



УТВЕРЖДАЮ

профессор кафедры «Энергетика»
ФГБОУ ВО НИ ТПУ, к.ф.-м.н.
Профессор Алексей Сергеевич
«30» _____ 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на диссертацию Осгонбаатара Тувшина «Разработка системы предиктивной аналитики режимов работы электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками (на примере энергосистемы Монголии)», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

1. Актуальность темы диссертации

Стратегия развития энергетики Монголии направлена на обеспечение растущей потребности электроэнергии за счет повышения доступности источников и передачи энергии, создание единой электроэнергетической системы (ЭЭС) путем интеграции региональных энергосистем, а также участие в межгосударственном объединении электроэнергетики стран Северно-Восточной Азии. Соответственно, во все этапы функционирования ЭЭС стремительно внедряются новые технологии, включая процессы производства, передачи и распределения электроэнергии. Ярким доказательством служит растущая интеграция альтернативных источников, таких как возобновляемые источники энергии (ВИЭ), технологии накопления, которым уделяется особое внимание в настоящее время. Вместе с этим усложняются условия функционирования ЭЭС и необходима разработка новых методов, методик и средств, повышающих эффективность их работы. Таким образом, разработка системы предиктивной аналитики нормальных режимов работы ЭЭС с возобновляемыми источниками энергии является актуальной и недостаточно исследованной задачей для Центральной энергосистемы (ЦЭС) Монголии.

Цель диссертационной работы: Создание системы аналитики, позволяющей решать оптимизационные задачи и выполненной на основе математических моделей и алгоритмов для решения прикладных задач планирования и анализа режимов ЭЭС с возобновляемыми источниками.

2. Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа Осгонбаатара Тувшина соответствует паспорту научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика. Работа соответствует следующим направлениям исследований, указанным в паспорте специальности 2.4.3. Электроэнергетика:

– Разработка цифровых и физических методов анализа и мониторинга режимных параметров основного оборудования электростанций, электрических сетей и систем электроснабжения (пункт 10);

– Разработка методов мониторинга и анализа режимных параметров основного оборудования электростанций, подстанций и электрических сетей энергосистем, мини- и микрогрид (пункт 11).

– Разработка методов использования информационных и телекоммуникационных технологий и систем, искусственного интеллекта в электроэнергетике, включая проблемы разработки и применения информационно-измерительных, геоинформационных и управляющих систем для оперативного и ретроспективного мониторинга, анализа, прогнозирования и управления электропотреблением, режимами, надежностью, уровнем потерь энергии и качеством электроэнергии (пункт 20).

3. Структура и объем диссертации

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». Общий объем работы составляет 166 страниц. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 145 наименований и 2 приложений.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна, практическая ценность и достоверность результатов работы, описана структура диссертации в целом.

В **первой главе** дано описание методов управления режимами работы ЭЭС в краткосрочном периоде. Отдельное внимание уделено описанию энергетики Монголии, а именно Центральной энергосистемы (ЦЭС), где расположена большая часть потребления и генерации электроэнергии. Поставлены задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** рассматривается задача разработки методологии прогнозирования суточного графика потребления электроэнергии как в целом по энергосистеме, так и в ее узлах.

В **третьей главе** рассматриваются задачи разработки методов прогнозирования суточного графика генерации ВИЭ, таких как ветровые и солнечные электростанции.

В **четвертой главе** сформулированы задачи оптимизации для ЦЭС Монголии с учетом ее особенностей и свойств. Разработаны алгоритмы для оптимизации нормальных режимов работы ЭЭС за счет распределения активной мощности между ТЭЦ с учетом выработки электроэнергии на ветровых и солнечных электростанциях.

В **заключении** приведены основные выводы по результатам исследований.

4. Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны методики прогнозирования суточного графика электропотребления применительно к ЦЭС Монголии. Экспериментально показано, что среди разработанных методик высокой точностью обладает алгоритм экстремального градиентного бустинга (XGBoost), обеспечивший снижение погрешности до 1,25 %.

2. На основе прогноза суточного графика нагрузки энергосистемы с помощью ранговых моделей может быть выполнено прогнозирование нагрузки в узлах с погрешностью не более 2,0 %.

3. Доказано, что ансамблевые модели машинного обучения могут одновременно учитывать несколько факторов, влияющих на временной ряд. Именно в этом заключается обоснованность использования ансамблевых моделей в задаче прогнозирования генерации ВИЭ. Величина средней погрешности прогноза для ветровых электростанций составляет от 12,3 до 13,3 %, а для солнечных – от 6,5 до 8,43 %.

4. Разработанные алгоритмы оптимизации нормальных режимов работы ЭЭС путем распределения активной мощности между ТЭЦ дали новые научные результаты, позволяющие повысить энергетическую эффективность ЦЭС Монголии.

5. Реализация алгоритмов, использованных в диссертационных задачах, и эксперименты проведены для реальной схемы и параметров ЦЭС Монголии. Предложенные алгоритмы впервые применены к ЦЭС Монголии с использованием библиотеки Pandapower программного пакета Python.

6. По итогам в диссертационной работе предложена концепция системы предиктивной аналитики режимов работы ЭЭС с ВИЭ.

5. Достоверность и научная новизна

Достоверность исследований: Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертационной работе, обоснованы приведенными теоретическими положениями и результатами, полученными при проведении экспериментальных расчетов для реальной энергосистемы. Достоверность проведенных исследований подтверждена сравнением результатов применения статистических методов и методов машинного обучения и корректным использованием средств программного обеспечения (RastrWin3, Pandapower).

Научная новизна:

1. Разработаны математические модели электропотребления ЭЭС и ее узлов, основанные на комбинации ансамблевых моделей машинного обучения и статистических ранговых моделей.

2. Разработаны методики прогнозирования суточного графика генерации ВИЭ, таких как солнечные и ветровые электростанции, основанные на ансамблевых моделях и учитывающие метеорологические условия и информацию о сезонности.

3. Разработаны алгоритмы оптимизации нормальных режимов работы ЦЭС Монголии с учетом моделей электропотребления и генерации источников электроэнергии.

4. Впервые в концепцию системы предиктивной аналитики режимов работы ЭЭС включены такие программные модули, как прогнозирования электропотребления и генерации ВИЭ, а также оптимизации нормальных режимов работы ЦЭС Монголии.

6. Практическая значимость

Предложена концепция создания системы предиктивной аналитики режимов работы ЭЭС с ВИЭ, которая включает в себя следующие программные продукты:

1. Программа краткосрочного прогнозирования графиков нагрузки в узлах ЭЭС на основе ансамблевых моделей машинного обучения и рангового анализа, позволяющая автоматизировать предсказания и снизить их погрешность.

2. Программа прогнозирования генерации на базе ВИЭ для ЭЭС Монголии, позволяющая оценить потенциалы ВИЭ и учесть их неопределенность при планировании режимов ЭЭС.

3. Программа оптимизации нормальных режимов работы ЭЭС за счет планирования графиков генерации ТЭЦ, позволяющая повысить эффективность работы ЭЭС в целом.

На все эти программы получены свидетельства о государственной регистрации разработанных автором программ для ЭВМ. Программные продукты также использованы при формировании отчета «Технические рекомендации по интеграции гидроаккумулирующих электростанций мощностью 250 МВт в Центральную энергосистему Монголии».

Результаты, полученные в диссертационной работе, обсуждались на технических совещаниях ОАО «Национальный диспетчерский центр Монголии» и Ассоциации производителей возобновляемой энергии Монголии, а также внедрены в

учебный процесс Новосибирского государственного технического университета (НГТУ): материалы используются при чтении лекций и проведении лабораторных работ по курсу «Электроэнергетические системы и управления ими» и при выполнении выпускных квалификационных работ.

7. Замечания по работе

7.1. В работе использован расчет только установившихся режимов работы электрических сетей. Возможно и целесообразно ли использовать результаты работы для расчета динамической устойчивости и переходных процессов при планировании режимов работы рассматриваемой энергосистемы?

7.2. В главе 1 нечеткая логика отнесена к машинному обучению, хотя следовало бы отнести ее к более широкому понятию – методы искусственного интеллекта.

7.3. В главе 1 на странице 38 указано «Если погрешности выше допустимых для практических расчетов, то модель недостоверна» – какую погрешность автор считает допустимой?

7.4. Пункты 1.3-1.4 содержат описание методов, широко и многократно представленных в научной литературе, поэтому их объем можно было бы сократить.

7.5. Корреляционная матрица на Рисунке 2.3 построена по всему набору данных, следовало бы построить аналогичные матрицы по сезонам года.

7.6. Рисунок 2.20 содержит слишком мелкие детали, следовало разместить графики друг под другом в один столбец.

7.7. Глубина регрессионных деревьев 20, указанная на странице 103, представляется избыточной, при этом количественного обоснования такого выбора в работе не приведено.

7.8. В главах 2 и 3 прогнозирование процессов в энергосистеме осуществляется на сутки вперед. Какие модификации разработанных моделей необходимы для решения задачи оперативного прогноза при управлении энергосистемой?

7.9. В главе 4 не учитывается влияние погрешности прогнозов как электропотребления, так и генерации ВИЭ на планирование режимов работы Центральной энергосистемы, в частности распределении активной мощности между ТЭЦ, что позволило бы разместить резервную активную мощность на ТЭЦ, помимо распределения генерации.

8. Соответствие диссертации критериям «Положения о присуждении учёных степеней»

По п.9. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой автором впервые предложена концепция системы предиктивной аналитики режимов работы электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии.

По п.10. Диссертация написана автором самостоятельно в виде рукописи, содержит новые научные результаты и положения, заслуживающие публичной защиты. Содержание диссертации и опубликованные работы свидетельствуют о достаточном вкладе автора в науку. В диссертации имеются сведения о практической полезности выполненных исследований, подтвержденные актом внедрения.

По п.11-13. Основные научные результаты достаточно полно отражены в 11 публикациях, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

По п.14. Диссертация соответствует указанным критериям.

9. Общее заключение о соответствии выполненной работы требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям

Диссертация Осгонбаатара Тувшина является законченной научно-исследовательской работой, в которой представлено решение актуальной задачи разработки средства оптимального планирования режимов работы

электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии, основанного на математических моделях и интеллектуализации.

Содержание диссертации отражает основные идеи работы и полученные в ней результаты, а также раскрывает ее научную и практическую ценность. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Диссертация Осгонбаатара Тувшина «Разработка системы предиктивной аналитики режимов работы электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками (на примере энергосистемы Монголии)» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, изложенным в п.п. 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (ред. от 16.10.2024).

Автор диссертации, Осгонбаатар Тувшин, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании электроэнергетической секции научно-технического совета Инженерной школы энергетики ФГАОУ ВО НИ ТПУ, протокол №9 от 29.05.2025 г.

Председатель ЭЭС НТС ИШЭ ФГАОУ
ВО НИ ТПУ, профессор Отделения
электроэнергетики и электротехники
Инженерной школы энергетики ФГАОУ
ВО НИ ТПУ, д.т.н., профессор

Василий Яковлевич Ушаков

Секретарь ЭЭС НТС ИШЭ ФГАОУ ВО
НИ ТПУ, инженер Организационного
отдела Инженерной школы энергетики
ФГАОУ ВО НИ ТПУ

Пётр Андреевич Гнездилов

Удостоверяю, что подписи
Ушаковым и П.А. Гнездиловым

ФГАОУ ВО НИ ТПУ В.Я.

Ученый секретарь ФГАОУ

В.Д. Новикова

Полное и сокращенное
наименование организации

Полное и сокращенное наименование
автономного учреждения высшего
образования «Национальный

исследовательский Томский политехнический
университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Место нахождения

634050, Томская область, г. Томск, пр. Ленина,
д. 30

Телефон

+7 (3822) 60-63-33, +7 (3822) 60-64-44

Адрес электронной почты

tpu@tpu.ru

Адрес сайта организации

http://tpu.ru

Отзыв получен 16 июня 2025 г. Проф. Ушаков В.Я.

С отзывом ознакомлен 16 июня 2025 г.

Проф. Тувшин О.