

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента
Суслова Константина Витальевича на диссертацию

Токарева Ивана Сергеевича

«Электротехнические комплексы газовой отрасли с многофункциональным применением систем накопления электроэнергии», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

На отзыв представлена рукопись и автореферат диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 301 наименование, и 9 приложений.

Диссертация изложена на 341 странице машинописного текста, содержит 76 рисунков и 55 таблиц.

1. Актуальность темы диссертационной работы

Для предприятий газовой отрасли характерны следующие особенности: сложные климатические условия, категоричность электроснабжения, большие потребляемые мощности, разнообразный технологический процесс, формирующие различные графики нагрузки, наличие вращающегося резерва, удаленность крупных производственных объектов от централизованных сетей, повышенными требованиями к бесперебойному электроснабжению.

Стоит отметить, что существующие подходы к проектированию и строительству систем энергоснабжения не позволяют обеспечить бесперебойность работы систем электроснабжения, что влечет значительные экономические издержки, которые могут исчисляться миллиардами рублей в денежном эквиваленте. Безусловно, актуальным остается вопрос повышения энергоэффективности производства, так как особенности электротехнических комплексов газовой отрасли позволяют внедрять современные высокотехнологичные решения любой направленности.

Комплексное решение задач, связанных с обеспечением бесперебойности и энергоэффективного функционирования электротехнических комплексов газовой отрасли, возможно за счет внедрения систем накопления электроэнергии (СНЭЭ) в состав генерирующего оборудования систем электроснабжения производственных объектов добычи, транспорта, хранения и переработки газа с целью получения синергетического эффекта при их совместном функционировании.

В связи с указанным, тема диссертации Токарева Ивана Сергеевича «Электротехнические комплексы газовой отрасли с многофункциональным применением систем накопления электроэнергии» является актуальной, представляет научный и практический интерес.

2. Научная новизна работы

Выводы и рекомендации, полученные в диссертации, обоснованы и достоверны, так как они базируются на результатах известных работ ведущих отечественных и зарубежных ученых в области построения энергоэффективных систем электроснабжения, применения систем накопления электроэнергии, обеспечения бесперебойной работы высоковольтного электропривода.

Новизна научных выводов и рекомендаций заключается в разработке методологии исследования на основе многофакторного системного анализа, позволяющая создать обобщённую концепцию применения СНЭЭ в составе электротехнических комплексов газовой отрасли. Автором предложен алгоритм расчета основных параметров систем электроснабжения, в основе которого лежит адаптированный для условий газовой отрасли показатель нормированной стоимости электроэнергии. Разработаны алгоритмы управления электротехническими комплексами большой мощности со СНЭЭ по принципам «жестких правил» и «динамического планирования», позволяющие добиться повышения эффективности функционирования электротехнического комплекса. Обоснованы метод выбора параметров и алгоритм управления системой накопления электроэнергии в составе электроприводного динамического оборудования газоперерабатывающих комплексов, в совокупности, обеспечивающие бесперебойную работу при провалах напряжения и кратковременных прерываниях питания.

3. Практическая значимость диссертационной работы

Значение полученных автором результатов исследований для практики подтверждается следующим:

- предложены практические рекомендации по выбору схемно-технических решений, компонентного состава, режимов работы и способов использования СНЭЭ в составе электротехнических комплексов объектов добычи, транспорта и переработки газа;

- установлено, что выбор в качестве целевой функции минимизацию усовершенствованного показателя LCOS позволяет проводить отбор наиболее эффективных комбинаций функций СНЭЭ при определении параметров системы, а также проводить комплексный анализ технико-экономических показателей при внедрении СНЭЭ в систему электроснабжения предприятия;

- выявлен положительный экономический эффект от внедрения СНЭЭ на реальных объектах генерации добычи и транспортировки газа, так, при замещении вращающегося резерва экономия капитальных затрат будет эквивалентна стоимости одного электроагрегата в составе ЭСН (минимум

150 млн. рублей) и эксплуатационных затрат до 50 млн рублей в год (на примере ЭСН с газопоршневыми электроагрегатами мощностью 1500 кВт);

– выявлен положительный экономический эффект от внедрения СНЭЭ на базе суперконденсаторов в составе технологического оборудования на комплексе по производству СПГ ПАО «Газпром» с обеспечением бесперебойного электроснабжения при нарушениях в работе внешней питающей сети. Положительный эффект от внедрения может достигать более 1 млрд. рублей в год (экономические издержки от одного останова до 90 млн. рублей);

– результаты работы использованы в ПАО «Газпром» при разработке проектов в части автономного электроснабжения от электростанций собственных нужд и в рамках выполнения НИОКР (проект реализуется в ООО «Газпром трансгаз Ухта»);

– получены акты внедрения результатов исследования в ПАО «Газпром», ООО «Газпром трансгаз Ухта», ООО «Газпром СПГ Портовая». Акты внедрения результатов исследования утверждены протоколом совещания Минэнерго России от 25.12.2024 г.

4. Степень обоснованности и достоверности защищаемых положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные результаты, полученные в диссертационном исследовании, сформулированы автором в четырех положениях, выносимых на защиту.

При доказательстве *первого защищаемого положения* автором выполнено комплексное исследование проблематики эксплуатации электротехнических комплексов объектов добычи, транспорта и переработки газа в части обеспечения бесперебойного электроснабжения, проведен анализ существующих схемно-технических решений, состава оборудования, графиков электрических нагрузок. Установлено, что задачи, связанные с обеспечением бесперебойной работы и энергоэффективного электроснабжения электротехнических комплексов газовой отрасли, требуют разработки новых подходов к проектированию и строительству систем энергоснабжения с применением опыта современных исследований в данной области, в том числе с использованием систем накопления электрической энергии. Определены теоретические предпосылки многофункционального применения СНЭЭ в различных топологиях систем электроснабжения электротехнических комплексов газовой отрасли. Разработана методология исследования функционирования СНЭЭ в составе электротехнических комплексов объектов газовой отрасли на основе системного подхода к решению проблемы обеспечения бесперебойного и энергоэффективного электроснабжения. Применение данной методологии позволит сформировать набор рациональных методов расчета и алгоритмов функционирования СНЭЭ с учетом требований и ограничений ЭТК газовой отрасли.

При доказательстве *второго защищаемого положения* автором выполнен комплексный анализ мирового и российского рынка технологий накопления электроэнергии, а также параметрический анализ электрохимических и электрических накопителей. Получено два свидетельства о государственной регистрации баз данных электрохимических и электрических накопителей энергии. Разработан метод выбора основных параметров СНЭЭ с использованием в качестве целевой функции минимизацию модернизированного показателя LCOS. Отличительной чертой представленного метода является попытка учесть multifunctionality СНЭЭ как с технической, так и с экономической точки зрения внедрения подобных систем.

Выявлен положительный экономический эффект от внедрения СНЭЭ на реальных объектах газовой отрасли. Так, при замещении вращающегося резерва экономия капитальных затрат будет эквивалентна стоимости одного электроагрегата в составе ЭСН (минимум 150 млн рублей) и эксплуатационных затрат до 50 млн рублей в год (на примере ЭСН с газопоршневыми электроагрегатами мощностью 1500 кВт).

Доказано, что применение СНЭЭ для выравнивания графика электрических нагрузок в автономных системах электроснабжения целесообразно, так как, согласно расчетам, даже незначительное изменение коэффициента заполнения до 0,01 позволит добиться экономии топливного газа в денежном эквиваленте до 2 000 000 руб. в год.

При доказательстве *третьего защищаемого положения* автором разработаны два типа алгоритмов для управления распределением энергии в электротехнических комплексах объектов газовой отрасли, включающих СНЭЭ. Для объектов промышленности всех типов энергоснабжения может быть использован адаптированный алгоритм «динамического планирования». Для объектов со смешанным и автономным энергоснабжением подходит алгоритм «жестких правил». Алгоритм жестких правил работает параллельно с электротехническим комплексом и оперативно принимает решения о действиях системы управления на каждом следующем интервале времени, при этом обладает сравнительно небольшой вычислительной мощностью, но не позволяет оптимизировать ряд стоимостных и технологических параметров. Алгоритм «динамического планирования» подходит в первую очередь для систем смешанного энергоснабжения, но может быть адаптирован для систем автономного энергоснабжения. Работа алгоритма предполагает использование отдельно предсказанных данных по нагрузке и производству электроэнергии, результатом становится построение расписания работы электротехнического комплекса на сутки вперед. В алгоритме используются методы математического моделирования работы системы, а также многокритериальной оптимизации по техническим и экономическому

показателям, что одновременно определяет его значительную вычислительную сложность. Тем не менее, сделан вывод о рациональности применения алгоритма «динамического планирования».

Доказано, что применение разработанного алгоритма управления и планирования работы электротехнического комплекса позволяет рационально распределять требуемую на нагрузке мощность между электростанцией собственных нужд, централизованной энергосистемой и системой накопления электроэнергии.

При доказательстве *четвертого защищаемого положения* автором реализован новый подход к выбору суперконденсаторов для СНЭЭ, основа которого построена на ряде выявленных математических зависимостях, а именно параметров системы накопления электроэнергии от параметров единичных суперконденсаторных батарей. Разработан алгоритм выбора СК с параметрами, отвечающими технической и экономической эффективности функционирования СНЭЭ, в качестве примера результата работы алгоритма была выбрана система накопления электроэнергии, состоящая из суперконденсаторов. Составлен алгоритм работы СНЭЭ на базе суперконденсаторных батарей в составе электротехнического комплекса, обеспечивающий бесперебойную работу частотно-регулируемого электропривода и определяющий порядок действий накопителя при возникновении в питающей сети провалов и прерываний напряжения.

Выполнена оценка экономической эффективности внедрения разработанной СНЭЭ в составе электротехнического комплекса, обеспечивающий бесперебойную работу частотно-регулируемого электропривода, в результате которой получены следующие показатели: срок окупаемости без учета инвестиционного года – 1 останов предприятия или 0,167 года; капитальные вложения с НДС с учетом преобразовательной техники – 195 млн. руб.; экономический эффект за расчетный период 1,2 млрд. рублей за первый год и 34,8 млрд. за 25 лет.

Все защищаемые положения, сформулированные в диссертационной работе, соответствуют названию диссертации и цели исследования, являются обоснованными и опираются на результаты выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований. Полученные в работе результаты являются новыми и могут быть использованы при решении задач обеспечения бесперебойного и энергоэффективного функционирования электротехнических комплексов газовой отрасли.

5. Общая оценка содержания диссертации

Токарев Иван Сергеевич выполнил работу на актуальную тему, подтвердил широкий кругозор, хорошее знание проблемы, выполнил значительный объем теоретических и экспериментальных исследований. Диссертация и автореферат написаны грамотно, материал изложен

последовательно и логично. Содержание автореферата соответствует основным идеям и выводам диссертации. На все используемые литературные источники имеются ссылки.

В диссертации приведено достаточное количество иллюстративного материала, такого как рисунки, таблицы, графики, что обеспечивает наиболее полное понимание изложенной информации.

Основные положения работы докладывались на международных конференциях и симпозиумах. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 37 печатных работах, в том числе в 12 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 1 статье - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования *Scopus*. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации баз данных и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

6. Замечания по диссертационной работе

1. Замечания к оформлению рукописи диссертации. Автор допустил некоторое количество орфографических ошибок для докторской диссертации. Также отсутствует единообразие при оформлении блок-схем разработанных алгоритмов. При этом вызывает вопросы способ отображения разработанных алгоритмов, например, на страницах 223-225 алгоритм разделен на две части, что усложняет восприятие и понимание последовательности действий. Возможно, следовало бы выбрать другой способ отображения блок-схемы, либо вынести данную информацию в приложения.

2. Замечание методологического характера. Цель и задачи исследования должны формулироваться по результатам обзора и анализа известной информации по теме исследования, которые выполняются в первой главе. Понятно, что пункты «Цель работы» и «Задачи исследования» приведены в общей характеристике работы. Но их желательно продублировать после выводов, полученных в первой главе диссертации. Необходимо таким образом показать, что цель и задачи исследования логично вытекают из результатов анализа научно-технической информации, выполненного в первой главе.

3. Автором разработан метод выбора основных параметров СНЭЭ с использованием в качестве целевой функции минимизацию модернизированного показателя нормированной стоимости накопления электроэнергии. Применение предложенного метода на практике описано при выполнении технико-экономического обоснования применения СНЭЭ на примере реального объекта газовой отрасли – компрессорной станции

«Ярынская» ООО «Газпром трансгаз Ухта» (стр. 152-157 рукописи диссертации). Следует пояснить, чем предложенные автором методические подходы отличаются от известных из технической литературы. Например, от изложенных в работах В.М. Зырянова, В.Д. Мельникова, Г. Б. Нестеренко, Г.А. Пранкевича и др.

4. В пункте 4 «научная новизна работы» указывается, что в ходе выполнения исследования «разработан алгоритм функционирования электротехнического комплекса большой мощности со СНЭЭ по принципу «динамического планирования»». Следует пояснить, к какому методу математической оптимизации относится разработанный принцип? Какой критерий подтверждает рациональность применения предложенного принципа?

5. На странице 174 рукописи сказано «помимо прогнозных данных о нагрузках на сутки вперед, необходимо получить прогнозные данные о состоянии заряда аккумулятора (*SOC – state of charge*) на начало следующих суток». Рассматривались ли возможные методы прогнозирования указанных данных, и как влияет точность прогноза на работу представленного алгоритма?

6. При доказательстве четвертого научного положения автором предложен метод на базе нового аналитического подхода к выбору параметров и способа соединения суперконденсаторов, который позволяет определить рациональную структуру системы накопления электроэнергии (стр. 204-221 рукописи диссертации). Почему в предложенной методике рассматривается только строго последовательно-параллельное соединение элементов между собой? Почему отказались от возможности использовать «вариативное» соединение элементов? Также известно, что у суперконденсаторных накопителей, в отличие от аккумуляторных батарей, высокий саморазряд, брался ли в расчет данный показатель при составлении методики выбора накопителя?

7. Заключение

Диссертация **Токарева Ивана Сергеевича** на тему «Электротехнические комплексы газовой отрасли с многофункциональным применением систем накопления электроэнергии» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная проблема по обеспечению бесперебойности и повышению энергоэффективности электроснабжения в крупнейшей обособленной отрасли народного хозяйства и имеет высокую значимость для промышленности России.

Диссертация выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Цель и задачи исследования соответствуют уровню диссертации на соискание степени доктора наук. Полученные результаты достоверны и

обоснованны. Приведенные в настоящем отзыве замечания не снижают научной и практической ценности диссертации.

Представленная на отзыв диссертация соответствует требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», утвержденного приказом ректора Горного университета от 20.05.2021 № 953 адм., а её автор – **Токарев Иван Сергеевич** – заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент, доктор
технических наук, доцент, профессор
кафедры гидроэнергетики и
возобновляемых источников энергии,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»



Суслов
Константин
Витальевич

01.10.2025

Даю согласие на внесение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.
Константин Витальевич Суслов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Адрес: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

Телефон: +7 495 362-70-01, e-mail: SuslovKV@mpei.ru

Web-сайт организации: <https://mpei.ru/>

Подпись Суслова К.В. заверяю

