

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и коммерциализации

ФГБОУ ВО «КГЭУ»,

доктор технических наук, профессор

И.В. Ившин



« 8 » 09 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» на диссертационную работу Митягина Даниила Олеговича «Обоснование и выбор конструкционно-технологических параметров систем накопления энергии с использованием моделей прогнозной аналитики», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Митягина Д.О. посвящена решению важной научно-практической задачи – разработке математического и алгоритмического обеспечения для обоснованного выбора конструкционно-технологических параметров систем накопления энергии (СНЭ) на этапе

концептуального проектирования. В условиях активного развития возобновляемой энергетики, цифровизации энергетической инфраструктуры и перехода к низкоуглеродным технологиям вопросы повышения эффективности, надёжности и долговечности литий-ионных аккумуляторных систем приобретают особую значимость.

Тема диссертации непосредственно связана с реализацией положений Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, Стратегии научно-технологического развития РФ (в части перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике), а также Комплексной программы развития электроэнергетики и накопителей энергии, ориентированных на создание отечественных конкурентоспособных технологий накопления и хранения энергии. Разработанные автором подходы способствуют выполнению задач импортозамещения в области систем накопления энергии и цифровизации проектных процедур.

Существующие подходы к поиску оптимальных параметров СНЭ имеют принципиальные ограничения: эмпирические методы фрагментарны и не учитывают системных взаимодействий; детальные физико-химические модели (обладают высокой вычислительной сложностью и критической чувствительностью к трудноизмеримым параметрам; методы машинного обучения, несмотря на скорость, часто работают как «чёрный ящик» и не обеспечивают интерпретируемости результатов. Разработка гибридной прогнозно-аналитической модели, сочетающей регрессионный анализ для расчёта начальных характеристик и рекуррентные нейросетевые методы для прогнозирования деградации, является своевременной и востребованной задачей. Решение этой задачи позволяет на этапе проектирования минимизировать ресурсоёмкость структурно-параметрического синтеза и гарантированно достигать заданных пользователем показателей эффективности и надёжности функционирования СНЭ.

Основные результаты диссертации и их новизна

- Построена трёхуровневая функционально-структурная модель СНЭ, формально описывающая взаимосвязи конструкционных параметров (содержание никеля в катоде, толщина и пористость электродов, соотношение N/P и др.), эксплуатационных факторов и выходных характеристик (удельная ёмкость, энергетическая плотность, внутреннее сопротивление, SOH). Модель отличается от известных аналогов системным охватом всех этапов – от материалов до долговременной деградации;
- Разработан алгоритм прогнозирования динамики выходных характеристик, реализующий оригинальный механизм совместного использования регрессионных моделей (для начальных значений ёмкости, энергии и сопротивления) и рекуррентной LSTM-сети (для прогнозирования SOH-показателя). В отличие от существующих подходов, алгоритм учитывает как физически обоснованные детерминированные зависимости, так и сложные нелинейные эффекты деградации;
- Разработана процедура выбора субъективно-оптимального решения, позволяющая на основе задаваемых пользователем пороговых значений по сохранению ёмкости и потере энергии формировать множество Парето-эффективных конфигураций (с использованием генетического алгоритма NSGA-II) и выбирать конкретный набор конструкционных параметров СНЭ для типовых сценариев использования (максимальная энергоёмкость, максимальный срок службы, высокая мощность, быстрая зарядка).

Научная и практическая значимость полученных результатов

Научная значимость работы состоит в развитии методологии системного анализа и теории принятия решений применительно к сложным

электрохимическим системам:

- В отличие от работ, ограничивающихся прямым прогнозом начальных свойств материала без учёта временной эволюции характеристик, в диссертации реализован сквозной подход «состав → конструкция → начальные свойства → деградация → многокритериальный выбор»;
- В отличие от исследований, где NSGA-II применяется на уровне энергосистемы в целом без доведения оптимизации до уровня конструктивных параметров отдельной ячейки, в работе алгоритм впервые применён для параметрического синтеза ячейки в одиннадцатимерном пространстве с учётом деградации;
- Достигнутые показатели точности прогноза SOH-показателя ($MAE = 2,3\%$, $R^2 = 0,94$) сопоставимы с результатами, публикуемыми в ведущих международных журналах (Journal of Power Sources, Applied Energy, Energy and AI), и подтверждены валидацией на независимых данных.

Практическая значимость заключается в создании программно-реализованного инструмента на основе гибридной прогнозно-аналитической модели. Этот инструмент предоставляет инженерам-проектировщикам и энергетическим компаниям следующие практические возможности:

- Быстрый скрининг конструктивных альтернатив — на этапе концептуального проектирования за счёт задания пользовательских пороговых ограничений (по сохранению ёмкости и потере энергии) можно за минуты оценить тысячи потенциальных конфигураций СНЭ без проведения дорогостоящих натурных экспериментов или длительных циклических испытаний;
- Сокращение ресурсоёмкости синтеза — замещение полномасштабного физико-химического моделирования гибридной моделью позволяет снизить вычислительные затраты, что особенно важно при проведении многовариантных оптимизационных расчётов в рамках генетического алгоритма NSGA-II;

- Количественные рекомендации по проектированию – для типовых сценариев использования (максимальная энергоёмкость, максимальный срок службы, высокая мощность, быстрая зарядка) получены конкретные наборы конструкционных параметров (химический состав, геометрия электродов, эксплуатационные режимы), которые могут быть непосредственно использованы при разработке новых ячеек или адаптации существующих;
- Подтверждённая эффективность в реальных условиях – результаты внедрены в НПО «Тепловизор» для обоснованного выбора конфигурации СНЭ при оснащении частных домов системами накопления энергии, что подтверждено актом внедрения. Это демонстрирует применимость подхода не только в научных исследованиях, но и в инженерной практике при проектировании аккумуляторных систем для распределённой энергетики, систем бесперебойного питания и других энергоёмких приложений;
- Универсальность методики – разработанные регрессионные зависимости и обученная нейросетевая модель могут быть откалиброваны под другие электрохимические системы и использованы в широком спектре задач, связанных с прогнозированием характеристик и выбором параметров накопителей энергии, что расширяет область их применения за пределы литий-ионной химии.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Полученные в диссертации результаты целесообразно использовать в следующих организациях и на следующих предприятиях:

1. В области производства и проектирования систем накопления энергии:

- 1) ООО «Рэнера» (г. Москва) — при разработке и оптимизации конструкций литий-ионных аккумуляторных ячеек для систем

накопления энергии возможно применять процедуру выбора параметров для проектирования ячеек с приоритетом максимальной энергоёмкости;

2) АО «ТЭЭМП» (г. Москва) — при разработке портативных и стационарных накопителей энергии целесообразно применять гибридную модель для прогноза SOH-показателя;

3) АО «Энерготехника» (г. Казань) — при разработке систем бесперебойного питания для распределённой энергетики целесообразно применять регрессионные модели для расчёта начальных характеристик аккумуляторных ячеек.

2. В области энергетики и распределённой генерации:

1) ПАО «Россети» и его региональные филиалы — при обосновании параметров накопителей в составе гибридных энергоустановок;

2) АО «Солар Системс» (г. Самара) — при выборе аккумуляторных систем для фотоэлектрических станций с суточным циклом;

3) ООО «Хевел» (г. Новочебоксарск) — при проектировании СНЭ в составе солнечных электростанций с неравномерной генерацией.

3. В научно-исследовательских и образовательных организациях:

1) НИУ «МЭИ» (г. Москва) — при подготовке специалистов в области систем накопления энергии и сопоставлении с PINN-подходами возможно применять результаты сравнения с P2D-моделью;

2) ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова (г. Москва) — при развитии методов многокритериальной оптимизации и анализа чувствительности;

3) ИПТМ РАН (г. Черноголовка) — при разработке новых материалов для накопителей энергии для верификации прогнозов на новых катодных и анодных материалах.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов исследования обеспечивается репрезентативностью исходных статистических выборок: использованы как экспериментальные данные из открытых репозиториях (NASA, CALCE, Stanford), так и синтетическая выборка объёмом 300 000 конфигураций, сгенерированная методом латинского гиперкуба и откалиброванная по 300 экспериментальным образцам. Корректно применены методы математической статистики, регрессионного анализа, теории принятия решений и машинного обучения. Валидация гибридной модели на независимых данных 124 коммерческих ячеек показала среднюю абсолютную ошибку прогноза SOH 2,3 % и корреляцию 0,94. Сопоставление расчётных и реальных характеристик для 30 опытных ячеек дало расхождение не более 5 %, что подтверждает высокую точность и обоснованность выводов.

Замечания по диссертационной работе:

1. В диссертации не приведено сравнение вычислительной эффективности разработанной гибридной модели с полной P2D-моделью для характерных задач оптимизации (например, для одной итерации или для полного цикла NSGA-II из 150 поколений). Хотя на стр. 126 указано общее время построения множества Парето (~1000 минут), без сопоставимых данных по альтернативным подходам сложно количественно оценить достигаемый выигрыш в ресурсоёмкости, что особенно важно для энергетических приложений, где время расчёта критично;
2. Отсутствует анализ чувствительности выходных характеристик к вариациям входных параметров (например, с использованием индексов Соболя). Такой анализ позволил бы выявить наиболее критичные факторы и обосновать исключение малозначимых переменных на этапе редукции регрессионных моделей, что повысило бы их робастность применительно к реальным условиям эксплуатации СНЭ;
3. В работе не рассмотрен вопрос учёта неопределённости прогноза

(доверительные интервалы или квантили для SOH). Для практического применения в энергетике важно знать разброс возможных значений, особенно при принятии решений о гарантийных обязательствах и сроках службы аккумуляторных систем;

4. Не указано, каким образом предлагаемая методика масштабируется на другие электрохимические системы (например, натрий-ионные или твердотельные аккумуляторы), что ограничивает оценку универсальности подхода для более широкого класса задач накопления энергии;

5. Рассматриваются только электрохимические накопители энергии, тогда как «система накопления энергии» включают гидравлические, пневматические, механические и др., которые остались вне рамок исследования.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают научной и практической ценности выполненных исследований.

Заключение

Диссертационная работа Митягина Даниила Олеговича является завершённым научным исследованием, в котором решена актуальная задача разработки гибридного прогнозно-аналитического аппарата для обоснованного выбора конструктивно-технологических параметров систем накопления энергии. Полученные автором результаты обладают научной новизной, заключающейся в создании трёхуровневой системной модели СНЭ, оригинального алгоритма совместного использования регрессионных и рекуррентных нейросетевых моделей, а также процедуры многокритериального выбора с учётом пользовательских предпочтений. Практическая значимость подтверждена внедрением в НПО «Тепловизор» и высокой точностью прогнозов на независимых данных ($MAE = 2,3 \%$, $R^2 = 0,94$).

Достоверность выводов обеспечена корректным применением

современных методов системного анализа, математической статистики и машинного обучения, а также репрезентативностью экспериментальных и синтетических выборок. Работа логически выстроена, основные положения апробированы на международных конференциях и опубликованы в 9 научных трудах, из которых 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Диссертация полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней в НИТУ МИСИС», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Митягин Даниил Олегович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Аннотация диссертации полностью отражает её содержание.

Доклад по материалам диссертации был представлен и получил положительную оценку на научном семинаре кафедры автоматизации технологических процессов и производств (АТПП) ФГБОУ ВО «КГЭУ» «8» сентября 2026 г., протокол № 47.

Отзыв составили:

Доцент кафедры АТПП
ФГБОУ ВО «КГЭУ»
кандидат технических наук
e-mail: cmvorkut@mail.ru
тел.: +7 (843) 519-42-58

Сафин
Марат Абдулбариевич

Профессор кафедры АТПП
ФГБОУ ВО «КГЭУ»
доктор технических наук, профессор
e-mail: kamil.gilfanov@yandex.ru
тел.: +7 (843) 519-42-58

Гильфанов
Камиль Хабибович



8.09.2026

Специалист ОК
Подпись

Садина М. А. Тимфганова К. Х.
Хабибрахманова О. А.

Заведующий кафедры АТПП

ФГБОУ ВО «КГЭУ»

доктор технических наук, профессор

e-mail: andrey-dmlt@yandex.ru

тел.: +7 (843) 519-42-58

Дмитриев

Андрей Владимирович

Подписи Сафина М.А, Гильфанова К.Х., Дмитриева А.В. заверяю.

«8» сентября 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Казанский государственный
энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Адрес: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51

Телефон: +7 (843) 519-42-20

e-mail: kgeu@kgeu.ru

Официальный сайт: <https://kgeu.ru>



Сафина М.А, Гильфанова К.Х., Дмитриева А.В.
Хабибрахманова О.А.