta. \quad (3)$$

Найденные реальная и мнимая мощности представляют собой сумму средних ($\bar{p}$, $\bar{q}$) и пульсирующих ($\tilde{p}$, $\tilde{q}$) значений, которые могут быть выделены при помощи фильтра нижних частот:

$$p = \bar{p} + \tilde{p}, \quad (4)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}. \quad (5)$$

Среднее значение мощности $\bar{p}$ соответствует активной мощности. Среднее значение пульсирующей части $\tilde{p}$ равно нулю и соответствует колебаниям активной мощности. Аналогично выделенные части мощности $\bar{q}$ и $\tilde{q}$ соответствует реактивной мощности.

Преобразованные токи в неподвижной системе координат (α, β) как сумма всех выделенных составляющих мощности представлены следующим образом:

$$I_\alpha = \frac{U_\alpha}{U_\alpha^2 + U_\beta^2}\bar{p} + \frac{U_\alpha}{U_\alpha^2 + U_\beta^2}\tilde{p} + \frac{U_\beta}{U_\alpha^2 + U_\beta^2}\bar{q} + \frac{U_\beta}{U_\alpha^2 + U_\beta^2}\tilde{q}, \quad (6)$$

$$I_\beta = \frac{U_\beta}{U_\alpha^2 + U_\beta^2}\bar{p} + \frac{U_\beta}{U_\alpha^2 + U_\beta^2}\tilde{p} - \frac{U_\alpha}{U_\alpha^2 + U_\beta^2}\bar{q} - \frac{U_\alpha}{U_\alpha^2 + U_\beta^2}\tilde{q}, \quad (7)$$

На этом этапе выполняется определение параметров компенсации проектируемой системы. Один из известных способов основывается на выделении первой гармоники тока, потребляемого нагрузкой.

После определения значения мощностей генерируемой активным фильтром необходимой для компенсации искажений тока нагрузки, выполняется преобразование найденных величин в неподвижную систему координат (α, β):

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{U_\alpha^2 + U_\beta^2}\begin{bmatrix} U_\alpha & U_\beta \\ U_\alpha & -U_\beta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Преобразование токов из неподвижной системы координат (I_α и I_β) в трехфазную вращающуюся систему координат (I_a, I_b и I_c) выполняется при помощи обратного преобразования Кларка

Найденные величины поступают на вход, широтно-импульсного модулятора, который формирует сигналы управления ключами транзисторного коммутатора.

Для защиты объединенного звена постоянного напряжения от опасных значений напряжения, возникающих при динамическом торможении электрической машины, предпочтительно использовать силовой транзисторный преобразователь (транзисторный выпрямитель). Основное достоинство транзисторного выпрямителя – это возможность двухстороннего обмена электрической энергией между сетями постоянного и переменного напряжения.

Силовая часть транзисторного выпрямителя напряжения также, как и у активного фильтра тока, представляет собой трехфазный мостовой транзисторный коммутатор. Для получения сигналов управления транзисторным коммутатором необходимо проекции реактивного I_y и активного I_x тока в сети преобразовать из системы вращающейся системы координат в систему неподвижных координат I_α и I_β методом преобразования результирующего вектора, в соответствии с уравнениями:

$$I_\alpha = I_x \cos(\omega_k t) - I_y \sin(\omega_k t), \quad (9)$$

$$I_\beta = I_y \cos(\omega_k t) + I_x \sin(\omega_k t), \quad (10)$$

где ω_k – вращение вектора со скоростью равной $2\pi f_1$ в комплексной плоскости.

Математическое преобразование системы токов из неподвижных координат I_α и I_β в трехфазную систему координат I_a, I_b и I_c осуществляется при помощи обратного преобразования Кларка. Затем из реальных токов транзисторного коммутатора вычитаются вычисленные токи и из полученной разности формируются сигналы управления транзисторным коммутатором.

Анализ структуры активного фильтра тока и транзисторного выпрямителя напряжения, показал идентичность используемых силовых элементов и аналогичность некоторых математических преобразований систем управления.

Технические решения по снижению энергопотребления на заданном интервале времени, комплексами технологического оборудования, в зависимости от степени влияния на производственные процессы условно делятся на две большие группы: оказывающие воздействие и без воздействия на процесс. К первой группе относятся решения, основанные на отключении от системы электроснабжения технологических электроустановок, оказывающих непосредственное воздействие на режим функционирования и производительность технологических процессов и тем самым, наносят экономический ущерб промышленному предприятию в целом. В условиях непрерывного круглосуточного производства такие технические решения не используются. Ко второй группе относятся мероприятия, снижающие энергопотребление технологических электроустановок в заданные интервалы времени. Наиболее перспективны технические решения, изменяющие работу отдельных технологических операций, без влияния на весь технологический процесс. Одно из таких решений основывается на управлении энергопотреблением одной из двух последовательных операций с промежуточным накоплением продукта.

Однако, в исследуемых источниках, отсутствуют алгоритмы снижения потребляемой энергии комплексами технологических электроустановок на заданных интервалах времени, для конкретных типов процессов, это затрудняет внедрение в промышленное производство.

Во **второй главе** выполнено исследование комплексов электроприводов технологических электроустановок, а также производственного процесса, с последующей разработкой мероприятий по повышению эффективности.

В производственных процессах исследуемого предприятия, применяется большое количество технологических электроустановок с частотно-регулируемым электроприводом, выполняющих транспортировку жидкостей насосами и вентиляторы климатического оборудования. Кроме этого, в технологических процессах исследуемого предприятия, применяются грузоподъемные механизмы с частотно-регулируемым электроприводом, работа которых характеризуется частыми и длительными переходами асинхронной машины в генераторный режим, который возникает в процессе перемещения груза по заданной траектории. Для обеспечения требуемой скорости торможения, а также для предотвращения перенапряжения в звене постоянного напряжения и выхода автономного инвертора напряжения из

строя, генерируемая электродвигателем энергия рассеивается в виде тепла на балластном сопротивлении.

Таким образом, в исследуемых системах электропривода в составе комплексов технологического оборудования, высокий уровень искажений тока в питающей сети и бесполезно расходуется энергия динамического торможения асинхронных машин.

Кроме этого, анализ конечной стоимости электрической энергии показал, что более половины стоимости покупки электрической энергии (мощности) зависит от фактической мощности потребляемой предприятием в плановые часы пиковых нагрузок региональной энергосистемы. Следовательно, для снижения конечной стоимости электрической энергии исследуемого горноперерабатывающего предприятия, необходимы технические решения, которые дают возможность управлять графиком нагрузки комплекса технологического оборудования в заданные интервалы времени, путем снижения энергопотребления в пиковые часы энергосистемы.

В **третьей главе** представлен усовершенствованный комплекс технологического оборудования, где электроприводы технологических электроустановок подключены к системе электроснабжения через разработанный выпрямительно-инверторный преобразователь, который обеспечивает синусоидальный ток в электрической сети. Кроме этого, в разработанной системе управления и контроля, реализованы алгоритмы перераспределения энергопотребления, на заданных интервалах времени, без снижения производительности непрерывных технологических операций.

На рисунке 1 изображена структурная схема усовершенствованного комплекса технологического оборудования. Технологический процесс состоит из отдельных технологических операций (ТО1 – ТОn), в каждую из которых входят электроприводы технологических электроустановок (ЭП1 – ЭПn) и технологический накопитель (ТН). Каждый электропривод состоит из асинхронного двигателя (АД) и автономного инвертора напряжения (АИН), подключенного к сети постоянного напряжения через датчик мощности (ДМ). Датчик предназначен для измерения мгновенной мощности и количества потребляемой электроприводом электрической энергии. Блок управления (БУ) каждой технологической операции подключен к электронно-вычислительной машине (ЭВМ) и осуществляет управление группой электроприводов в соответствии с разработанными алгоритмами, в зависимости от состояния технологического накопителя и информации получаемой от ЭВМ и датчиков мощности электроприводов. Для рационального использования энергии, генерируемой электрической машиной и снижения искажений тока, сеть постоянного напряжения подключена к выпрямительно-инверторному преобразователю (ВИП), который через датчик мощности сети (ДМс) подключен к трехфазной сети переменного синусоидального напряжения питаемой от силового трансформатора (ТС). Электронно-вычислительная машина предназначена для обмена информацией между блоками управления технологическими операциями и датчиками мощности.

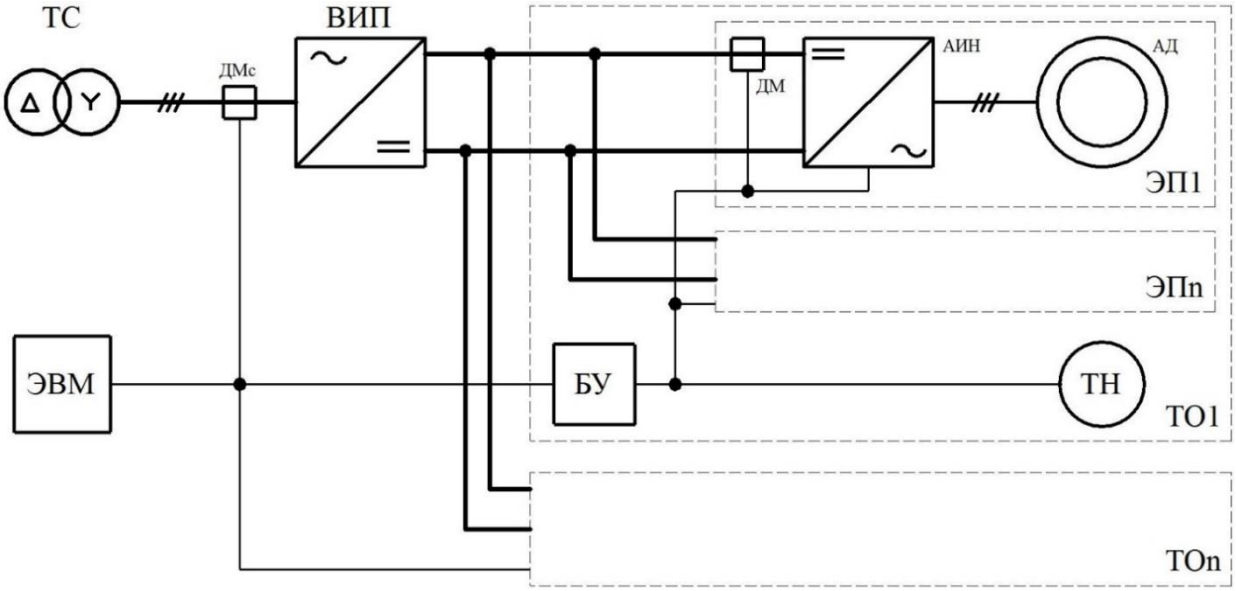


Рисунок 1 – Структурная схема комплекса технологического оборудования

Выпрямительно-инверторный преобразователь (рисунок 2), в составе комплекса технологического оборудования, разработан для обмена электрической энергией между частотно-регулируемыми электроприводами по объединенному звену постоянного напряжения, а также между звеном постоянного и сетью переменного напряжения с низкой эмиссией искажений тока в питающую сеть. Различаются три режима работы преобразователя – выпрямительный, инверторный и режим накопления электрической энергии. Разработанный выпрямительно-инверторный преобразователь, отличает от известных технических решений, применение одного комплекта силовых элементов как в выпрямительном, так и в инверторном режиме, с общей системой управления.

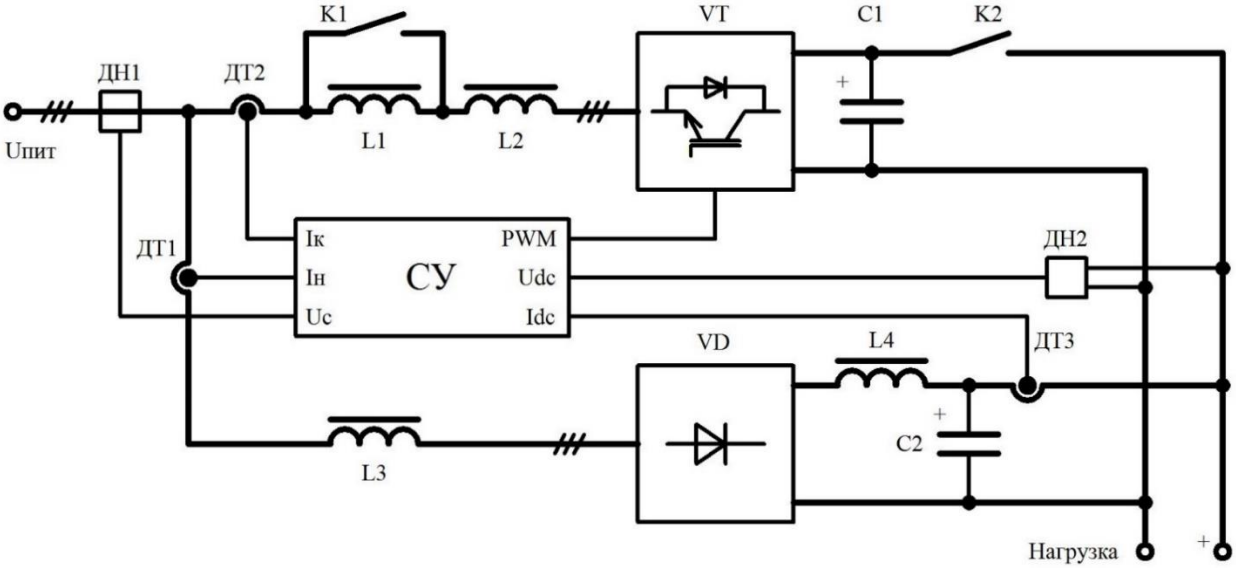


Рисунок 2 – Структурная схема выпрямительно-инверторного преобразователя

Преобразователь состоит из: ДН1 – датчик напряжения питающей сети; ДТ1 – датчик тока нагрузки; ДТ2 – датчик тока транзисторного коммутатора; К1 – трехфазный коммутатор; L1 – трехфазная индуктивность; L2 – дополнительная трехфазная индуктивность; VT – транзисторный коммутатор; К2 – ключ; СУ – система управления; ДН2 – датчик напряжения сети постоянного напряжения; L3 – трехфазный L-фильтр; VD – диодный выпрямитель; L4 – L-фильтр; C1 – конденсатор коммутатора; C2 – конденсатор выпрямителя; ДТ3 – датчик тока выпрямителя.

Алгоритм переключения режимов выпрямительно-инверторного преобразователя изображен на рисунке 3 и предназначен для коммутации элементов устройства. Переключение режимов выполняется при следующих условиях.

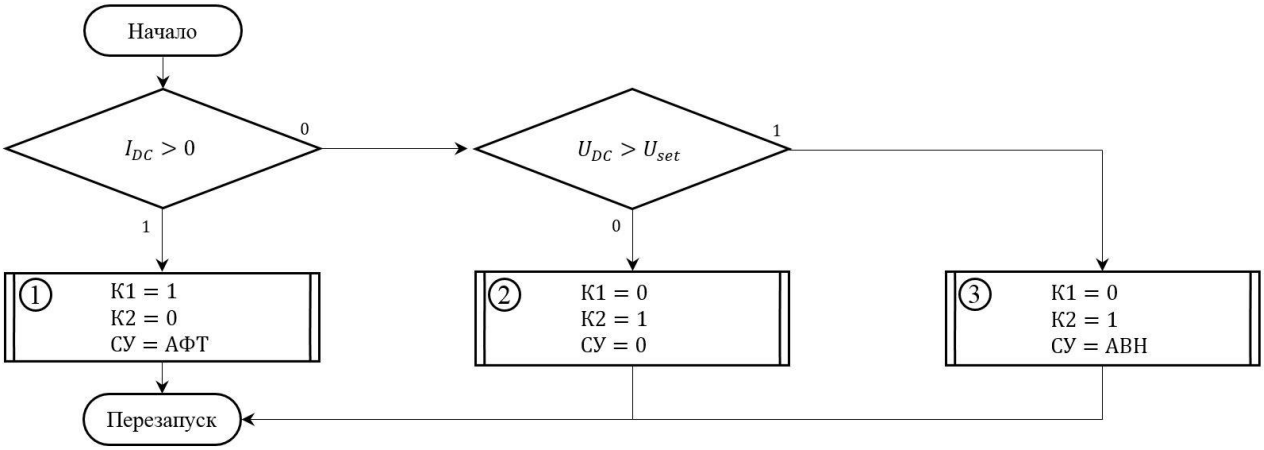


Рисунок 3 – Блок-схема операций алгоритма переключения режимов ВИП

1. При величине тока (I_{DC}) на выходе диодного выпрямителя больше нуля, преобразователь находится в выпрямительном режиме, при этом, электроприводы, подключенные к шинам постоянного напряжения, питаются через диодный выпрямитель, индуктивность L1 шунтирована коммутатором К1, сеть постоянного напряжения отключена коммутатором К2, транзисторный коммутатор функционирует в режиме активного фильтра тока.

2. При величине тока на выходе диодного выпрямителя равном нулю и напряжении на шинах (U_{DC}), меньше заданного значения (U_{set}), преобразователь находится в режиме накопителя электрической энергии. При этом, на шины увеличивается поступление энергии генераторного торможения, ее потребляют электроприводы, функционирующие в двигательном режиме, ток диодного выпрямителя снижается до нуля, а напряжение на шинах находится в пределах заданного значения. Когда ток через транзисторы равен нулю, производится отключение коммутатора К1. Кроме этого, конденсатор C1 подключается к шинам коммутатором К2, а транзисторный коммутатор отключается, тем самым обеспечивается накопление энергии в конденсаторах фильтров каждого электропривода.

3. Преобразователь переводится в инверторный режим, если количество энергии превышает ее потребление, напряжение на шинах превышает установленную величину, а ток через выпрямитель все еще равен нулю.

Системы управления активным фильтром тока и транзисторным выпрямителем напряжения имеют много общего, как следствие математическая модель системы управления выпрямительно-инверторного преобразователя (рисунок 4), базируется на теоретическом описании для обоих типов систем. В инверторном режиме выполняются вычисления, сгруппированные в первом блоке. К выпрямительному режиму относятся математические выражения второго блока. Математические преобразования третьего блока общие для обоих режимов управления. В режиме накопления энергии математические преобразования не выполняются. Имитационная модель выпрямительно-инверторного преобразователя, построена в соответствии с приведенным математическим описанием, в системе имитационного блочного моделирования Simulink, программного комплекса Matlab.

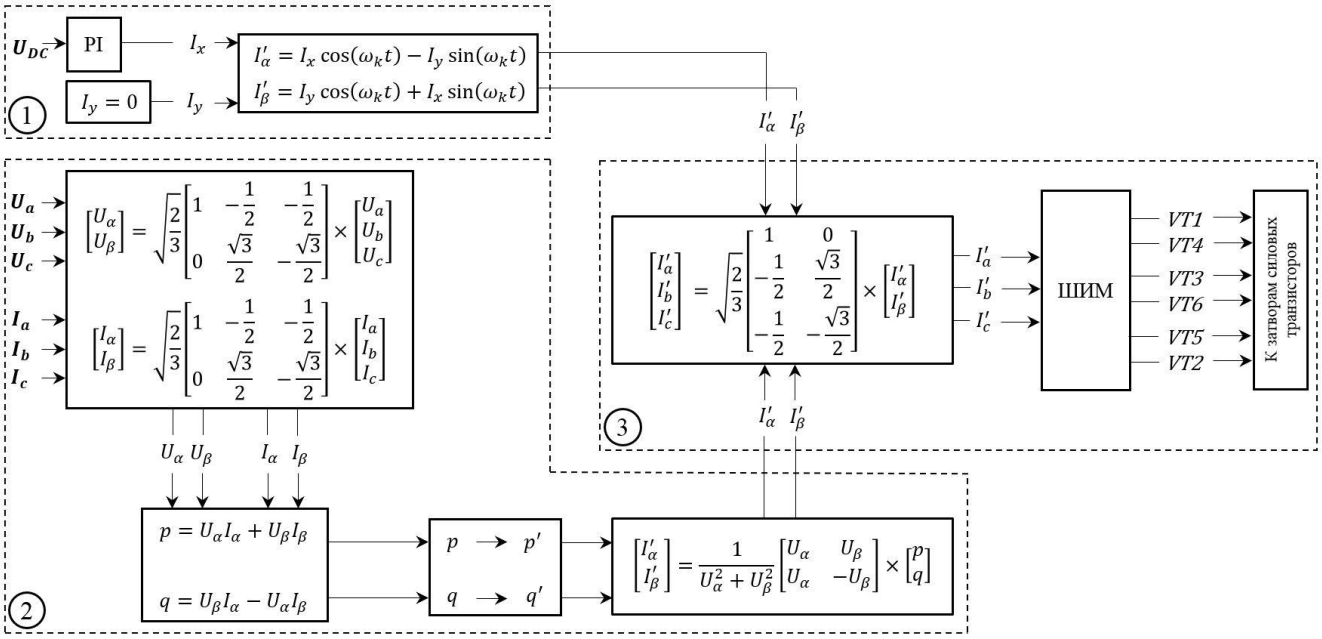
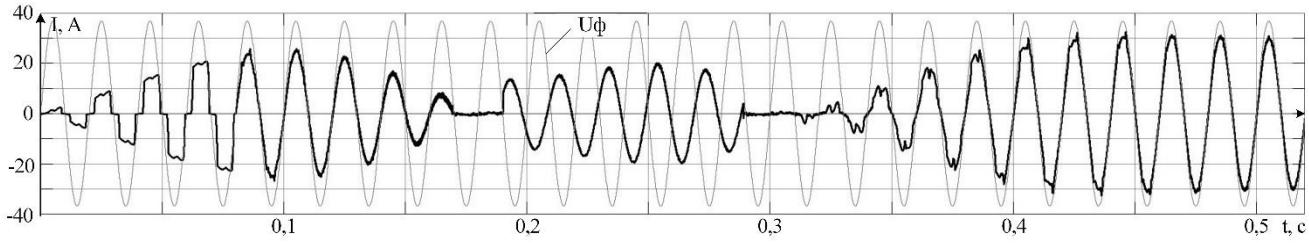
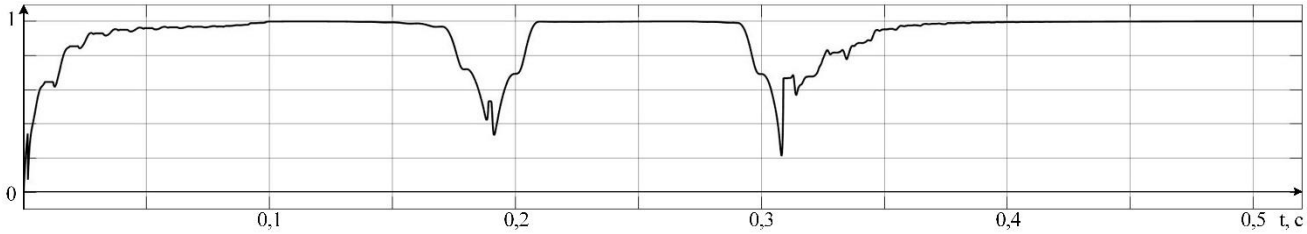


Рисунок 4 – Модель математических преобразований системы управления выпрямительно-инверторного преобразователя

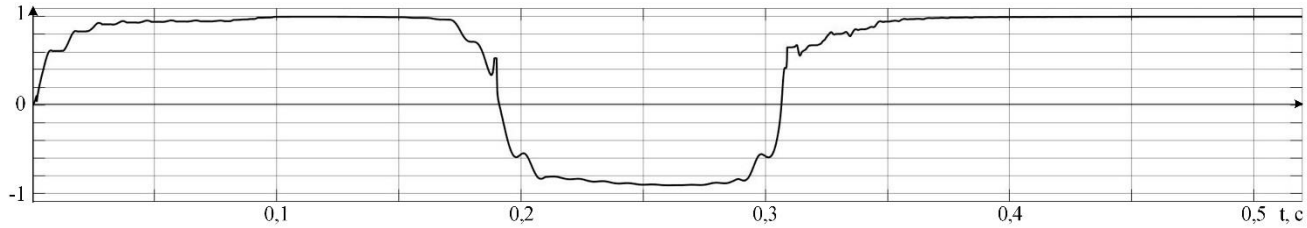
Осциллограммы, полученные при помощи разработанной имитационной модели и характеризующие работу выпрямительно-инверторного преобразователя, изображены на рисунке 5.



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Осциллограммы величин питающей сети:
а – фазный ток и напряжение; б – коэффициент искажения фазного тока; в – коэффициент мощности

Период моделировании разбит на шесть характерных интервалов. В диапазоне от 0 до 0,08 секунд первого интервала, диодный выпрямитель питает шины постоянного напряжения, при этом искажения тока сети не компенсируются поскольку транзисторный коммутатор находится в закрытом состоянии. В диапазоне от 0,08 до 0,17 секунд второго интервала, преобразователь функционирует в выпрямительном режиме. В это время ток питающей сети становится синусоидальным за счет компенсации искажений транзисторным коммутатором. В диапазоне от 0,17 до 0,19 с электропривод функционирует в генераторном режиме. По мере увеличения энергии на шинах, нагрузка на выпрямитель снижается и при достижении нуля, преобразователь переключается в режим накопления электрической энергии. Переключение преобразователя в инверторный режим выполняется, когда количество генерируемой энергии превышает ее потребление (диапазон от 0,19 до 0,29 с). При этом производится передача энергии из сети постоянного в сеть переменного напряжения. В это время интенсивность генерирования электроприводом энергии снижается. Дальнейшее снижение генерации (диапазон от 0,29 до 0,31 с), приводит к балансу выработки и потребления энергии с переключением преобразователя в накопительный режим. В диапазоне от 0,31 секунды, электроприводы потребляют накопленную в сети энергию и по мере роста нагрузки на диодный выпрямитель, производится переключение преобразователя в выпрямительный режим с компенсацией искажений тока питающей сети.

Осциллограмма, изображенная на рисунке 5, б, показывает рост искажений тока питающей сети в диапазоне от 0 до 0,08 секунд, когда преобразователь отключен. Наличие искажений в накопительном режиме преобразователя не оказывает влияния на питающую сеть, поскольку потребляемый в это время, из сети ток равен нулю. В выпрямительном и инверторном режимах, коэффициент несинусоидаль-

ности близок к единице. Аналогичное изменение коэффициента мощности изображено на рисунке 5, в. В выпрямительном и инверторном режимах, величина коэффициента также стремится к единице.

Измеренные показатели суммарного коэффициента гармонических искажений тока и напряжения питающей сети в разных режимах работы выпрямительно-инверторного преобразователя, показали минимальные (около нуля) искажения напряжения и величину искажений тока от 2,3 до 2,8 %, которые не превышают установленные нормы.

Имитационное моделирование алгоритма переключения режимов выпрямительно-инверторного преобразователя, подтвердило возможность обмена электрической энергией между электроприводами по объединенному звену постоянного напряжения, а также между шинами постоянного и сетью переменного напряжения с низким уровнем искажений тока при использовании одного комплекта силовых элементов.

Устройство управления (БУ) в составе комплекса технологического оборудования (рисунок 1), предназначено для изменения режимов энергопотребления электроприводов технологической операции.

Для решения задачи управления энергопотреблением комплекса технологического оборудования, в заданные интервалы времени, без снижения производительности непрерывных технологических операций промышленного предприятия, на основе Simatic WinCC (Windows Control Center), производитель компания «Siemens», разработана имитационная модель системы ограничения энергопотребления, для двух последовательных технологических операций с промежуточным накоплением продукта. Первая технологическая операция производит сырье или готовый продукт для второй технологической операции со скоростью QP. Вторая операция перерабатывает этот продукт со скоростью QC. Для обеспечения непрерывности функционирования процесса, между операциями присутствует технологический накопитель.

В отличие от известных технических решений, в текущем диссертационном исследовании более подробно рассмотрены технологические процессы двух типов, где $QP > QC$ и $QP < QC$, выявленные при изучении комплексов технологических процессов промышленного предприятия. Для каждого типа определены ограничения и условия функционирования, алгоритм управления и критерий эффективности. Разработанные математическая и имитационная модели учитываю особенности характерные для каждого типа процесса.

Разработанные алгоритмы выполняют снижение энергопотребления комплекса технологических электроустановок на заданных интервалах времени, за счет управления периодически работающей технологической операцией, с использованием емкости технологического накопителя. При этом обеспечивается непрерывность функционирования всего технологического процесса. Математические преобразования имитационной модели, выполняемые в соответствии с алгоритмом, решаются методом последовательного поиска.

Интервалы ограничения энергопотребления технологического процесса t_1 (t_1') и t_2 (t_2'), заданы в виде интервала времени $[t_n, t_n']$, который состоит из интервалов времени (k), длительностью (t_k), периода (K):

$$[t_n, t_n'] = \sum_{k=1}^{K} t_k, \tag{11}$$

где t_n – начало интервала ограничения мощности; t_n' – окончание интервала ограничения мощности.

Между периодами ограничения мощности t_1 (t_1') и t_2 (t_2'), образуются интервалы контроля процесса, во время которых электроустановки функционируют в нормальном режиме в соответствии с текущим уровнем технологического накопителя, они заданы в виде интервалов времени $[t_n', t_n]$, которые состоят из интервалов времени (r), длительностью (t_r), периода (R):

$$[t_n', t_n] = \sum_{r=1}^{R} t_r. \tag{12}$$

Алгоритмы снижения энергопотребления различаются в зависимости от типа управляемого технологического процесса.

Последовательность выполнения операций для технологического процесса, первого типа, где $QP > QC$, вычисляется следующим образом

Первая операция алгоритма. С учетом скорости переработки QC_k^2 на интервале k, для второй технологической операции вычисляется объем сырья необходимый для ее бесперебойной работы на заданном интервале снижения нагрузки $V_{[t_n, t_n']}$:

$$V_{[t_n, t_n']} = \sum_{k=1}^{K} (QC_k^2 \times t_k). \tag{13}$$

Вторая операция алгоритма. С учетом скорости переработки второй операцией и производительности первой операции QP_r^1 на интервале r, вычисляется время t_V требуемое для наполнения накопителя:

$$t_V = \frac{V_{[t_n, t_n']}}{QP_r^1 - QC_r^2}. \tag{14}$$

Третья операция алгоритма. Проверяется соответствие количества сырья в накопителе V_r, и объема необходимого для непрерывной работы второй операции:

$$V_r < V_{[t_n, t_n']}. \tag{15}$$

Четвертая операция алгоритма. Производится проверка времени до начала интервала снижения нагрузки t_n от текущего времени t:

$$t - t_n < t_V. \tag{16}$$

При соблюдении всех условий производится наполнение накопителя до требуемого уровня путем включения первой технологической операции.

Последовательность выполнения операций для технологического процесса, второго типа, где $QP < QC$, вычисляется следующим образом:

Первая операция алгоритма. С учетом производительности, вычисляется объем накопителя, требуемый для хранения продукта, произведенного первой технологической операцией на заданном интервале снижения нагрузки:

$$V_{[t_n,t'_n\ ]} = \sum_{k=1}^{K}(QP_k^1 \times t_k). \tag{17}$$

Вторая операция алгоритма. С учетом параметров технологических операций, вычисляется время, требуемое для переработки накопленного продукта в период действия интервала снижения нагрузки:

$$t_V = \frac{V_{[t_n,t'_n\ ]}}{QC_r^2 - QP_r^1}. \tag{18}$$

Третья операция алгоритма. Проверяется соответствие имеющейся свободной емкости накопителя в зависимости от максимально допустимого V_{max} и текущего уровня:

$$V_{max} - V_r < V_{[t_n,t'_n\ ]}. \tag{19}$$

Четвертая операция алгоритма. Производится проверка времени до начала интервала снижения нагрузки:

$$t - t_n < t_V. \tag{20}$$

При соблюдении всех условий производится снижение объема продукта в накопителе до заданного уровня, путем включения второй операции.

Имитационное моделирование системы ограничения энергопотребления комплекса технологических электроустановок, подтвердило правильность функционирования алгоритмов управления процессом на заданном интервале времени и возможность использования технологического накопителя для снижения потребляемой электроприводами мощности в заданные интервалы времени, без снижения производительности непрерывных операций. Кроме этого подтверждена необходимость индивидуальных алгоритмов управления комплексом, для каждого типа технологического процесса с технологическим накопителем.

В **четвертой главе** представлены результаты исследования усовершенствованного комплекса технологического оборудования в условиях промышленной эксплуатации, а также описание разработанного программно-аппаратного комплекса, предназначенного для научных исследований комплексов технологических электроустановок, а также производственных систем электроснабжения и распределения электрической энергии.

Экспериментальное исследование комплекса технологического оборудования, в условиях промышленной эксплуатации проводилось на базе участков измельчения извести и известняка на горноперерабатывающем предприятии ООО «Амурский гидрометаллургический комбинат» расположенном в г. Амурске, Хабаровского края.

Рабочая мощность основного оборудования комплекса дробления извести составляет 165,5 кВт, комплекса дробления известняка 183,5 кВт.

Исследование системы управления энергопотреблением комплекса выполнялось следующим образом. Во время работы участков измельчения извести и известняка, на тестовом интервале времени, производилась фиксация часового потребления электроприводами электрической энергии и объема технологического накопителя на интервале равном 10 минут. Далее производилось имитационное моделирование с начальными условиями равными фактическим величинам на начало тестовой выборки. Для оценки точности результатов моделирования выполнялось вычисление относительной погрешности для каждого часа тестовой выборки.

Исследование полученных данных показывает, что наибольшая точность моделирования достигается в установившихся режимах работы технологического процесса. Наибольшая погрешность наблюдается при переходных режимах, когда происходит запуск или остановка комплекса технологических электроустановок участка. Также наблюдается неравномерность величины относительной ошибки энергопотребления в установившемся режиме. Это происходит из-за использования в имитационной модели линейных функций для расчета производительности и энергопотребления, которые не учитывают особенностей работы технологического оборудования при различной загрузке рабочим продуктом. Также модель не учитывает влияние дополнительных операций, производимых технологическим персоналом для обеспечения функционирования участка.

В целом, система управления энергопотреблением комплекса технологических электроустановок обеспечивает минимальное энергопотребление технологического процесса на всем интервале часов пиковых нагрузок энергосистемы без отключения непрерывных технологических операций, а выявленные несоответствия не влияют на управление системой по разработанному алгоритму. Величина снижения нагрузки в условиях промышленной эксплуатации составила 88,9 % от суммарной нагрузки исследуемых технологических процессов.

Для решения задачи исследования комплексов технологического оборудования, а также производственных процессов, разработан программно-аппаратный комплекс, который позволяет проводить научные исследования комплексов технологических электроустановок, а также производственных систем электроснабжения и распределения электрической энергии.

Функциональные возможности комплекса позволяют управлять одиночным или группой электроприводов, реализованных на базе промышленных преобразователей частоты и микропроцессорных устройств управления и защиты двигателя. Собирать и обрабатывать информацию о состоянии управляющего устройства и текущих параметрах электрической машины. Кроме этого, при взаимодействии с микропроцессорными устройствами защиты и автоматики распределительных сетей, имеется возможность управления режимом электроснабжения комплексов технологических и энергетических электроустановок, а также сбор и анализ сопутствующих энергетических показателей. Дополнительные возможности комплекса позволяют осуществлять дистанционное управление как отдельной электроустановкой, так и технологическими комплексами. Математическую обработку измеренных величин с последующим преобразованием в графические элементы.

Настройка технологических параметров и эксплуатационных ограничений. Графическую визуализацию измеряемых величин и выполняемых технологических операций.

Преимуществом разработанного комплекса является возможность использования стандартной электронно-вычислительной машины с установленной общераспространенной операционной системы семейства Windows, компании «Microsoft». При этом, подключение аппаратной части комплекса выполняется при помощи имеющихся в составе ЭВМ стандартных сетевых интерфейсов, в том числе и связь с удаленным рабочим местом. При необходимости, разработанный комплекс может быть интегрирован в существующие системы автоматизированного управления технологическими процессами или энергоснабжением.

В процессе проведения научно-исследовательских работ производится наладка схемных решений и тестирование элементов интерфейса, а также проверка взаимодействия программных и аппаратных элементов комплекса между собой. После проведения необходимых работ, отлаженные элементы готовы к внедрению в производственный процесс. Таким образом, разработанный программно-аппаратный комплекс, позволяет значительно сократить сроки ввода новых технических решений в промышленную эксплуатацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей научно-исследовательской работе, решена актуальная задача повышения эффективности энергопотребления, комплексом технологического оборудования горноперерабатывающего предприятия. Основная теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Предложен новый выпрямительно-инверторный преобразователь в составе комплекса технологического оборудования с двухсторонним обменом электрической энергией между звеном постоянного и сетью переменного напряжения, с формированием синусоидального тока сети и сниженным энергопотреблением. При этом, в зависимости от режима работы, в питающей сети поддерживается величина суммарного коэффициента гармонических искажений тока на уровне от 2,3 до 2,8 %, а коэффициента мощности в пределах от 0,995 до 0,999.

2. Разработана система управления транзисторным коммутатором для выпрямительно-инверторного преобразователя, выполняющая переключение диодного выпрямителя с активным фильтром тока сети на транзисторный выпрямитель.

3. Разработана имитационная модель выпрямительно-инверторного преобразователя, позволившая установить пределы прямого и обратного переключения диодного выпрямителя с активным фильтром тока сети и транзисторного выпрямителя, для наиболее эффективного режима энергопотребления комплексом технологического оборудования

4. Предложены алгоритмы управления графиком нагрузки комплекса технологического оборудования для смещения энергопотребления технологических электроустановок в заданные интервалы времени, без снижения производительно-

сти непрерывных технологических операций. Величина снижения нагрузки в условиях промышленной эксплуатации составила 88,9 % от суммарной нагрузки исследуемых технологических процессов.

5. Разработан программно-аппаратный комплекс для дистанционного исследования параметров энергопотребления регулируемых систем электропривода и систем электроснабжения технологических процессов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статья, включенная в международную базу цитирования Scopus:

1. Sokolovsky, M.A. Power Management of a Continuous Mining Process / M.A. Sokolovsky, V.S. Klimash // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon); 1-4 Oct. 2019; -Vladivostok, Russia; -2019. -pp. 1-3. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934200.

Статьи в изданиях, рецензируемых ВАК:

2. Климаш, В.С. Стенд для исследования регулируемых систем электропривода с дистанционным управлением через интернет / В.С. Климаш, М.А. Соколовский // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. -2013. -№ III-1(15). -С. 32-38.

3. Климаш, В.С. Система рационального управления энергопотреблением промышленного предприятия / В.С. Климаш, М.А. Соколовский // Горное оборудование и электромеханика. -2017. -№4. -С. 25-31.

4. Климаш, В.С. Система управления и контроля энергопотребления / В.С. Климаш, М.А. Соколовский // Электротехнические и информационные комплексы и системы. -2018. -№1(т.14). -С. 19-26.

5. Климаш, В.С. Повышение энергетической эффективности комплекса подъемных кранов / В.С. Климаш, М.А. Соколовский // Электротехнические системы и комплексы. -2020. -№ 1(46). -С. 34-40. DOI:10.18503/2311-8318-2020-1(46)-34-40

6. Климаш, В.С. Повышение эффективности комплекса электроприводов технологического оборудования горноперерабатывающего предприятия / В.С. Климаш, М.А. Соколовский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. -2021. -№2. -С. 575-580.

Патенты и свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

7. Пат. 2625729. Российская федерация, МПК H02J 13/00. Устройство управления и контроля энергопотребления / В.С. Климаш, М.А. Соколовский; опубл. 18.07.2017, Бюл. №20.

8. Пат. 2713493. Российская Федерация, МПК H02J 5/00 (2006/01). Выпрямитель с активным фильтром / В.С. Климаш, М.А. Соколовский, А.В. Петухов; опубл. 05.02.2020, Бюл. №4.

9. Пат. 125718. Российская Федерация, МПК G01R 31/34 (2006.01). Стенд для исследования регулируемых систем электропривода, с дистанционным управлением / В.С. Климаш, М.А. Соколовский; опубл. 10.03.2013, Бюл. №7.

10. Пат. 132567. Российская Федерация, МПК G01R 31/00 (2006.01). Стенд с дистанционным управлением для исследования частотно-регулируемых систем электроприводов, объединенных по сети постоянного тока / В.С. Климаш, М.А. Соколовский; опубл. 20.09.2013, Бюл. №26.

11. Пат. 142676. Российская Федерация, МПК B66C 13/22 (2006.01). Система частотно-регулируемых электроприводов для комплекса грузоподъемных кранов / В.С. Климаш, М.А. Соколовский; опубл. 27.06.2014, Бюл. №18.

12. Пат. 181730. Российская Федерация, МПК B27L 5/02 (2006.01). Электропривод деревообрабатывающей линии по производству шпона / В.С. Климаш, А.В. Петухов, М.А. Соколовский; опубл. 26.07.2018, Бюл. №21.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012618581. Программа для управления и исследования регулируемых систем электропривода в среде CX - Supervisor / Климаш В.С. Соколовский М.А.; опубл. Реестр программ для ЭВМ. 2012. №3.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012660621. Программа для управления и исследования регулируемых систем электропривода в среде CX - Supervisor / Климаш В.С. Соколовский М.А.; опубл. Реестр программ для ЭВМ. 2012. №4.

Публикации:

15. Климаш, В.С. Информационно-измерительная и управляющая система с дистанционным управлением для промышленных установок / В.С. Климаш, М.А. Соколовский // Технические науки: теоретический и практический взгляд: сборник статей Международной научно-практической конференции (1 октября 2014г., г. Уфа). -Уфа: Аэтерна, -2014. -С. 32-36.

16. Соколовский, М.А. Информационно-измерительная и управляющая система промышленными объектами и комплексами /М.А. Соколовский // Наука молодых - основа будущего России: материалы докладов конкурса научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета / редкол.: Э.А. Дмитриев (отв.ред.) и др. - Комсомольск на Амуре: ФГБОУ ВПО "КнАГТУ", -2014. -С. 47-53.

17. Климаш, В.С. Система дистанционного управления энергетическими и технологическими установками / В.С. Климаш, М.А. Соколовский // Электротехнические комплексы и системы управления. -2015. -№4. -С. 42-46.

18. Соколовский, М.А. Опыт внедрения технологии повышения энергетической эффективности на промышленном предприятии / М.А. Соколовский, В.С. Климаш // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 46-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 01-15 апреля 2016 г. / редкол.: Э.А. Дмитриев (отв. ред.) и др. -Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО "КнАГТУ", -2016. -С. 558-560.

19. Соколовский, М.А. Повышение энергетической эффективности электротехнического комплекса / М.А. Соколовский // Молодые ученые - Хабаровскому краю. Материалы 18-го краевого конкурса молодых ученых и аспирантов (Хабаровск, 19-22 января 2016 г.). ООО "Принт-2", -2016. -С. 384-391.

20. Соколовский, М.А. Электротехнический комплекс подъемно-транспортного оборудования с энергосберегающей технологией / М.А. Соколовский, В.С. Климаш // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы III Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г. : в 3 ч. / редкол. : Э.А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. - Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО "КнАГУ", 2020. - Ч. 1. С. 339-342.