



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
г. Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

№ _____
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе


Ю.В. Фомин
2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»**

на диссертацию Токарева Ивана Сергеевича

**на тему «Электротехнические комплексы газовой отрасли
с multifunctional 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

Диссертационная работа посвящена вопросам обеспечения
бесперебойности и энергоэффективного функционирования

электротехнических комплексов предприятий газовой отрасли за счет применения систем накопления электроэнергии (СНЭЭ) в состав генерирующего оборудования систем электроснабжения.

Актуальность темы диссертационных исследований несомненна и обусловлена следующими важными аспектами:

1. Несовершенство существующей топологии построения электротехнических комплексов газовой отрасли в части обеспечения бесперебойной работы технологического оборудования при провалах напряжения, кратковременных прерываниях питания и переходе на резервный источник питания и на период работы противоаварийной автоматики.

2. Необходимость разработки технических решений, удовлетворяющих специфическим требованиям к электрооборудованию и системам электроснабжения объектов ПАО «Газпром». Особенности рассматриваемых систем заключается в сложных климатических условиях, наряду со спецификой технологических процессов, возможностью образования взрывоопасных смесей, наличием агрессивных газов, нестабильностью нагрузок, концентрацией больших мощностей, колебаниями напряжения в электрической сети при пуске агрегатов большой единичной мощности в большинстве случаев, удаленность от существующих электрических сетей и т.п.

3. Современный уровень развития технологий накопления электроэнергии позволяет за счет внедрения данных устройств выполнять одновременно несколько задач, связанных с улучшением качества вырабатываемой электрической энергии, оптимизировать режимы работы генерирующего оборудования и затрат на приобретение электроэнергии, а также обеспечить бесперебойное электроснабжение.

4. В настоящий момент отсутствует четкий механизм интеграции систем накопления электроэнергии в структуру электроснабжения объектов газовой отрасли, как в части объектов генерации, так и в части технологического оборудования.

2. Научная новизна работы

Научная новизна результатов выполненного диссертационного исследования состоит в следующем:

- разработана оригинальная методология исследования на основе многофакторного системного анализа, позволяющая создать обобщённую концепцию применения СНЭЭ в составе электротехнических комплексов газовой отрасли при условии их многофункционального использования;
- разработан усовершенствованный способ расчета показателя нормированной стоимости накопления электроэнергии;
- разработан метод выбора основных параметров СНЭЭ с использованием в качестве целевой функции минимизации модернизированного показателя нормированной стоимости накопления электроэнергии;
- разработан алгоритм управления электротехнического комплекса большой мощности со СНЭЭ по принципу «жестких правил», обеспечивающий перераспределение электроэнергии, вырабатываемой за счет ЭСН;
- разработан алгоритм функционирования электротехнического комплекса большой мощности со СНЭЭ по принципу «динамического планирования», основанный на распределении требуемой для работы системы электроэнергии между активами ЭТК, позволяющий оптимально и эффективно с технико-экономической точки зрения обеспечивать автономное или смешанное электроснабжение промышленных потребителей;
- разработан метод выбора параметров СНЭЭ в составе электроприводного динамического оборудования газоперерабатывающих комплексов на базе полученных математических зависимостей количества применяемых суперконденсаторов от их номинальных параметров;
- разработан алгоритм управления СНЭЭ на базе суперконденсаторов, учитывающий функционально-параметрические особенности работы накопителя и электротехнического комплекса, главным

образом обеспечивающий бесперебойную работу электроприводного динамического оборудования газоперерабатывающих комплексов при провалах напряжения и кратковременных прерываниях питания.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается следующим:

- применением фундаментальных классических теорий, таких как теория обобщенной электрической машины, теория электропривода, теория временных рядов, для описания разрабатываемых теоретических моделей и алгоритмов, объяснения взаимосвязей и динамики исследуемых физических процессов в ЭТК и системах их управления;

- непротиворечивостью сформулированных автором теоретических утверждений и полученных по разработанным моделям и методикам количественных результатов и результатов независимых исследований, опубликованных в открытых рецензируемых научных источниках информации;

- полученные результаты исследований по отдельным направлениям согласуются с аналогичными результатами отечественных и зарубежных авторов. Также достоверность результатов исследований подтверждается положительным опытом эксплуатации СНЭЭ на объектах ПАО «Газпром», которые включены в реестр инновационной продукции, рекомендованной к внедрению.

Вынесенные на защиту научные положения и основные выводы логически связаны с целью и идеей диссертации, а полученные в ней результаты, несомненно, обладают новизной в области обеспечения бесперебойного и энергоэффективного функционирования электротехнических комплексов газовой отрасли.

4. Научные результаты, их ценность

Научные результаты диссертационного исследования и их ценность

закljučаются:

– в формировании методологии 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;

– в разработке метода выбора основных параметров СНЭЭ с использованием в качестве целевой функции минимизацию модернизированного показателя LCOS. Отличительной чертой представленного метода является попытка учесть многофункциональность СНЭЭ как с технической, так и с экономической точки зрения внедрения подобных систем;

– в разработке алгоритмов для управления распределением энергии в электротехнических комплексах объектов газовой отрасли, включающих СНЭЭ. Доказано, что применение разработанного алгоритма управления и планирования работы электротехнического комплекса позволяет рационально распределять требуемую на нагрузке мощность между источниками энергии;

– в разработке алгоритмов выбора параметров и управления СНЭЭ на базе суперконденсаторов в составе электротехнического комплекса, обеспечивающий бесперебойную работу частотно-регулируемого электропривода. Выполнена оценка экономической эффективности внедрения разработанных алгоритмов, 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.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени

освещены в 37 печатных работах в том числе в 12 статьях из перечня ВАК, 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.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что:

- доказана возможность и необходимость применения СНЭЭ для выполнения нескольких функций в составе электротехнических комплексов газовой отрасли;

- 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;

- 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);

- определен 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.

6. Замечания по диссертационной работе

1. В формуле (3.18) на стр. 144 диссертации для расчета удельной стоимости накопления энергии LCOS емкость СНЭЭ (переменная MWht) находится в знаменателе, поэтому с математической точки зрения представляется, что с ее увеличением рассматриваемый показатель будет снижаться вплоть до нуля. Тем не менее, на рис. 3.10 (красная кривая) отчетливо видно, что с увеличением номера сценария, который как раз и предполагает повышение MWht, удельная стоимость выходит на некоторое постоянное значение (примерно 28 руб/кВт·ч). За счет каких дополнительных факторов это происходит?

2. В предложенном автором алгоритме управления системы накопления (рис. 4.1, стр.167 диссертации), по сути, происходит сравнение генерации газотурбинной/газопоршневой установки и текущей нагрузки и в зависимости от дефицита или избытка мощности перевод СНЭЭ в режим выдачи либо потребления. Если генерация ГТЭС/ГПЭС представляется известной величиной, то определение мощности нагрузки может быть существенно затруднено. Каким образом автор получает мощность нагрузки в конкретной схемно-режимной ситуации?

3. На стр. 99-103 диссертации выполнено моделирование аккумуляторной батареи в Simulink с построением кривых переходных процессов, однако никакого продолжения, например, для схемы, показанной на рис. 5.1 (стр.204) с суперконденсатором, это не получило, хотя представляется логичным построить такую модель для обоснования внедрения СНЭЭ с ее верификацией по данным в частности таблицы 5.1 (стр. 206).

4. Работа в основном посвящена управлению активной мощностью СНЭЭ, при этом никак не упоминается проблематика влияния реактивной

мощности, хотя функционал накопителей позволяет решать и задачи, связанные с регулированием напряжения, особенно в ЭЭС с преобладающей двигательной нагрузкой.

5. В диссертации присутствует значительное количество опечаток и орфографических ошибок, что присуще каждой научной рукописи.

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.

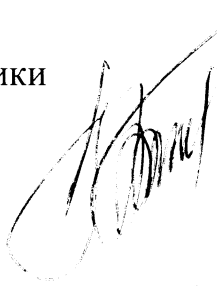
Диссертация выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Цель и задачи исследования соответствуют уровню диссертации на соискание степени доктора наук. Полученные результаты достоверны и обоснованны. Приведенные в настоящем отзыве замечания не снижают научной и практической ценности диссертации.

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.

Отзыв на диссертацию и автореферат Токарева Ивана Сергеевича подготовлен, обсужден и утвержден на заседании Высшей школы энергетических систем Института энергетики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский

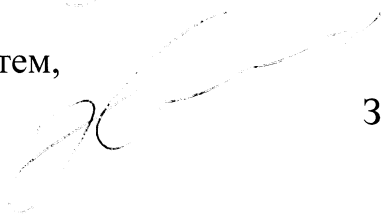
политехнический университет», протокол № 09-1 от 16.09.2025 г. Доклад Токарева Ивана Сергеевича заслушан на данном заседании.

Директор Института энергетики
д.т.н., доцент



Барсков Виктор Валентинович

Председатель заседания:
Директор Высшей школы
электроэнергетических систем,
к.т.н., доцент



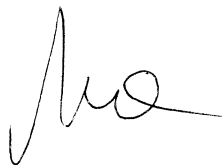
Зверев Сергей Геннадьевич

Рецензент:
Профессор Высшей школы
электроэнергетических систем,
д.т.н., доцент



Беляев Андрей Николаевич

Секретарь заседания:
Старший преподаватель Высшей
школы электроэнергетических
систем



Люлина Мария Александровна

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»

Адрес: ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251

Телефон: (812)775-05-30, (800)707-18-99

Адрес электронной почты: office@spbstu.ru

Сайт: <https://www.spbstu.ru/>

Высшая школа электроэнергетических систем

тел.: (812)552-50-72

e-mail: esis@spbstu.ru

Исп. Иванов Дмитрий Владимирович, +7-921-348-64-16