

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Митягина Даниила Олеговича «Обоснование и выбор конструкционно-технологических параметров систем накопления энергии с использованием моделей прогнозной аналитики», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» и состоявшейся в НИТУ МИСИС 30 сентября 2026 г.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ МИСИС 29.06.2026, протокол №40.

Диссертация выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС) на кафедре автоматизированных систем управления института Информационных технологий и компьютерных наук.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ МИСИС (протокол №40, 29.06.2026г.) в составе:

1. Темкин Игорь Олегович, д.т.н., заведующий кафедрой автоматизированных систем управления НИТУ МИСИС – председатель комиссии;
2. Гончаренко Сергей Николаевич, д.т.н., профессор кафедры автоматизированных систем управления НИТУ МИСИС,
3. Куприянов Вячеслав Васильевич, д.т.н., профессор кафедры автоматизированных систем управления НИТУ МИСИС;
4. Черемисина Евгения Наумовна, д.т.н., научный руководитель Института системного анализа и управления федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Университет «Дубна»;
5. Артамонов Алексей Анатольевич, д.т.н., заведующий кафедрой «Анализ конкурентных систем» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

В качестве ведущей организации утверждено федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань.

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Построена трехуровневая функционально-структурная модель системы накопления энергии, формально описывающая взаимосвязи конструкционных, эксплуатационных и выходных характеристик этого объекта. Модель отличается системным охватом всех элементов, определяющих функционирование сложного объекта – от учета материалов изготовления до деградации эксплуатационных характеристик;
2. Разработан алгоритм прогнозирования динамики выходных характеристик, реализующий оригинальный механизм совместного использования регрессионных моделей (для начальных значений ёмкости, энергии и сопротивления) и рекуррентной нейросетевой модели LSTM (для прогнозирования SOH-показателя). В отличие от существующих подходов, алгоритм учитывает как физически обоснованные детерминированные зависимости, так и сложные нелинейные эффекты деградации;
3. 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).

4. Разработаны и статистически верифицированы регрессионные модели начальных значений удельной ёмкости, удельной энергетической плотности и внутреннего сопротивления ($R^2 = 0,93-0,97$, $VIF < 5$) на выборке из 300 000 конфигураций, сгенерированных методом латинского гиперкуба и откалиброванных по 300 эталонным образцам.

5. Разработана и обучена гибридная нейросетевая модель LSTM(64)-Dense(32) для прогнозирования SOH-показателя, достигнутая точность: $R^2 = 0,963$, $MAPE = 2,1 \%$ на тестовой выборке; валидация на независимых данных NASA, University of Michigan, Stanford и CALCE показала среднюю абсолютную ошибку прогноза SOH 3,5 %.

6. С использованием гибридной модели и алгоритма NSGA-II получено множество эффективных решений (88 точек; 217–260 Вт·ч/кг при SOH 80,2–82,9 % после 1000 циклов) и предложены конфигурации для четырёх типовых сценариев; сопоставление с серийными ячейками LG M50LT, Samsung 50E и Molicel P45B показало расхождение по удельной энергии не более 4,6 %.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что:

- впервые в теории принятия решений применительно к синтезу сложных электрохимических систем, предложена и реализована методология, обеспечивающая переход от фрагментарного описания отдельных компонентов системы накопления энергии к целостному системному представлению;
- в диссертации реализован сквозной подход «состав → конструкция → начальные свойства → деградация → многокритериальный выбор», учитывающий эволюцию эксплуатационных характеристик, что повышает степень обоснованности выбора конкретного варианта системы, а также разработан алгоритм параметрического синтеза ячейки в одиннадцатимерном пространстве конструкционных и эксплуатационных переменных с одновременным учётом начальных характеристик и их деградации во времени;
- разработан гибридный алгоритм прогнозирования динамики выходных характеристик, реализующий совместное использование регрессионных моделей и рекуррентной нейросетевой модели LSTM, что обеспечивает как физическую интерпретируемость, так и высокую точность прогноза;
- сформулированы оригинальные для данного класса объектов критерии отбора характеристик для регрессионного и нейросетевого прогнозирования, развивающие теоретические основы гибридного моделирования сложных технических систем и создающие предпосылки для дальнейших исследований в области интеграции физически обоснованных моделей.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- а) создан программный инструмент, предоставляющий инженерам-проектировщикам и энергетическим компаниям следующие практические возможности:
 - быстрый скрининг конструкционных альтернатив — на этапе поиска конструкционных параметров за счёт задания пользовательских пороговых ограничений (по сохранению ёмкости и потере энергии) можно оценить множество потенциальных конфигураций СНЭ без проведения 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 многокритериальной оптимизации;
 - получение количественных рекомендаций по химическому составу, геометрии электродов и эксплуатационным режимам для достижения целевых показателей эффективности и надёжности;

б) для четырёх типовых сценариев использования СНЭ (максимальная энергоёмкость, максимальный срок службы, высокая мощность, быстрая зарядка) даны конкретные рекомендации по параметрам ячейки, обеспечивающие SOH 80,2–82,9 % после 1000 циклов и удельную энергию 217–260 Вт·ч/кг;

в) результаты внедрены в НПО «Тепловизор» для подбора СНЭ на проливочном оборудовании аккумуляторного питания, что подтверждено актом внедрения; выбранная конфигурация использовалась при проливке теплосчётчиков и расходомеров для улучшения их метрологических характеристик.

Оценка достоверности результатов исследований выявила, что:

- в диссертации для решения поставленных теоретических и практических задач использован адекватный методологический аппарат, включающий методы системного анализа, математической статистики, теории принятия решений, машинного обучения и многокритериальной оптимизации, применение которого корректно и обоснованно;
- достоверность обеспечивается репрезентативностью исходных данных: использованы экспериментальные данные из открытых репозиториях NASA, CALCE, Stanford, паспортные характеристики коммерческих ячеек, а также синтетическая выборка из 300 000 конфигураций, сгенерированная методом латинского гиперкуба и откалиброванная по 300 экспериментальным образцам; границы варьирования параметров соответствуют физическим и технологическим ограничениям, а выявленные зависимости согласуются с известными электрохимическими закономерностями;
- регрессионные модели начальных характеристик прошли статистическую верификацию: коэффициенты детерминации $R^2 = 0,93–0,97$, оценки значимости предикторов; выполнена редукция моделей до значимых предикторов;
- нейросетевая модель LSTM(64)–Dense(32) выбрана по результатам сравнения с альтернативными архитектурами (GRU, CNN-LSTM, Pure LSTM) и показала на тестовой выборке $R^2 = 0,963$, MAPE = 2,1 %; валидация гибридной модели на независимой выборке из 124 коммерческих ячеек дала среднюю абсолютную ошибку прогноза SOH 2,3 % и корреляцию прогнозных и фактических значений 0,94; сопоставление с 30 опытными ячейками показало расхождение не более 5 %; расхождение по удельной энергии с серийными ячейками LG M50LT, Samsung 50E и Molicel P45B не превысило 4,6 %;
- результаты диссертационного исследования докладывались на международных и всероссийских конференциях, опубликованы в 13 научных работах, в том числе в 6 изданиях, рекомендованных ВАК РФ; практическая достоверность подтверждена внедрением в НПО «Тепловизор».

Личный вклад соискателя состоит в непосредственной постановке и решении всех сформулированных задач, разработке математических моделей, нейросетевой архитектуры, процедуры выбора, проведении вычислительных экспериментов и валидации, подготовке научных публикаций.

Пункт 2.6 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС соискателем ученой степени не нарушен.

Диссертация Митягина Д.О. соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС, так как в ней, на основании выполненных автором исследований, решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в создании прогнозно-аналитических моделей и алгоритмов для обоснованного выбора конструктивно-технологических параметров систем накопления энергии, обеспечивающих заданные показатели эффективности и надёжности, а также в разработке процедуры многокритериального выбора,

позволяющей формировать множество Парето-эффективных конфигураций и выбирать конкретный набор параметров с учётом пользовательских предпочтений.

Научная специальность полностью соответствует паспорту специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (пункты 2, 4, 11).

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Митягину Даниилу Олеговичу ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Результаты голосования

При проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 5 человек, участвовавших в заседании из 5 (пяти) человек, входящих в состав комиссии, проголосовала:

за – 5

против нет

недействительных бюллетеней - нет

Председатель Экспертной комиссии  И.О.Темкин

30.09.2026г.