

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук
профессора Сарварова Анвара Сабулхановича
на диссертацию соискателя Джассим Хайдер Майтам Джассим:
«Microgrid-Based Power Supply Control System For Stacker Cranes / Система
управления электроснабжением кранов-штабелеров на основе Микрогрид»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальностям 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» и 2.4.3 –
«Электроэнергетика».

Актуальность темы диссертации

Вопрос повышения эффективности, устойчивости и надежности электроснабжения электроприводов подъёмно-транспортных механизмов, в частности стеллажных кранов-штабелёров, при одновременном решении проблем пиковых нагрузок, ухудшения качества электроэнергии и неэффективного рассеивания рекуперлируемой энергии является актуальным в области энергоснабжения складских комплексов. Разрабатываемый в диссертационной работе комплексный подход к системе управления электроснабжением стеллажных кранов-штабелёров, основанный на интеграции накопителей энергии в структуру "multi-drive" и концепции Микрогрид, позволяет повысить общую эффективность электротехнического комплекса склада и использовать повторно рекуперлируемую энергию электроприводов. Кроме того, объединение алгоритмов управления и оптимизированных топологий силовых преобразователей обеспечивает решение проблемы фрагментарности существующих решений, которые фокусируются либо на алгоритмах управления энергоснабжением на системном уровне, либо на реализации отдельных силовых компонентов. Поэтому тема диссертационного исследования, направленная на создание интегрированной системы управления электроснабжением стеллажных кранов-штабелёров на основе технологий Микрогрид, актуальна.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует пунктам 1, 2, 3, 4 паспорта научной специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы» и пунктам 9, 10, 11, 16 паспорта научной специальности 2.4.3. «Электроэнергетика».

Оценка содержания работы

Работа включает в себя введение, 5 глав, заключение, библиографический список из 135 наименования и 10 приложений, изложенных на 165 страницах текста, содержит 126 рисунков и 8 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, описана степень ее проработанности, отражена основная идея работы, формулируются цель и основные задачи исследования. Приведена

научная новизна и практическая значимость результатов, основные положения, выносимые на защиту, сведения об обоснованности и достоверности полученных результатов

В первой главе представлен анализ научных публикаций и современных технологий, связанных с компонентами предлагаемой автором системы электроснабжения. Исследована взаимосвязь электроприводов подъёмно-транспортных механизмов и системы с накопителями энергии, проанализирована иерархическая структура аккумуляторной системы, где верхние уровни управляют обменом энергией, а нижние физически соединены с источниками и нагрузками. Автор отметил недостаток исследований по накопителям в автоматизированных стеллажных кранах, что обосновывает их выбор в качестве объекта. Показано, что интеграция возобновляемых источников через общую DC-шину для питания группы кранов и применение схемы электроснабжения отдельного крана с батареей, работающей в параллельном (от сети и выпрямителя) и изолированном (от аккумуляторной батареи) режимах, могут повысить эффективность и снизить затраты. Глава завершается выводом о необходимости разработки гибридной системы электроснабжения подъёмно-транспортных механизмов для складских комплексов.

Во второй главе исследованы алгоритмы и регуляторы управления потоками энергии для обеспечения баланса активной и реактивной мощности, стабильности напряжения и частоты в электротехнических комплексах складских Микросетей. Основное внимание уделено двум ключевым подходам, выбранным за их эффективность и соответствие требованиям складов. Первый - регулятор статизма сети, управляющий двунаправленным AC/DC преобразователем и обеспечивающий распределение энергии и снижение пиков нагрузки даже при динамических изменениях. Для настройки и оптимизации параметров регулятора предложено использовать метод "роя частиц". Данный метод позволил увеличить быстродействие на 5,2% всего за 20 итераций по сравнению с первоначально предполагаемыми значениями параметров. Второй тип регулятора для управления аккумуляторной системой в изолированном режиме, успешно работающий с зашумленными данными о генерации и потреблении, основан на нечеткой логике. Дополнительно автор рассмотрел методы компенсации задержек линии (параллельные контроллеры с регулированием по спаду напряжения) и стабилизации преобразователя (алгоритм скользящего режима), а также дал рекомендации по их внедрению в систему управления электроснабжением кранов-штабелёров в зависимости от конфигурации нагрузки и системных требований. Эффективность предложенных решений подтверждена компьютерным моделированием.

В третьей главе диссертации автор представил результаты исследования и разработки зарядных устройств для аккумуляторных батарей, где установлено ключевое влияние топологии DC/DC-преобразователя на эффективность

процесса зарядки и общий КПД системы. Предложена топология широкодиапазонного LLC-резонансного преобразователя с двойным трансформатором и фазовым управлением, сочетающая преимущества «мягкого» переключения LLC-топологии и расширенный диапазон регулирования напряжения. Параметры преобразователя (резонансная частота 60 кГц) рассчитаны методом первой гармонической аппроксимации (FHA), обеспечивающим требуемое выходное напряжения. Результаты компьютерного моделирования работы зарядного устройства с аккумулятором и экспериментальные испытания опытного образца подтвердили корректность моделирования и адекватность метода FHA вблизи резонансной частоты, хотя выявили расхождения на высоких частотах и ограниченную точность аналитического прогноза коэффициента усиления вне резонанса. Успешная верификация в MATLAB и на практике подтверждает применимость разработанной топологии и методики расчета.

В четвертой главе диссертации автором описывается разработка и реализация испытательного стенда на основе технологии Power-Hardware-in-the-Loop для компонентов аккумуляторных систем, использующим электрохимическую модель литий-ионного аккумулятора на основе модели Шеперда-Тевенина для эмуляции поведения батареи в реальном времени. Ключевой особенностью стенда является схема эмулятора, подключенная к тестируемому зарядному устройству через общую шину постоянного тока, что позволяет возвращать поглощаемую энергию, устраняя необходимость в силовых инверторах и резисторах, значительно снижая энергопотребление. Специализированные регуляторы напряжения и тока компенсируют отклонения, стенд реализован на базе аппаратной платформы NI-DAQ PXI-6025e, и микроконтроллеров STM32, а также программного обеспечения LabVIEW и MATLAB с уникальными функциями ограничения и обработки считываемых сигналов. Автор продемонстрировал сравнение эмулируемых характеристик напряжения и состояния заряда с реальной литий-ионной батареей, подтвердил высокую точность эмуляции динамики аккумулятора и воспроизведение ключевых зон разрядной кривой (экспоненциальная, номинальная, падение напряжения), демонстрируя практическую применимость предложенного решения для тестирования в различных режимах.

В пятой главе автор описывает реализацию системы электроснабжения подъемно-транспортных механизмов складского комплекса с интеграцией аккумуляторной батареи и возобновляемых источников энергии. Разработанное решение обеспечивает энергетическую автономность кранов-штабелеров за счет рекуперации энергии торможения и гибкого управления потоками энергии посредством двунаправленных преобразователей. Система демонстрирует устойчивую работу в различных сценариях: при отключении от сети, пиковых нагрузках и взаимодействии с солнечными панелями. Векторное управление асинхронными электроприводами гарантирует точное поддержание скоростей

приводов, а анализ потребляемой энергии подтверждает возможность автономной работы до 2,18 суток при 200 циклах/день с учетом рекуперации 70% энергии. Ключевым преимуществом стало сохранение рабочих характеристик крана без перенастройки при любых изменениях в системе питания.

Экспериментальные результаты подтвердили эффективность предлагаемой автором архитектуры: стабильное напряжение аккумуляторной батареи при смене направления потока мощности, компенсация провалов генерации солнечных панелей за 1,5 сек, восстановление сетевых параметров при гибридном питании. Применение нечеткого алгоритма для управления двунаправленным DC/DC преобразователем позволило оптимизировать распределение энергии между кранами, улучшив состояние батарей. Внедрение системы в проект ООО «Рухло» (г. Екатеринбург) подтвердило практическую значимость разработки, обеспечив снижение энергопотребления на 15-20% за счет устранения рассеивания энергии на резисторах и использования рекуперированной энергии.

В заключении приводятся общие выводы по работе и приводятся рекомендации по развитию темы.

В приложениях содержатся копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и патента на изобретение, а также дополнительные результаты по главам диссертации.

Научная новизна и практическая значимость полученных результатов

В мире активно развиваются системы электроснабжения подъемно-транспортных механизмов и Микросети, однако вопросы создания комплексных решений, интегрирующих силовую электронику, управление и системы для проведения испытаний для групп таких механизмов в складских комплексах, освещаются недостаточно полно. В данной работе представлено законченное решение для системы управления электроснабжением стеллажных кранов-штабелеров в составе Микросети. Разработана структура системы электроснабжения группы подъемно-транспортных механизмов с аккумуляторной батареей, обеспечивающая эффективную работу в сетевых и автономных режимах Микросети, а также методика комплексного обоснования выбора типа и параметров регуляторов мощности, учитывающая доступность локальных источников, специфику склада и требования питающей сети. При этом предложена методика расчета и реализации резонансного DC-DC-преобразователя с фазовым управлением для зарядных устройств, обеспечивающая широкий диапазон регулирования напряжения и минимальные потери переключения для гибкой интеграции аккумуляторов различных типов и емкостей, а также методика синтеза элементов силовой структуры и регуляторов эмулятора аккумуляторной батареи реального времени на основе

технологии PHiL, характеризующаяся простотой адаптации параметров для тестирования. Разработанные решения определяют особенности в подходе к проектированию и реализации высокоэффективных систем электроснабжения подъемно-транспортных механизмов в составе Микросети, не освещенные в отечественной и мировой литературе в достаточном объеме. Таким образом, можно заключить, что работа имеет явно выраженную научную новизну теоретических исследований и полученных практических результатов.

Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций для проектирования систем управления электроснабжением стеллажных кранов-штабелеров с применением аккумуляторных систем, обеспечивающих повышение эффективности и надежности энергоснабжения складских комплексов. Предлагаемое комплексное решение принято отделом перспективных разработок компании ООО «Рухло» (г. Екатеринбург) и рекомендовано для внедрения в систему энергоснабжения проектируемых складских комплексов, что подтверждает его реальную применимость и промышленный потенциал.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на 11 научных конференциях различного уровня.

Публикации. Основное содержание диссертационного исследования опубликовано в 17 научных работах, из них 6 статей опубликованы в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, включая 1 статью в издании, входящем в МБД Scopus и WoS; получен 1 патент РФ на изобретение и 2 свидетельства о гос. регистрации программ для ЭВМ.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, опубликованные статьи в полной мере отражают основные положения и результаты диссертационного исследования.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Основные научные положения диссертации, полученные выводы и сформулированные рекомендации в достаточной мере обоснованы и подтверждены результатами проведенных расчетов и экспериментов, которые базируются на апробированных научных положениях и методах исследования. Корректное использование проверенных научных методов исследования, базирующихся на фундаментальных основах теории автоматического управления, теоретических основ электротехники, теории электропривода, а также достаточная согласованность новых результатов с известными теоретическими положениями подтверждают достоверность результатов работы.

Обоснованность и достоверность прикладных результатов диссертации подтверждаются решением производственной компании об их внедрении в систему энергоснабжения проектируемых складских комплексов.

Вопросы и замечания по диссертации и автореферату

1. Уточните, зачем нужна структура Микрогрид на комплексах кранов-штабелеров? Чего не хватает в нынешней системе электроснабжения этих комплексов?

2. Как соотносится стоимость дополнительного оборудования со стоимостью самой системы крана-штабелера? И какова стоимость сэкономленной электроэнергии при использовании гибридной системы электроснабжения?

3. С какой целью в главе 5 применён конденсатор, включённый параллельно с литий-ионной аккумуляторной батареей? Как рассчитывается его емкость?

4. Каковы различия между типом рассматриваемого крана-штабелера и другими типами подъемно-транспортных механизмов? Может ли предлагаемая система электропитания напрямую использоваться для других подъемно-транспортных механизмов?

5. Почему рекуперирование энергии обсуждается только для механизмов вертикального перемещения? Как рекуперированная мощность влияет на эффективность электротехнического комплекса?

6. Каково обоснование принятого к рассмотрению в главе 3 уровня напряжения-тока-мощности, и почему для зарядки аккумулятора был выбран резонансный преобразователь? Обычно эти преобразователи используются в промышленных приложениях с меньшей мощностью. Обоснуйте выбор этого типа преобразователя.

Общее заключение по работе

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что диссертационная работа Джассим Х. М. Д. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научно-техническом уровне, написана логически последовательно, корректным с научной и технической точки зрения языком, обладает внутренним единством, результаты работы достоверны, обладают научной новизной и практической значимостью.

Оценивая уровень работы в целом, считаю, что диссертация Джассим Х. М. Д. «Microgrid-Based Power Supply Control System For Stacker Cranes / Система управления электроснабжением кранов-штабелеров на основе Микрогрид», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, вносит существенный вклад в решение важной научно-технической задачи

повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов и соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «УрФУ», в том числе п. 9, 10 и 14, а её автор – Джассим Хайдер Майтам Джассим, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальностям 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» и 2.4.3 – «Электроэнергетика».

Официальный оппонент:

профессор кафедры автоматизированного
электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО
«Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»,
доктор технических наук,
профессор

_____ Сарваров Анвар Сабулханович

« 5 » _____ 2025 г.

455000 Россия, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
УК1: 12.

Кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники,
Тел.: +7 (3519) 22-45-87,
e-mail: anvar@magtu.ru

Подпись А. С. Сарваров заверяю:

