

На правах рукописи



Пранкевич Глеб Александрович

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ВЫБОРА
ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ КАК ЭЛЕМЕНТА
ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

Специальность 05.14.02 — Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Зырянов Вячеслав Михайлович**,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент

Официальные оппоненты: **Новиков Николай Леонтьевич**,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» (г. Москва), заместитель научного руководителя;

Смоленцев Николай Иванович,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (г. Новосибирск), ректорат, помощник ректора по научной работе.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Защита диссертации состоится «14» апреля 2022 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации www.nstu.ru

Автореферат разослан «__» января 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. За последние десятилетия технологии накопления энергии, применяемые в электроэнергетике, получили значительное развитие. Существенно снизилась стоимость компонентов систем накопления энергии (СНЭ), что повысило рентабельность проектов с применением СНЭ. Особенно активизировался интерес к накопителям энергии с появлением быстродействующих СНЭ с временем отклика менее периода промышленной частоты.

Министерством энергетики РФ в 2017 году опубликована концепция развития рынка систем хранения энергии в РФ, в которой освоение и внедрение СНЭ в практику электроэнергетики определено как одно из ключевых направлений развития отрасли на ближайшую перспективу.

Современные быстродействующие СНЭ являются принципиально новыми для энергосистем РФ энергетическими силовыми устройствами, предназначенными для организации целенаправленного управляемого энергообмена в составе разного типа энергосистем для организации желаемого режима или для управления динамическими процессами.

Достаточно широко распространено мнение, согласно которому роль СНЭ в энергосистеме сводится лишь к роли источника бесперебойного питания. Но в действительности – это лишь одна (причём, далеко не основная) из функций, которые способна выполнять СНЭ. Накапливая энергию при её избытке в энергосистеме, сохраняя в течение достаточно длительного времени с приемлемым уровнем потерь и возвращая в нужный момент в энергосистему, СНЭ способна практически безынерционно управлять балансом активной мощности по любому заданному алгоритму в соответствии с решаемой задачей. Кроме этого СНЭ может выполнять функции устройства компенсации реактивной мощности, активного фильтра высших гармоник и средства компенсации несимметрии напряжения в трёхфазных сетях. Учитывая многофункциональность и высокое быстродействие систем накопления, нетрудно предположить, что при широком внедрении в электроэнергетику и при условии достижения значений мощности и энергоёмкости систем накопления, актуальных для ЕЭС, многие задачи регулирования и управления, в том числе противоаварийного, могут решаться с помощью СНЭ.

Возможны различные сценарии применения СНЭ в объединённых, изолированных, автономных энергосистемах. Примерами последних могут служить автономные системы электроснабжения предприятий нефтегазовой отрасли, промышленных предприятий, объектов строительства, и многих других объектов, имеющих собственные электростанции.

В силу новизны технологий СНЭ их освоение и внедрение в практику российской электроэнергетики начинается с относительно малых мощностей и

энергоёмкостей. В настоящее время в РФ реализуется ряд проектов со СНЭ в автономных энергосистемах, которые характеризуются высокой экономической и технической эффективностью.

Позитивный опыт реализации вышеупомянутых проектов позволит приступить к более масштабным проектам по применению СНЭ. Оценка их эффективности и целесообразности применения в ЕЭС и в изолированных энергосистемах требует детальной проработки в каждом рассматриваемом случае при условии надёжности и экономической доступности технологий.

СНЭ – многофункциональное устройство, его внедрение в состав энергосистемы придаёт ей новые свойства и характеристики, влияет на её схемно-режимные параметры, способы и методы управления. Новизна и многофункциональность СНЭ обуславливают необходимость разработки математических моделей, алгоритмов управления и методик выбора параметров для решения разнообразных задач. Для исследования работы СНЭ в составе энергосистемы для расчётов нормальных, переходных и аварийных режимов, электромагнитных и электромеханических переходных процессов необходимы соответствующие математические модели разной степени идеализации и детализации. Имеющиеся в настоящее время математические модели СНЭ в составе промышленных вычислительных комплексов далеко не в полной мере удовлетворяют потребностям специалистов.

Степень разработанности темы исследования. За последние два десятилетия обозначилось отставание нашей страны от общемирового уровня в практическом применении систем накопления энергии. В теоретических разработках это отставание не так ярко выражено, благодаря работам научных школ МЭИ, СибНИИЭ, НГТУ и др. Значительный вклад в развитие научного направления по применению накопителей энергии внесли такие российские учёные и специалисты, как: Астахов Ю.Н., Гулиа Н. В., Тер-Газарян А.Г., Бердников Р.Н., Н.Л. Новиков, Харитонов С. А., Смоленцев Н.И., Зырянов В.М., Смоленцев Д.О., Илюшин П.В., Глускин И.З., Якимец И.В., Кузнецов О.Н. и др.

Зарубежные разработки по тематике СНЭ представлены большим количеством публикаций. Вопросам применения СНЭ в электроэнергетических системах посвящены работы таких авторов, как: Boom R.W., Rogers J.D., Hassenzahl W.V., Masuda M., Shintomi T., Sato N., Robyns, B., François, B., Delille, G., Saudemont C, N.Shi, Dulout J., Amjad Anvari-Moghaddam, Adriana Luna, Bruno Jammes, Corinne Alonso, Sioshansi R. Madaeni, S.H. Denholm, Fossati J.P., M. Rampazzo, M. Luvisotto, N. Tomasone, I. Fastelli, M. Schiavetti и др.

Способность СНЭ выполнять различные функции управления вызывает значительный интерес к исследованиям в этой области, что в свою очередь стимулирует появление большого количества работ и публикаций по тематике СНЭ. Но так как освоение СНЭ – совершенно новое направление в

электроэнергетике, вопросов, на которые требуется искать ответы, задач, которые необходимо решать, перед исследователями и инженерами стоит ещё очень много.

Объект исследования – система накопления энергии в составе электроэнергетической системы.

Предмет исследования – математическая модель и методики выбора основных параметров СНЭ.

Цель работы – разработка математической модели и методики выбора основных параметров системы накопления электроэнергии.

Для достижения поставленной цели ставятся и решаются следующие задачи:

1. Формулирование требований к математической модели СНЭ для расчета электромеханических переходных процессов.
2. Разработка математической модели СНЭ, как элемента электроэнергетической системы.
3. Верификация разработанной математической модели.
4. Апробация математической модели при исследовании эффективности СНЭ для целей управления электромеханическими процессами в энергосистеме.
5. Разработка технологии обработки результатов мониторинга электроэнергетического объекта для выбора параметров СНЭ.
6. Разработка и апробация методики выбора и расчёта параметров СНЭ для актуальных функциональных назначений на основе результатов мониторинга.
7. Проведение натурных испытаний СНЭ в динамических режимах.

Методология и методы исследования. Для исследования характеристик и особенностей работы СНЭ в составе энергосистем использованы методы математического моделирования с использованием ПК Matlab, PowerFactory и натурные эксперименты.

В работе использованы теория автоматического управления, теория имитационного моделирования, теория обработки сигналов, теория непрерывного и быстрого преобразования Фурье, теория мгновенной мощности.

Научная новизна:

1. Предложен новый способ моделирования СНЭ, позволяющий рассчитывать переходные электромеханические процессы с учётом динамики энергообмена для различных типов подсистем накопления энергии.
2. Разработана математическая модель СНЭ, совместимая с основными промышленными вычислительными комплексами для расчёта переходных электромеханических процессов в энергосистемах с накопителями энергии.
3. Разработана методика выбора основных параметров СНЭ на основе анализа амплитудно-частотных характеристик графиков нагрузки для задач демпфирования колебаний мощности нагрузки заданной частоты.

4. Разработана методика выбора основных параметров СНЭ на основе анализа результатов расчета переходного процесса с заданным алгоритмом управления.

Практическая значимость работы:

1. Разработан способ построения математической модели СНЭ и получен патент на изобретение РФ RU 2736701 С1.

2. Модель СНЭ реализована в ППК Matlab Simulink и DigSilent PowerFactory, позволяет использовать её при выполнении НИР и НИОКР, выполнять расчёты режимов и переходных процессов в энергосистемах со СНЭ.

3. Наиболее актуально применение математической модели для разработки алгоритмов управления СНЭ и расчета её основных параметров в составе энергосистемы.

4. Внедрение результатов диссертационного исследования подтверждено двумя актами внедрения.

Теоретическая значимость работы. Разработана математическая модель СНЭ как элемента электроэнергетической системы, позволяющая рассчитывать и исследовать режимы и переходные электромеханические процессы.

Разработанная методика расчёта основных параметров накопителя энергии, основанная на результатах анализа частотных спектров нагрузочных характеристик, даёт эффективный и удобный для применения инструмент при проектировании СНЭ в составе энергосистемы. Методика применима, прежде всего, для тех областей использования СНЭ, в которых технологически необходим непрерывный (длительный) знакопеременный энергообмен между энергосистемой и накопителем.

Разработанная методика на основе анализа результатов переходного процесса при заданном алгоритме управления позволяет выполнить выбор основных параметров СНЭ по результатам расчёта переходного процесса при заданном алгоритме управления мощностью накопителя с учетом изменения его уровня заряда в процессе энергообмена с системой.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ моделирования, учитывающий взаимосвязь уровня заряда и располагаемой мощности, обеспечивает единство расчета переходных процессов в энергосистеме и в СНЭ.

2. Методика выбора основных параметров СНЭ на основе мониторинга режимных параметров электроэнергетического объекта и анализа амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) его графика нагрузки позволяет оптимизировать мощность и энергоёмкость накопителя при решении задач подавления нежелательных колебаний мощности при резкопеременном характере нагрузки.

3. Методика выбора основных параметров СНЭ по результатам расчёта переходного процесса по разработанной модели даёт минимально необходимые

значения мощности и энергоёмкости для реализации заданного алгоритма управления накопителем энергии.

Достоверность результатов работы подтверждена натурными экспериментами со СНЭ в составе электроэнергетической системы и расчётами с использованием промышленных ПВК.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), городской научно-практической конференции «Aspire to Science» в 2016 году в г. Новосибирске, на международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017» в 2017 году в г. Самара, всероссийской научно-технической конференции «Электропитание-2018» в 2018 году в г. Новосибирске, четырнадцатой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» в 2018 году в г. Новосибирске.

Публикации по теме исследования. По теме диссертации опубликовано 28 печатных научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ), 9 публикаций, индексируемых в наукометрических базах данных Scopus и Web of Science, 15 публикаций в сборниках материалов и трудов научных конференций, форумов всероссийского и международного уровня. Получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 62 наименования, и двух приложений. Общий объем работы составляет 159 страниц, включает 60 рисунков и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, внедрение и апробация полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена обзору мирового и отечественного опыта применения СНЭ в различных областях электроэнергетики. Современные технологии накопления энергии для ряда актуальных областей применения уже сегодня обеспечивают рентабельность проектов.

Быстродействие и многофункциональность современных СНЭ позволяют применять их для решения множества актуальных задач. В последние годы в РФ

активизируются работы по применению СНЭ в электроэнергетике. В настоящее время на территории РФ реализовано 16 проектов с применением СНЭ (без учета ГАЭС). Наиболее востребованы и перспективны СНЭ на базе литий-ионных аккумуляторов (ЛИА). В мировой практике использование СНЭ на ЛИА занимает первое место по количеству реализованных проектов.

Вторая глава посвящена математическому моделированию СНЭ в составе электроэнергетической системы.

Для оценки целесообразности разработки модели СНЭ (в составе энергосистем) для расчета электромеханических переходных процессов и установившихся режимов выполнен анализ применимости современных ПВК (PowerFactory, MATLAB – Simulink, ETAP, EUROSTAG, RUSTab, PSCAD) для подобных расчётов. Результаты анализа возможностей ПВК показали, что они либо не имеют в своем инструментарии готовые к использованию математические модели СНЭ, либо предлагаемые ими модели не учитывают в достаточной мере характеристики основных элементов СНЭ и особенности их функционирования в составе энергосистемы.

С учетом выявленных недостатков существующих моделей СНЭ и с учётом особенностей расчета электромеханических переходных процессов сформулированы следующие требования к разрабатываемой математической модели СНЭ:

1. Модель должна быть пригодна для моделирования основных актуальных типов СНЭ – на базе аккумуляторных батарей, суперконденсаторов, сверхпроводниковых индуктивных накопителей, электромеханических (кинетических) накопителей.

2. Модель должна устанавливать взаимосвязь основных параметров режима (токов, напряжений, мощностей) на зажимах СНЭ без учёта её внутренней структуры (принцип «чёрного ящика»).

3. Для расчёта режимов и переходных процессов в энергосистеме модель СНЭ должна быть совместима с ПВК, используемыми в практике расчётов режимов и переходных электромеханических процессов в энергосистемах по действующим значениям переменных.

4. Модель должна учитывать изменение заряда подсистемы накопления и изменение связанных с ним характеристик СНЭ в процессе энергообмена с системой.

5. Модель должна учитывать процесс саморазряда в подсистеме накопления.

6. Модель должна учитывать потери мощности в подсистемах преобразования и распределения при заряде/разряде СНЭ.

7. В модели должна быть предусмотрена возможность создания пользователем (исследователем) системы управления СНЭ верхнего уровня,

связывающую любой набор режимных параметров энергосистемы и желаемые значения активной и реактивной мощности на зажимах СНЭ.

Разработанная с учётом сформулированных требований математическая модель учитывает структуру, параметры, основные характеристики СНЭ. Модель позволяет вести расчет по действующим значениям переменных, что является необходимым условием для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистемах. Модель построена по модульному принципу. Любой элемент модели СНЭ при необходимости может быть изменен, удален или добавлен в зависимости от решаемых задач. Модель включает в себя основные подсистемы СНЭ, которые влияют на энергообмен в точке подключения к сети: подсистему накопления энергии, подсистему преобразования энергии, подсистему распределения энергии. Общая структурная схема модели СНЭ приведена на рисунке 1. В таблице 1 приведены параметры, которые необходимы для моделирования с использованием разработанной модели.

Таблица 1 – Параметры СНЭ при моделировании

Параметр СНЭ	Обозначение	Единицы измерения
Номинальная полная мощность подсистемы преобразования	S_H	кВ·А, МВ·А
Номинальная энергоемкость	W_H	МДж, кВт·ч, МВт·ч
Номинальная частота	f_H	Гц
Начальный уровень заряда	K_{3H}	о.е., %
Максимально допустимый уровень заряда	K_{3MAX}	о.е., %
Минимально допустимый уровень заряда	K_{3MIN}	о.е., %
Коэффициент саморазряда	K_{cp}	о.е./мес., %/мес.
Коэффициент полезного действия	$\eta_{CHЭ}$	о.е., %
Время реакции (отклика) СНЭ на ступенчатое возмущение	t_p	мс, с
Характеристика располагаемой мощности подсистемы накопления	$P_{расп.} = f(K_3)$	Зависимость мощности (кВт) от уровня заряда (%)

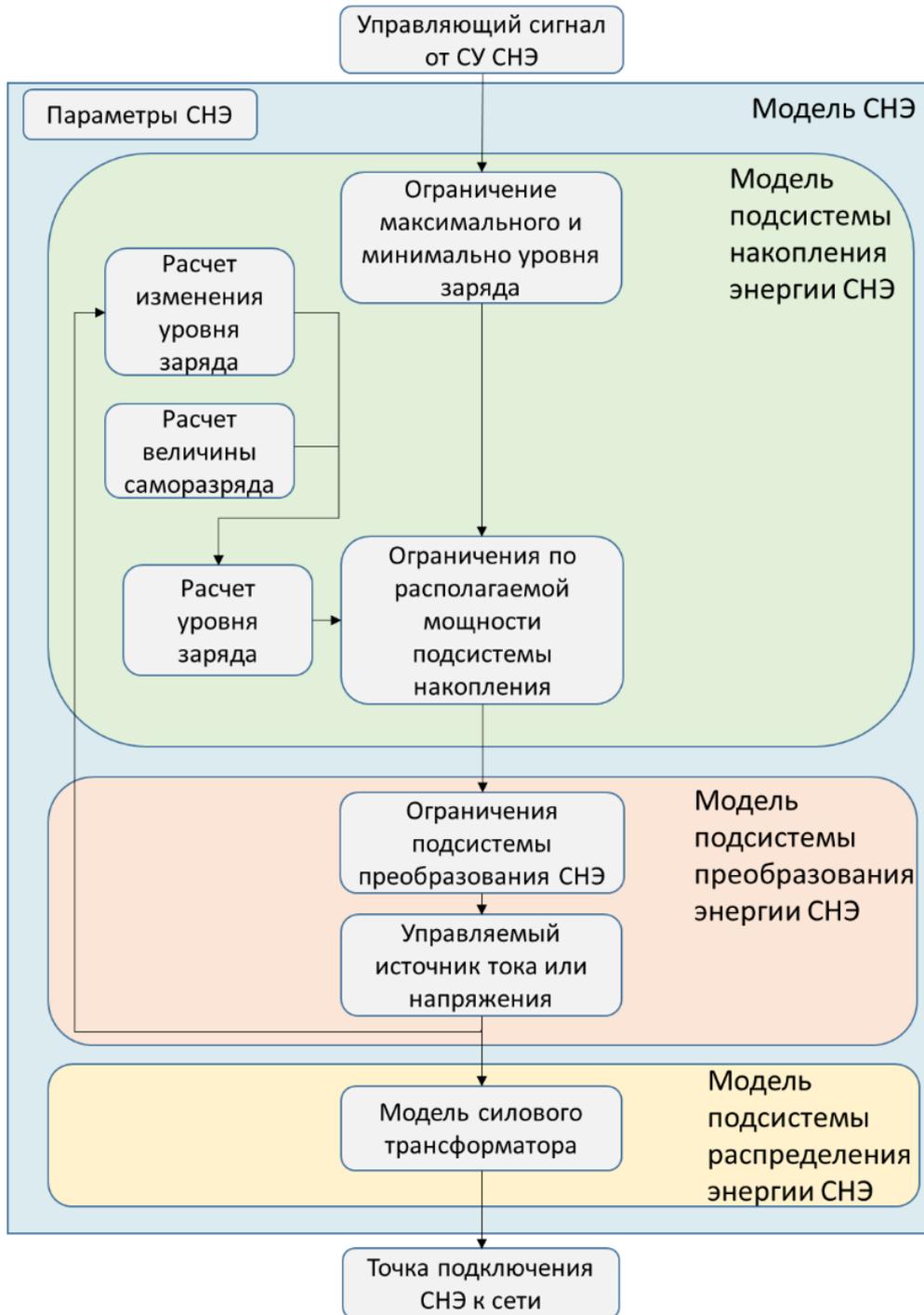


Рисунок 1 – Общая структурная схема модели СНЭ

В модели реализованы алгоритмы, учитывающие ограничения, которые возникают при работе СНЭ: ограничение минимального и максимального уровня заряда, ограничение по располагаемой мощности подсистемы накопления, ограничение полной мощности подсистемы преобразования.

Для расчета изменения запасённой энергии в процессе расчёта необходимо непрерывно вычислять интеграл мощности по времени:

$$\Delta W_{\text{CHЭ}} = \int_0^{\infty} P_{\text{ПН}} dt \quad (1)$$

Передаточная функция для расчета изменения запасенной энергии записывается следующим образом:

$$W_{\Delta\text{СНЭ}}(p) = P_{\text{ПН}} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{3600}, \quad (2)$$

где:

$P_{\text{ПН}}$ – активная мощность на зажимах подсистемы накопления;

$\frac{1}{p}$ – идеальное интегрирующее звено.

В модели учитывается процесс саморазряда. Передаточная функция для расчета величины саморазряда имеет вид:

$$W_{\text{СР}}(p) = K_{\text{СР}} \cdot \frac{1}{30 \cdot 24 \cdot 3600} \cdot \frac{1}{100} \cdot W_{\text{Н}} \cdot \frac{1}{p}, \quad (3)$$

где $K_{\text{СР}}$ – коэффициент саморазряда подсистемы накопления энергии,

$W_{\text{Н}}$ – номинальная энергоемкость подсистемы накопления СНЭ.

Процесс изменения запасенной энергии в подсистеме накопления имеет следующий вид:

$$W_{\text{зап.СНЭ}}(p) = W_{\text{Н}} \cdot K_{\text{ЗН}} - W_{\text{СР}}(p) - W_{\Delta\text{СНЭ}}(p), \quad (4)$$

где $K_{\text{ЗН}}$ – начальный (на момент начала расчёта) уровень заряда СНЭ.

При расчете электромеханических переходных процессов необходимо учитывать время отклика СНЭ, которое рассчитывается по выражению:

$$T_{\text{СНЭ}} = T_{\text{СУ}} + T_{\text{IGBT}} + T_{\text{ак.}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{СУ}}$ – время реакции системы управления СНЭ.

T_{IGBT} – время реакции двунаправленного АС/DC преобразователя.

$T_{\text{ак.}}$ – время реакции аккумуляторов СНЭ.

Третья глава посвящена верификации математической модели СНЭ. Верификация проводилась сопоставлением результатов натуральных опытов, выполненных на экспериментальной автономной энергосистеме в составе: ДГУ мощностью 125 кВА, ступенчато коммутируемая активно-индуктивная нагрузка и СНЭ мощностью 100 кВА и энергоемкостью 153 кВт·час, с результатами расчётов на математической модели.

На рисунках 2 и 3 приведены экспериментальные и расчётные осциллограммы опыта, во время которого СНЭ ограничивала минимальную и максимальную мощность ДГУ в границах – не менее 45 кВт и не более 65 кВт, независимо от мощности нагрузки. Разницу между мощностью нагрузки и ДГУ компенсировала СНЭ. На рисунках мощность ДГУ показана чёрным цветом, мощность нагрузки – оранжевым.

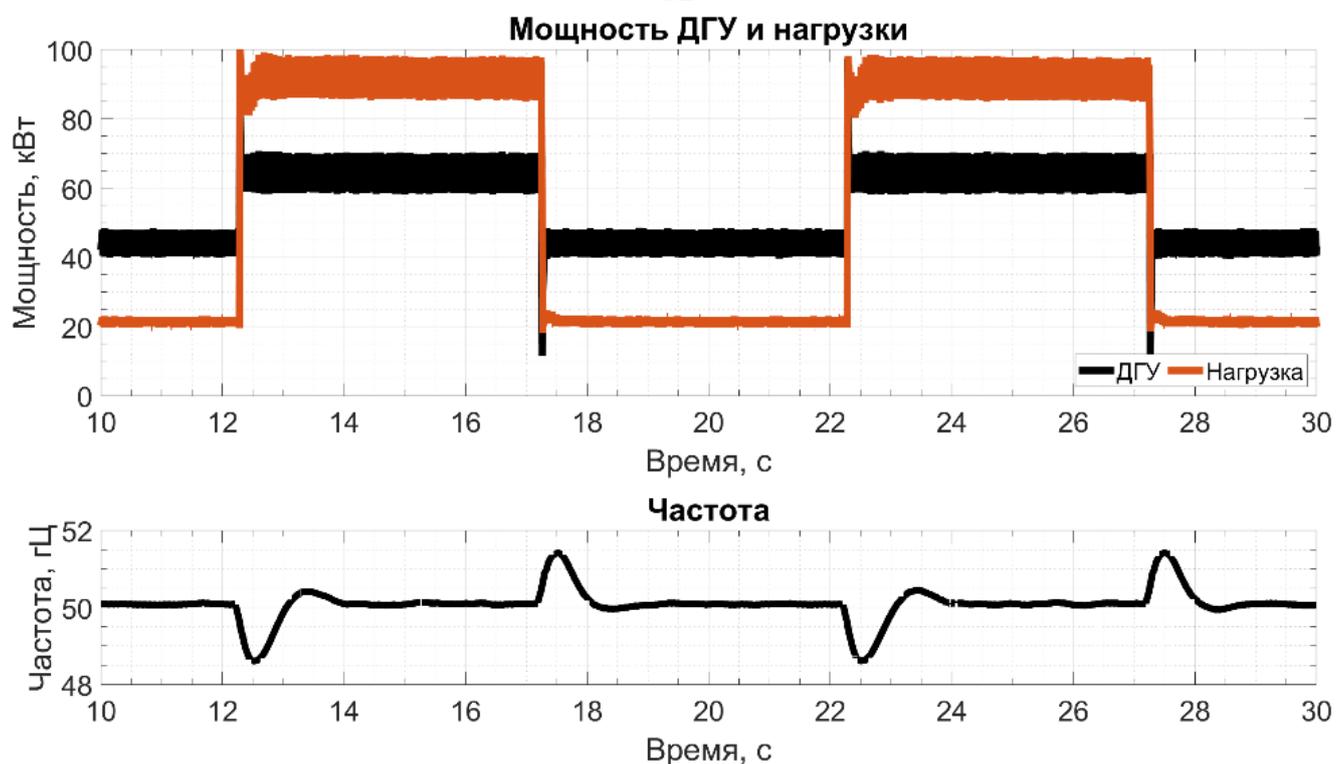


Рисунок 2 – Результаты натурального эксперимента СНЭ

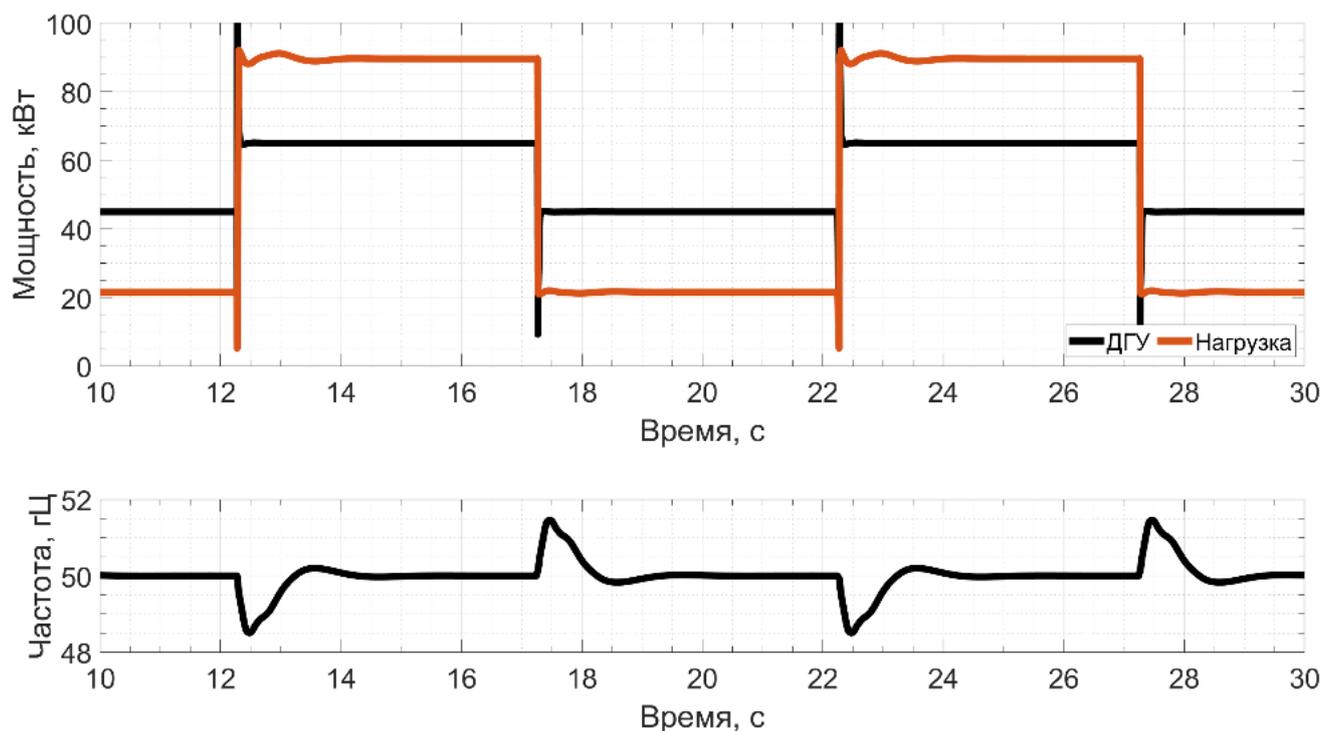


Рисунок 3 – Результаты расчетного эксперимента СНЭ

Математическая модель СНЭ для расчётов электромеханических переходных процессов показала достаточное для инженерных целей качественное и количественное совпадение результатов эксперимента и расчётов по основным характерным режимным параметрам. Количественно точность разработанной модели подтверждается сравнением результатов эксперимента и расчёта по ряду характерных режимных параметров, представленных в таблице 2.

Таблица 2 – Количественное сравнение параметров режима расчетного эксперимента с натурным

<i>Параметр</i>	<i>Натурный эксперимент</i>	<i>Расчетная модель</i>	<i>Отклонение, %</i>
Максимальная мощность ДГУ, кВт	45	45	0.00
Минимальная мощность ДГУ, кВт	65	65	0.00
Максимальная частота, Гц	51.3	51.1	0.39
Минимальная частота, Гц	48.7	48.9	0.41

Универсальность модели показана при расчете переходных процессов с разными типами накопителей. Примеры расчетов приведены для СНЭ с использованием в качестве аккумулирующего элемента ЛИА, суперконденсаторов, маховика. Модель также позволяет исследовать любые другие типы накопителей при известной (или рассчитанной) зависимости располагаемой мощности от уровня заряда, свойственной рассматриваемому типу аккумулирующего элемента.

Для иллюстрации возможностей математической модели выполнены расчёты переходных процессов в автономной энергосистеме подъёмного крана при использовании СНЭ на базе ЛИА (см. рисунок 4). Параметры СНЭ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры СНЭ на базе ЛИА GBS 100 Ah

№ п.п.	Параметр	Значение
1	Максимальная мощность, кВт	170
2	Энергоемкость, кВт·ч	50
3	КПД при заряде, о.е.	0,96
4	КПД при разряде, о.е.	0,96
5	Номинальное напряжение СНЭ, кВ	0,4
6	Тип аккумуляторов	Литий-железо-фосфат
7	Номинальная емкость единичного аккумулятора, А·ч	100
8	Номинальное напряжение единичного аккумулятора, В	3,2
9	Номинальное напряжение аккумуляторной батареи, В	503
10	Номинальный ток аккумулятора, А	300
11	Количество аккумуляторов в СНЭ, шт.	157
12	Тип соединения аккумуляторов в аккумуляторной батарее	Последовательное

В состав энергосистемы входят: источник электроэнергии – ДГУ; нагрузка – электроприводы механизмов подъёмного крана (характер нагрузки – циклический, резко переменный); на шины ДГУ подключена СНЭ. Система управления СНЭ настроена на одновременное выполнение двух функций (алгоритмов управления):

1. Ограничение максимальной и минимальной мощности ДГУ (работа ДГУ в заданном коридоре мощности 64 – 86.6 кВт).

2. Демпфирование резонансных частот графика нагрузки (алгоритм идентифицирует гармоники графика в диапазоне частот 0,3 – 3 Гц, затем выдает управляющий сигнал на СНЭ для компенсации гармоник графика мощности в противофазе).

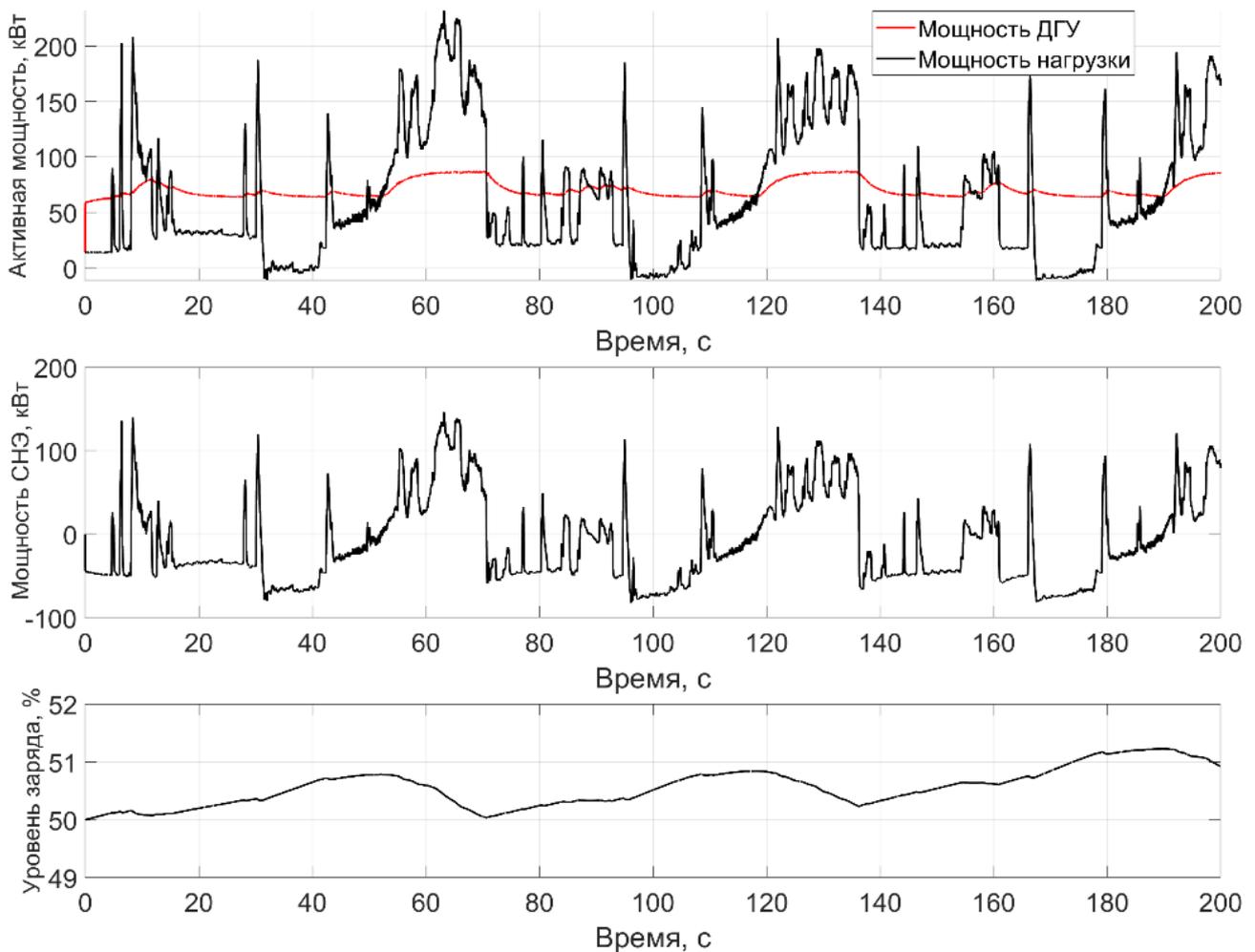


Рисунок 4 – Результаты моделирования СНЭ на ЛИА (верхняя: диаграмма: черный цвет - мощность нагрузки, красный – мощность ДГУ; средняя диаграмма: мощность СНЭ, нижняя диаграмма: уровень заряда)

Четвертая глава посвящена анализу применения теории мгновенной мощности (ТММ) и быстрого преобразования Фурье (БПФ) для обработки результатов мониторинга режимных параметров энергообъекта для последующего расчета параметров СНЭ по предложенным в работе методикам их расчета.

Для обработки результатов мониторинга энергообъектов с целью расчета основных параметров СНЭ предложено использовать ТММ и БПФ. ТММ позволяет

на основе результатов регистрации режимных параметров (токи, напряжения) рассчитывать режимные параметры системы электроснабжения предприятия в традиционном виде, удобном для использования в системе управления СНЭ (частота сети, мгновенная активная (p) и реактивная (q) мощность, усреднённые за период значения активной (P) и реактивной (Q) мощности). БПФ позволяет выполнять расчет и построение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ, Фурье-образ функции) нагрузочной диаграммы объекта, представленной непериодической функцией, записанной с частотой дискретизации регистратора (осциллографа).

Пятая глава посвящена методикам выбора основных параметров СНЭ. При разработке методики расчёта параметров СНЭ предварительно выполнен анализ методик, предлагаемых зарубежными и отечественными авторами. Их анализ показал, что:

1. В литературе отсутствуют методики расчета параметров для группы задач, в которых СНЭ работает в условиях резкопеременной и стохастической нагрузки.
2. Отсутствуют методики расчета параметров, основывающиеся на расчётах электромеханических переходных процессов в энергосистемах со СНЭ при заданном алгоритме её работы.

Разработанные в диссертации методики восполняют этот пробел. Предлагаются две новые методики:

1. Методика выбора основных параметров СНЭ на основе анализа амплитудно-частотных характеристик графиков нагрузки для задач демпфирования колебаний мощности нагрузки заданной частоты.
2. Методика выбора основных параметров на основе анализа результатов расчета переходного процесса с заданным алгоритмом управления СНЭ.

Приводятся примеры расчётов параметров СНЭ по разработанным методикам.

Шестая глава посвящена примерам применения разработок автора в практической деятельности производственного предприятия ООО «СНЭ». Автор принимал непосредственное участие в проведении испытаний промышленного образца СНЭ-10-1200-400 мощностью 1200 кВА и энергоёмкостью 400 кВт·час, в том числе в части разработки программ и методик испытаний. При проведении испытаний были использованы разработки автора по моделированию СНЭ и методик расчета её параметров.

Испытания проведены в 2019 г. и в 2020 в г. Новосибирске совместно с сотрудниками ООО «СНЭ», ООО «СПТ», Институтом силовой электроники НГТУ.

На рисунке 5 приведён пример экспериментальных осциллограмм при реализации управления СНЭ по алгоритму ограничения скорости изменения мощности питающей сети (уставка допустимой скорости изменения мощности сети - 20 кВт/с).

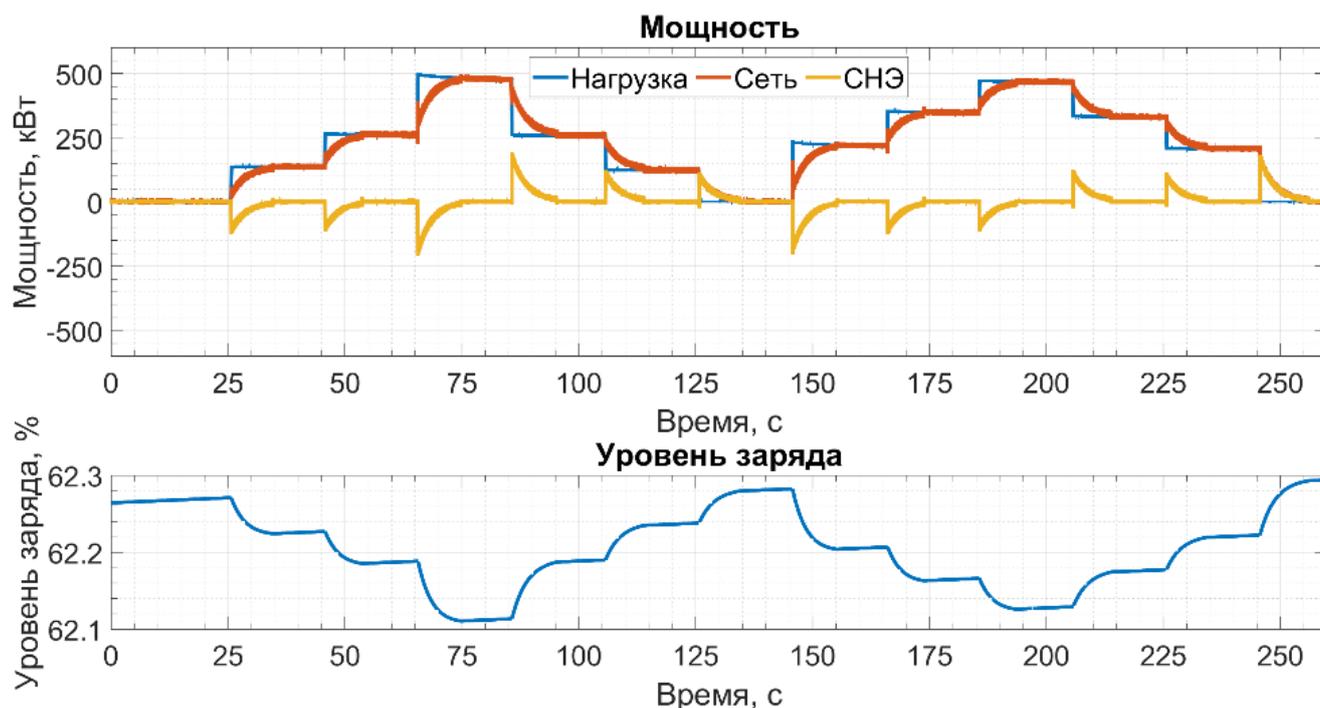


Рисунок 5 – Экспериментальные осциллограммы режимных параметров СНЭ при работе на резкопеременную нагрузку (верхняя диаграмма: синий цвет - мощность нагрузки, красный цвет - мощность из сети, желтый цвет - мощность СНЭ, нижняя – уровень заряда).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Предложен способ моделирования и разработана математическая модель СНЭ, позволяющая рассчитывать переходные электромеханические процессы с учётом динамики энергообмена для различных типов подсистем накопления энергии [5,9,14,23,25].
2. Математическая модель реализована в ППК Matlab Simulink и DigSilent PowerFactory и верифицирована путём сравнения результатов расчётов и физических экспериментов [5,9,11,12,14].
3. Наиболее актуально применение математической модели для разработки алгоритмов управления СНЭ и при расчете её основных параметров как элемента энергосистемы [2,13,19,22].
4. Разработана методика выбора основных параметров СНЭ на основе анализа амплитудно-частотных характеристик графиков нагрузки для задач демпфирования колебаний мощности нагрузки заданной частоты [1,7,10,15-18].
5. Разработана методика выбора основных параметров СНЭ на основе анализа результатов расчета переходного процесса с заданным алгоритмом управления [2,13,16,20].
6. Проведены натурные эксперименты на промышленном образце СНЭ в динамических режимах, показавшие её быстродействие и высокую эффективность для демпфирования колебаний мощности при резкопеременном характере нагрузки [4].

Продолжение и дальнейшее развитие работы связано с решением ряда актуальных задач по оптимизации структуры, состава оборудования и режимов работы электростанций автономной и распределённой генерации, в том числе с возобновляемыми источниками энергии. Применение для решения этих задач СНЭ с оптимально выбранными параметрами и эффективными алгоритмами управления может дать значительный технико-экономический эффект за счёт рационального использования местных источников энергии (прежде всего природного и попутного газа, а также ВИЭ). В основном это относится к предприятиям, связанным с добычей, транспортировкой и переработкой полезных ископаемых, располагающихся в удалённых районах Сибири и Дальнего Востока, для которых недоступно электроснабжение от ЕЭС РФ (или которые имеют с ней слабые связи). Ещё одна актуальная задача - выбор параметров и разработка алгоритмов управления СНЭ для повышения качества электроэнергии и надёжности электроснабжения в узлах с резкопеременной нагрузкой, что особенно важно для промышленных предприятий с электроустановками значительной мощности, имеющих циклическую или стохастическую нагрузку, получающих питание по тупиковым линиям электропередачи.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях (Перечень ВАК РФ):

1. **Пранкевич Г.А.** Методика расчета основных параметров накопителя энергии по экспериментальным нагрузочным диаграммам = The method of selecting the parameters of the energy storage devices with an abrupt variable load / В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова, Г. А. Пранкевич, Д. Ю. Балугев // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2018. - Т. 22, № 5. - С. 105-114.

2. **Пранкевич Г.А.** Энергетические характеристики гибридной системы накопления электрической энергии / В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова, Г. Б. Нестеренко, Г. А. Пранкевич, А. М. Потапенко // Энергия единой сети. - 2018. – №6 (42). – С. 34–43.

3. **Пранкевич Г.А.** Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт / В.М. Зырянов, Н.Г. Кирьянова, И.Ю. Коротков, Г.Б. Нестеренко, Г.А. Пранкевич // Журнал «Энергетическая политика». - 2020. - №6 (148). – С. 76-87.

4. **Пранкевич Г.А.** Испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 при совместной работе с ГПУ в составе / П.А. Бачурин, Д.С. Гладков, В.М. Зырянов, С.В. Кучак, Д.Е. Лебедев, Г.Б. Нестеренко, Г.А. Пранкевич, А.Н. // Журнал «Электроэнергия. Передача и распределение». – 2020. - №2(59). – С.18-25.

Публикации в научных изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science:

5. **Prankevich G.A.** Mathematical model of energy storage for the calculation of electromechanical processes in power systems / V. M. Zyryanov, N. G. Kiryanova, G. B. Nesterenko, A. M. Potapenko, G. A. Prankevich // EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies. - 2019. - Iss. 21. - Art. ew 19: e4 (5p.) - DOI: 10.4108/ eai.13-7-2018.155645.

6. **Prankevich G.A.** Assessment of energy storage effect into automatic reclosing in smart grid / O. Gorte, N. Kiryanova, M. Khmelik, A. Arestova, D. Baluev, G. Prankevich, V. Markin // 5 International youth conference on energy (IYCE) : proc., Italy, Pisa, 27–30 May 2015. – IEEE, 2015. – Art. 7180757. - DOI: 10.1109/IYCE.2015.7180757.

7. **Prankevich G.A.** Energy storage device application for load oscillations damping in isolated power systems / N. G. Kiryanova, D. Y. Baluev, G. A. Prankevich, V. M. Zyryanov // Actual issues of mechanical engineering (AIME 2017) : proc. of the intern. conf., Tomsk, 27–29 July 2017. – Paris : Atlantis Press, 2017. – P. 325-330. - (Advances in Engineering Research ; vol. 133). - DOI: doi:10.2991/aime-17.2017.53.

8. **Prankevich G.A.** Technical and economic efficiency analysis of the energy storage systems use in off-grid power systems [Electronic resource] / G. B. Nesterenko, G. Prankevich, S. A. Eroshenko, R. Chuvashov, V. M. Zyryanov // Proceedings of the 7 international conference on electrical energy systems (ICEES 2021), India, Chennai, 11–13 Febr. 2021 : virtual conf. – Chennai : IEEE, 2021. – P. 68-72. - Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9383742>. - Title from screen - DOI: 10.1109/ICEES51510.2021.9383742. - Работа выполнена: при поддержке Russian Foundation for Basic Research, research project No. 20-38-90182.

9. **Prankevich G.A.** Experimental accuracy assessment of energy storage system mathematical model [Electronic resource] / V. Guzhavina, G. B. Nesterenko, G. Prankevich, D. S. Gladkov, V. M. Zyryanov, J. V. Mokrousova // Proceedings of the 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC) Ekaterinburg, 13–15 Nov. 2020. – Ekaterinburg : IEEE, 2020. – P. 110-113. - DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281262

10. **Prankevich G.A.** Energy storage devices for low-frequency oscillations suppression in isolated power systems [Electronic resource] / D. Baluev, N. Kiryanova, G. Prankevich, V. Zyryanov // The 13 International forum on strategic technology (IFOST 2018) : proc., Harbin, China, 30 May - 1 June, 2018. – Harbin, 2018. – P. 694-698.

11. **Prankevich G.A.** Mathematical model of energy storage for the calculation of electromechanical processes in power systems / V. M. Zyryanov, N. G. Kiryanova, G. B. Nesterenko, A. M. Potapenko, G. A. Prankevich // EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies. - 2019. - Iss. 21. - Art. ew 19: e4 (5p.) - DOI: 10.4108/eai.13-7-2018.155645.

12. **Prankevich G.A.** Mathematical model of the energy storage system in the power system / P. A. Bachurin, V. M. Zyryanov, N. G. Kiryanova, S. V. Kuchak, G. B. Nesterenko, G. A. Prankevich [et al.] // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018) : тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018, – Т. 1, ч. 5. – С. 41–47.

13. **Prankevich G.A.** Identification of parameters for the hybrid electrical energy storage system in autonomous power system / S. A. Eroshenko, G. B. Nesterenko, V. M. Zyryanov, N. G. Kiryanova, G. A. Prankevich // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2020. - Vol. 836 : 4 International Conference on Reliability Engineering (ICRE 2019). - Art. 012008 (5 p.). - DOI: 10.1088/1757-899X/836/1/012008.

Публикации в сборниках материалов и трудов научных конференций, форумов всероссийского и международного уровня:

14. **Пранкевич Г.А.** Математическая модель системы накопления энергии в составе энергосистемы = Mathematical model of the energy storage system in the power system / П. А. Бачурин, В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова [и др.] // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018) : тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 7. – С. 228–234.

15. **Prankevich G.A.** Energy storage devices for low-frequency oscillations suppression in isolated power systems [Electronic resource] / D. Baluev, N. Kiryanova, G. Prankevich, V. Zyryanov // The 13 International forum on strategic technology (IFOST 2018) : proc., Harbin, China, 30 May - 1 June, 2018. – Harbin, 2018. – P. 694-698.

16. **Пранкевич Г.А.** Метод выбора параметров накопителя энергии при резкопеременной нагрузке = The method of selecting the parameters of the energy storage devices with an abrupt variable load / О. И. Горте, В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова, Г. А. Пранкевич // Оперативное управление в электроэнергетике. Подготовка персонала и поддержание его квалификации. - 2018. - № 3. - С. 56-61.

17. **Пранкевич Г.А.** Моделирование энергосистем с накопителями энергии = Modeling of energy systems with energy storage devices / Д. В. Армеев, В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова, Г. Б. Нестеренко, Г. А. Пранкевич // Электропитание. - 2018. – № 2. – С. 22–33.

18. **Prankevich G.A.** Application of electrical energy storage systems for ensuring generators stability / G. B. Nesterenko, G. A. Prankevich, V. Zyryanov ; research adviser T. G. Krasilnikova, language adviser E. T. Kitova // Progress through Innovations : тр. 8 междунар. науч.-практ. конф. аспирант. и магистр., Новосибирск, 28 марта 2019 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – С. 117–120.

19. **Пранкевич Г.А.** Методы выбора параметров накопителя энергии при резкопеременной нагрузке = The method of selecting the parameters of the energy storage devices with an abrupt variable load / О. И. Горте, В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова, Г. А. Пранкевич // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы 8 междунар. науч.-техн. конф., Самара, 2 – 6 окт. 2017 г. В 3 т. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2017. - Т. 3. - С. 135-138.

20. **Пранкевич Г.А.** Применение накопителя энергии для демпфирования колебаний мощности в автономных энергосистемах / Д. Ю. Балуюев, В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова, Г. А. Пранкевич // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития: сб. материалов 18 Всерос. науч.-практ. конф., Новосибирск, 12 мая-6 июня 2017 г. - Новосибирск : Изд-во ЦРНС, 2017. - С. 181-187.

21. **Пранкевич Г.А.** Совершенствование систем электроснабжения промышленных предприятий с использованием накопителей электроэнергии / Г. Б. Нестеренко, Г. А. Пранкевич ; науч. рук. Д. В. Армеев // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. : в 10 ч., Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, – Ч. 4. – С. 63-66.

22. **Пранкевич Г.А.** Методика выбора параметров накопителей энергии / Н. Г. Кирьянова, Г. А. Пранкевич; науч. рук. В. М. Зырянов // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. : в 10 ч., Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 4. – С. 86-89.

23. **Пранкевич Г.А.** Универсальная математическая модель системы накопления

электрической энергии = Multi-operated mathematical model of electrical energy storage system / В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова, Г. Б. Нестеренко, Г. А. Пранкевич // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: материалы 9 междунар. молодеж. науч.-техн. конф., Казань, 1–5 окт. 2018 г. В 3 т. – Казань: Казан. гос. энергет. ун-т, 2018. – Т. 3. – С. 127–130.

24. **Пранкевич Г.А.** Методика расчета параметров системы накопления энергии для снижения расходов предприятия на электроэнергию = Methodology for designing electrical energy storage system parameters to reduce enterprise energy costs [Электронный ресурс] / Г. Б. Нестеренко, В. М. Зырянов, А. С. Нешта, Г. А. Пранкевич, И. С. Семёнов // Электроэнергетика глазами молодежи – 2020: материалы 11 междунар. науч.-техн. конф., Ставрополь, 15–17 сент. 2020 г. В 2 т. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2020. – Т. 2. – С. 175–178.

25. **Пранкевич Г.А.** Моделирование энергосистем с накопителями энергии = Modeling of energy systems with energy storage devices / Д. В. Армеев, В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова, Г. Б. Нестеренко, Г. А. Пранкевич // Электропитание. - 2018. – № 2. – С. 22–33.

26. **Пранкевич Г.А.** Анализ целесообразности применения системы накопления электрической энергии на основе моделирования = Feasibility analysis of electrical energy storage system application on the base of modelling / Г. Б. Нестеренко, В. М. Зырянов, Д. О. Крюков, Н. Г. Кирьянова, Г. А. Пранкевич // Электроэнергетика глазами молодежи – 2019: материалы юбилейн. 10 междунар. молодеж. науч.-техн. конф., Иркутск, 16–20 сент. 2019 г. В 3 т. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. – Т. 3. – С. 56–59.

27. **Prankevich G. A.** Application of electrical energy storage systems for ensuring generators stability / G. B. Nesterenko, G. A. Prankevich, V. Zyryanov ; research adviser T. G. Krasilnikova, language adviser E. T. Kitova // Progress through Innovations : тр. 8 междунар. науч.-практ. конф. аспирантов и магистрантов, Новосибирск, 28 марта 2019 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – С. 117–120.

28. **Prankevich G. A.** Application of electrical energy storage system for limitation of abrupt load power changes / G. B. Nesterenko, G. A. Prankevich, V. E. Zyryanov ; research adviser T. G. Krasilnikova, language adviser E. T. Kitova // Aspire to Science : материалы междунар. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Новосибирск, 18 апр. 2019 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – С. 198–202.

Патент на изобретение Российской Федерации:

29. Патент 2736701 Российская Федерация, МПК G06N 7/00(2006.01). Система и способ построения модели энергосистемы и проведения расчетов режимов энергосистемы и модель системы накопления электрической энергии, предназначенная для включения в систему / Нестеренко Глеб Борисович, Зырянов Вячеслав Михайлович, **Пранкевич Глеб Александрович**, Удовиченко Алексей Вячеславович, Гужавина Варвара Владимировна; Заявка: 2020113079, 2020.04.08; Опубликовано: 2020.11.19.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383) 346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ №Р-00625. Подписано в печать 28.12.2021 г.