

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)»**

На правах рукописи

МОКШИН МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛЬНОЙ МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА
ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЕТРОГЕНЕРАЦИИ ДЛЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Шифр и наименование научной специальности

5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (специализация – «Экономика
промышленности»)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Москва 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

**Научный
руководитель:**

Путилов Александр Валентинович
Доктор технических наук, профессор, Академик отраслевой академии наук, декан Факультета бизнес-информатики и управления комплексными системами НИЯУ МИФИ, г. Москва

Рецензенты

Семикашев Валерий Валерьевич
кандидат экономических наук, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института народнохозяйственного прогнозирования РАН (ИНП РАН), г. Москва

Силенко Аркадий Николаевич
кандидат технических наук, доцент кафедры управления бизнес-проектами (№72) НИЯУ МИФИ, г. Москва

Защита диссертации состоится «___» _____ 2025 г. в ___ час. ___ мин. на заседании диссертационного совета «МИФИ.5.01» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://ods.mephi.ru/dissertations> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»»

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

**Ученый секретарь
диссертационного
совета, д.т.н., профессор**

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Современная геополитическая ситуация ставит перед российской экономикой сложные задачи, связанные с трансформацией в кратчайшие сроки сложной социально-экономической системы хозяйствования РФ в сбалансированный механизм. Трансформация экономических систем ведет к структурным изменениям индустриальных бизнес-моделей и перераспределению ресурсов. На фоне происходящих изменений в мировом порядке, развитие возобновляемых источников энергии становится приоритетным направлением модернизации российской энергетики в условиях энергетического перехода, глобального потепления и нарастающего дефицита ископаемых ресурсов. В этом контексте ветроэлектростанции (ВЭС) выступают важным элементом устойчивого и экологически чистого энергоснабжения, обладая высоким потенциалом генерации энергии без выбросов парниковых газов. Их интеграция в промышленную инфраструктуру особенно актуальна в удалённых и энергодефицитных регионах.

Настоящая диссертационная работа состоит из трёх глав, охватывающих теоретическую, методологическую и прикладную области исследования.

Первая глава посвящена теоретическим аспектам оценки экономической эффективности промышленных предприятий, с акцентом на специфику использования возобновляемых источников энергии, в частности ветроэнергетики.

Во второй главе изложены принципы оптимизации функционирования ветроэнергетических систем и предложен концептуальный подход к цифровому мониторингу ключевых экономических параметров.

Третья глава содержит описание авторской цифровой модели мониторинга, включая алгоритмы, формулы и результаты апробации на примере ветроустановок в Ростовской и Исык-Кульской областях.

Несмотря на технологическое развитие и государственную поддержку проектов ВИЭ, широкое внедрение ВЭС в промышленный сектор сдерживается рядом факторов. Среди них — высокая капиталоемкость, нестабильность ветровых режимов, недостаточная предсказуемость выработки энергии, длительные сроки окупаемости, а также отсутствие универсальных экономических моделей, способных эффективно учитывать климатические и региональные особенности.

Современные методы экономической оценки ВЭС, как правило, не адаптированы к оперативному мониторингу и не позволяют учитывать изменчивость ветровой активности в реальном времени. Это приводит к недооценке или переоценке эффективности проектов, ошибочным инвестиционным решениям и снижению интереса со стороны частных и государственных инвесторов.

Цифровизация и развитие систем обработки больших данных открывают новые возможности для решения обозначенных проблем. Использование вейвлет-анализа, климатического моделирования и адаптивных сценариев управления позволяет повысить точность прогнозов, обеспечить динамическую корректировку режимов генерации и тем самым повысить экономическую эффективность ВЭС.

Таким образом, необходимость разработки цифровой методики мониторинга экономических показателей ветроэлектростанций, учитывающей сезонные и региональные колебания, является своевременной и отвечает задачам повышения инвестиционной привлекательности и конкурентоспособности ВИЭ в России.

Степень разработанности проблемы

Несмотря на многовековую историю ветроэнергетики, как инженерное дело она оформилась сравнительно недавно, ориентировочно с 15 века, а как фундаментальная наука — с начала 20 века. Развитию и становлению научной школы ветроэнергетики со столетней

историей посвящены труды отечественных ученых Н. Е. Жуковского, В. П. Ветчинкина, Н. В. Красовского, Г. Х. Сабина, В. И. Сидорова, В. Е. Федотова, Уфимцева А.Г., Кондратюка Ю.В., Фадеева Е.Ф., Сидорова И.В., которые заложили теоретические основы ветроэнергетики. Отечественная ветроэнергетика имеет более чем 100-летнюю историю, начавшись с разработки в 1920 году первых ветроэлектрических станций и ветряков для сельского хозяйства страны. Русскими исследователями были созданы научные и конструкторские ветроэнергетические школы, получен опыт серийного производства и эксплуатации ВЭС, в том числе для арктических и антарктических условий.

Позже российские ученые и инженеры развили сложившуюся научную школу и ввели в предметную область ветроэнергетики новые технические знания и решения, а позже, с начала 21 века, и цифровые инструменты измерений характеристик ветра и эксплуатационных параметров оборудования ветроэлектростанций. Среди них назовем Федотова В.Е., Терентьева Л.И., Новака Ю.И., Шеина В.А. Селезнева И.С., Дьякова А.Ф. и др. Современные исследователи ветроэнергетики Мартыанов В.Л., Бутузов В.А., Пугачев Р.В., Андреев В.А., Путилов А.В., Жабицкий М.Г., Юрченко И.В., Бубенчиков А. А., Бубенчикова Т. В., Шепелева Е. Ю., Андреев В.А., Абаев А.В., Долинский А.В., Беляков П.Ю, Пронин С.П., Чебанов В.А., Трутаев В.В., Дмитриевский А. Н., Харитонов Д.А. и многие другие внесли большой вклад в развитие производства электроэнергии из различных источников. В работах рассматриваются современные тенденции в развитии мировой энергетики и основные характеристики топливно-энергетического комплекса России, анализируются особенности развития газовой, нефтяной, угольной генерации электроэнергии и производства «чистой» энергии на возобновляемых источниках.

Среди первого поколения зарубежных ученых и инженеров - основоположников создания и развития ветроэнергетики нужно упомянуть Чарльза Браша, Поля ля Кур, Джо Якобса и Марцеллуса Якобса, Уильяма Томсона, Джеймса Блайта, Дарье и некоторых других. Современные зарубежные исследователи проблем ветроэнергетики Хансен А., Полиндер Г., Цили М., Папатанасиу С., Моррен Дж., Де Хаан С., Вессельс К., Гебхардт Ф., Фукс Ф., Мигахапола Л. Г., Литтлер Т., Флинн Д., Юсупов К. И. Тажибоев С. Т., Аלקатаа Ахмед М.М. и многие другие исследователи внесли вклад в развитие теоретической и практической части ветроэнергетики, созданию новых технологий производстве энергии.

Экономическим подходам к оценке эффективности ветроэнергетики посвящены труды российских ученых Аникиной И.Д., Дегтярева К.С., Зубакина В.А., Стефанца В.С., Залиханова А.М., Соловьёва А.А., Соловьёвой Д.А., Волковой Л.В. и других исследователей. Вопросы оценки эффективности нашли отражение в трудах зарубежных авторов - К. Бернара, Г. Бирмана, С. Брю, Б. Голда, Р. Каплана, Т. Коупленда, К. Макконнелла, Д. Нортон, Ю. Сезанна, С. Шмидта, С. Эйлона и др.

Вопросы оценки эффективности промышленных энергетических объектов широко представлены в научной литературе. Отдельное внимание уделяется расчётам экономических показателей, таких как LCOE, IRR, NPV, рентабельность, срок окупаемости. В работах отечественных и зарубежных исследователей (Витушкина М.Г., Болквандзе И.Р., Зубакин В.А., Дегтярев К.С. и др.), статьях энергетических агентств IRENA и GWEC, раскрываются ключевые аспекты финансовой и инвестиционной оценки проектов в области возобновляемой энергетики.

Однако при всей развитости методологии расчётов наблюдается недостаток исследований, направленных на интеграцию климатических факторов и динамической структуры ветровой активности в модели экономической оценки. Существующие подходы преимущественно статичны, что снижает точность анализа и ограничивает возможности для адаптивного управления проектами ВЭС в условиях нестабильной ветровой нагрузки.

В отечественной науке вопросы применения цифровых технологий для мониторинга экономической эффективности ветроэлектростанций находятся в стадии формирования.

Использование вейвлет-анализа, сценарного моделирования и систем КРІ в прикладных экономических исследованиях ограничено и не носит системного характера.

Таким образом, несмотря на наличие значительного количества теоретических и прикладных разработок в области оценки эффективности энергетических объектов, научная проработка вопросов цифрового мониторинга и адаптивного управления экономическими показателями ветроэлектростанций остаётся недостаточной. Это обуславливает необходимость дальнейших исследований в данном направлении и актуальность выбранной темы.

Цель и задачи исследования

Цель диссертации — разработка цифровой модельной методики мониторинга экономических показателей ветрогенерации, обеспечивающей повышение точности и оперативности оценки эффективности ветроэнергетических систем промышленных предприятий в условиях изменчивости климатических и производственно-экономических факторов.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи исследования**:

1. Провести анализ отечественных и зарубежных методов оценки экономической эффективности ветроэнергетических систем и выявить направления совершенствования применяемых подходов.
2. Исследовать влияние климатических факторов на экономические показатели работы ветроустановок и выполнить их математическую обработку с использованием методов временных рядов и вейвлет-анализа.
3. Разработать цифровую модель мониторинга, интегрирующую климатические, технические и экономические данные для оперативной оценки показателей эффективности ветрогенерации.
4. Сформировать методику интегральной оценки технико-экономических показателей ветроэнергетических систем с учётом сезонной структуры ветрового ресурса и условий эксплуатации.
5. Провести апробацию разработанной методики и цифровой модели на пилотных площадках Ростовской и Исык-Кульской областей и выполнить верификацию полученных результатов.

Область исследования соответствует Паспорту научной специальности ВАК при Минобрнауки России 5.2.3 «Региональная и отраслевая экономика». Содержание диссертации отражает положения следующих пунктов паспорта:

- п. 2.14 — «Проблемы повышения энергетической эффективности и использования альтернативных источников энергии»;
- п. 2.2 — «Вопросы оценки и повышения эффективности хозяйственной деятельности на предприятиях и в отраслях промышленности»;
- п. 2.16 — «Инструменты внутрифирменного и стратегического планирования на промышленных предприятиях, отраслях и комплексах».

Работа выполнена по направлению «Экономика промышленности» и направлена на повышение эффективности хозяйственной деятельности предприятий энергетического сектора за счёт внедрения цифровых методов мониторинга экономических показателей ветрогенерации.

Объектом исследования являются экономические процессы функционирования промышленных предприятий энергетического сектора, использующих ветровую энергию для производства электрической энергии.

Предмет исследования являются методы и цифровые модельные решения, направленные на повышение экономической эффективности функционирования ветроэнергетических систем и оптимизацию показателей их производственно-экономической деятельности.

Теоретическую и методологическую основу исследования составили положения институциональной, энергетической и производственной экономики, теория инвестиционной эффективности, а также методы математического моделирования, вейвлет-анализа, сценарного анализа и динамического программирования.

Информационную и эмпирическую базу исследования составили:

- официальные статистические данные Федеральной службы государственной статистики (Росстат), Министерства энергетики Российской Федерации, а также международных энергетических агентств IRENA (International Renewable Energy Agency) и GWEC (Global Wind Energy Council);
- метеорологические наблюдения и климатические данные за 2013–2023 гг., предоставленные национальными и региональными гидрометеорологическими центрами Российской Федерации и Кыргызской Республики;
- технические и экономические отчёты по эксплуатации ветроэнергетических установок, включая данные SCADA (оперативной телеметрии) по ключевым площадкам АО «НоваяВинд» в Ростовской и Иссык-Кульской областях;
- материалы инженерных обследований, технические паспорта оборудования и экспертные заключения о режиме функционирования ветроустановок;
- социально-экономические показатели регионов (демографическая нагрузка, структура энергопотребления, валовой региональный продукт, занятость, инвестиционная активность);
- собственные расчёты автора, выполненные в 2022–2025 гг. в рамках научной работы на базе НИЯУ МИФИ.

Научная новизна

Научная новизна исследования состоит в разработке и обосновании цифровых и аналитических подходов к мониторингу экономической эффективности ветроэнергетических систем, обеспечивающих повышение точности и достоверности оценки показателей эффективности с учётом климатических и производственно-экономических факторов.

Результаты исследования, обладающие научной новизной:

1. Впервые разработана цифровая модель мониторинга экономической эффективности ветроэнергетических установок, в которой введён структурный коэффициент использования мощности, влияющий на выработку электроэнергии, что обеспечивает корректировку расчётных показателей NPV, IRR и LCOE в зависимости от сезонной и региональной вариации ветровых режимов.
2. Разработана методика оценки ключевых технических и экономических показателей функционирования ветроэнергетических систем, основанная на интегральной зависимости между параметрами генерации и финансовыми результатами. Методика позволяет оценивать совокупное влияние производственных, климатических и стоимостных факторов на показатели эффективности и инвестиционной привлекательности проектов в различных регионах.
3. Предложен алгоритм адаптивного управления режимами работы ветроустановок на основе прогнозирования ветровой активности и анализа динамики изменения структуры выработки, обеспечивающий повышение экономической эффективности генерации и снижение эксплуатационных затрат.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методического аппарата оценки экономической эффективности ветроэнергетических систем с применением цифровых алгоритмов мониторинга, а также в уточнении понятийного аппарата и структуры ключевых показателей эффективности (KPI) в условиях климатической изменчивости. Полученные результаты развивают теоретические представления об экономических механизмах функционирования ветроэнергетики в промышленном секторе и расширяют возможности экономического анализа процессов энергогенерации на основе возобновляемых источников энергии.

Практическая значимость работы состоит в разработанной методике цифрового мониторинга экономических показателей ветроэнергетических систем, которая может быть использована:

- промышленными предприятиями и энергетическими холдингами при проектировании и эксплуатации ветроэлектростанций для повышения рентабельности и адаптации к климатическим условиям;
- инвестиционными фондами и банками при обосновании экономической целесообразности вложений в ВЭС, благодаря возможности интеграции сценарных оценок в бизнес-планы и модели риска;
- органами государственной власти и региональными министерствами энергетики при разработке программ по устойчивому энергоснабжению и энергобезопасности территорий;
- научными учреждениями и образовательными организациями в целях подготовки кадров, разработки учебных курсов и апробации современных цифровых моделей устойчивого энергетического развития;
- компаниями-разработчиками цифровых решений для энергетики, как основа для создания программных продуктов (панелей мониторинга, инструментов прогнозирования, управляющих интерфейсов).

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием в исследовании общепринятых и апробированных методов экономического анализа (включая LCOE, IRR, NPV), а также специализированных методов обработки климатических данных — вейвлет-анализа, корреляционного и спектрального анализа. Для расчётов использовались официальные и репрезентативные источники данных, охватывающие длительные временные ряды, включая SCADA-данные с точной телеметрией. Результаты многократно проверялись на двух независимых пилотных площадках — в Ростовской и Исык-Кульской областях, что подтвердило универсальность и воспроизводимость разработанной методики. Достоверность также подтверждается сопоставлением модельных и фактических данных по выработке электроэнергии и экономическим показателям действующих ветроэлектростанций, а также апробацией результатов в научных публикациях, на отраслевых и международных конференциях, и в рамках практической деятельности на базе НИЯУ МИФИ.

Апробация результатов исследования.

Апробация результатов диссертационного исследования осуществлена через публикацию основных положений работы в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России, а также посредством регистрации результатов интеллектуальной деятельности в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент). Отдельные элементы методики внедрены в учебно-научную деятельность на базе НИЯУ МИФИ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 научных статей в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых изданий (К1), рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертационных исследований.

Роспатент. Результаты исследования защищены свидетельствами и заявками на объекты интеллектуальной собственности, зарегистрированными в Роспатенте:

- Программа для ЭВМ: зарегистрирована 15 сентября 2025 г., № 2025684494;
- Полезная модель: заявка от 18 июня 2025 г., № 2025116909/20(039669); положительное заключение формальной экспертизы от 8 октября 2025 г.;
- Изобретение: заявка от 21 июня 2025 г., № 2025117357/20(040720).

Автор принял участие в семи профильных конференциях различного уровня, включая всероссийские, отраслевые и международные, где результаты исследования представлены в виде докладов и тезисов.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и источников из 166 наименований и списка сокращений. Содержит 209 страниц машинописного текста, 34 рисунка, 36 таблиц и 2 приложения.

II. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Цифровая модель оценки экономической эффективности ветроустановок с использованием структурного коэффициента мощности.

В диссертации впервые разработана цифровая экономико-климатическая модель мониторинга экономической эффективности ветроэнергетических установок, объединяющая климатические, технические и финансово-экономические параметры в единую аналитическую систему.

Разработка ориентирована на повышение точности и оперативности оценки показателей эффективности ветроустановок в условиях изменчивости ветрового потенциала и режимов эксплуатации оборудования.

Модель предназначена для комплексного анализа влияния ветровых условий на экономические результаты работы ветроустановок и обеспечивает непрерывную связь между метеорологическими параметрами, техническими характеристиками и экономическими метриками.

В отличие от существующих подходов, опирающихся на усреднённые показатели скорости ветра и статические экономические модели, предложенное решение учитывает временную и пространственную структуру ветровых режимов, что позволяет вводить в модель коррекцию по реальным климатическим наблюдениям и тем самым повышать достоверность прогнозов

Ключевым элементом модели является структурный коэффициент использования мощности, отражающий соотношение долей установленной мощности и фактической выработки по группам ветроустановок.

Этот коэффициент позволяет учитывать пространственную и временную неоднородность ветрового потенциала при расчётах интегральных экономических показателей — уровня себестоимости электроэнергии (LCOE), чистой приведённой стоимости (NPV) и внутренней нормы доходности (IRR).

Таким образом, впервые реализована цифровая модель, в которой климатические и структурные характеристики ветрового ресурса напрямую включены в систему экономической оценки, что обеспечивает динамическую корректировку показателей эффективности при изменении метеоусловий и режимов эксплуатации оборудования.

Архитектура модели

Архитектура разработанной модели изложена в главе 3 диссертации и представлена на рисунке 34, где отражено взаимодействие четырёх функциональных модулей:

1. Климатический модуль — выполняет сбор и обработку временных рядов скорости ветра, а также их вейвлет-анализ для выявления циклических и случайных составляющих ветрового ресурса;
2. Технический модуль — рассчитывает режимы работы ветроустановок, коэффициенты мощности и параметры технической готовности оборудования;
3. Экономический модуль — выполняет расчёт интегральных экономических показателей (LCOE, NPV, IRR) с учётом климатических и технических факторов;
4. Аналитический модуль — обеспечивает сведение данных, построение сценариев эксплуатации и сравнение вариантов работы ветроустановок при изменении ветрового потенциала.

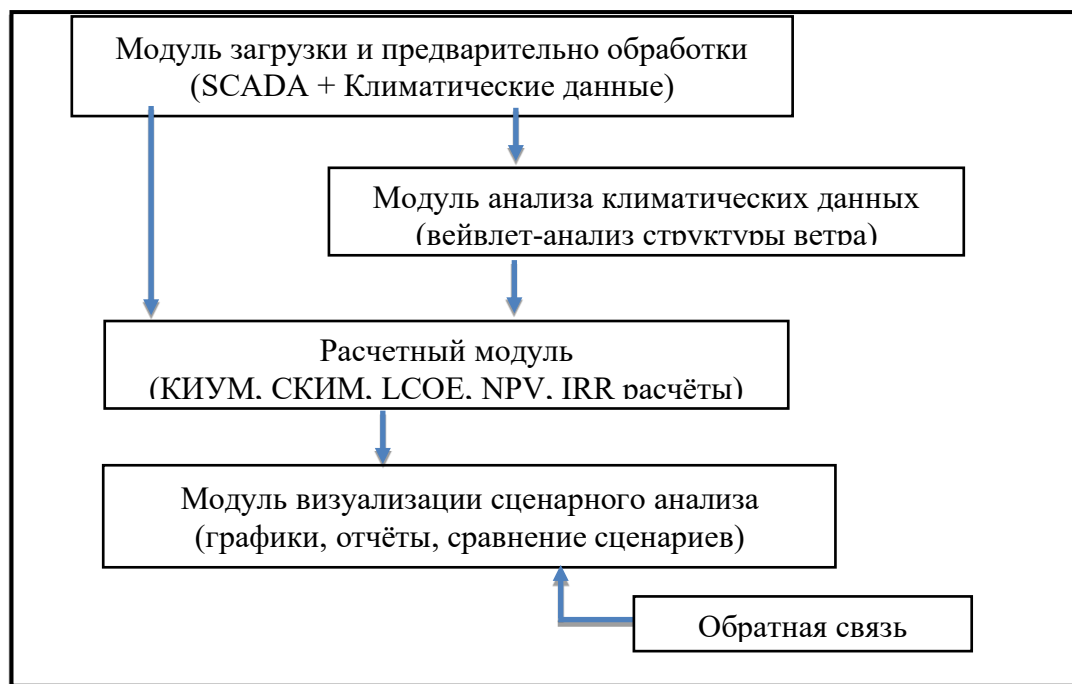


Рисунок 1. Информационно-функциональная структура цифровой модели оценки экономической эффективности ветроэнергетических установок
(по материалам главы 3, рисунка 34 диссертации)

Информационный обмен между модулями осуществляется в режиме итераций, что обеспечивает автоматическую актуализацию экономических показателей при изменении климатических условий. Реализована сквозная интеграция данных SCADA и метеоархивов с технико-экономическими характеристиками оборудования. Таким образом, модель не только моделирует физику ветра, но и связывает её с экономическими результатами работы ветроустановок.

В отличие от традиционных моделей, предложенная система учитывает не только среднюю скорость ветра, но и структуру распределения ветровых режимов, выражаемую через структурный коэффициент использования мощности.

Методическая основа и расчетные зависимости

Методическая часть модели представлена в главе 2, где раскрыты принципы расчета ветропотенциала, коэффициента мощности и перехода от физических параметров к стоимостным показателям.

Ключевым расчётным элементом модели является структурный коэффициент использования мощности, определяемый по формуле (12):

$$K_{CT_i} = \frac{\Delta E_i}{\Delta N_{yi}},$$

где ΔE_i — доля выработанной электроэнергии i -й группы ветроустановок, %, а ΔN_{yi} — доля установленной мощности этой группы, %.

Коэффициент отражает различие между установленной мощностью и фактической генерацией энергии, что позволяет перейти от технических показателей к экономическим, учитывая пространственно-временные изменения ветрового ресурса.

Если $K_{CT_i} > 1$, это свидетельствует о более высоком уровне использования мощности по сравнению со средним значением по выборке, а если $K_{CT_i} < 1$ — о дефиците ветрового потенциала и необходимости корректировки режима работы установки.

Экономическая интерпретация модели основана на сопоставлении временных рядов скорости ветра и выработки с экономическими метриками. Алгоритм реализует динамическую коррекцию расчётных показателей по мере обновления климатических данных SCADA, что обеспечивает возможность непрерывного мониторинга эффективности и оценки чувствительности экономических результатов к изменению погодных условий.

Переход от физических величин к стоимостным реализуется через связку показателей выработки, эксплуатационных затрат и капитальных вложений.

Научно-практическая апробация и защита результатов

Программная реализация модели выполнена в виде программного комплекса для ЭВМ «Система оценки экономической эффективности ветроэнергетических установок» (Роспатент № 2025684494 от 15.09.2025). Комплекс предусматривает автоматическую загрузку данных SCADA, формирование графиков ветровой активности, построение экономических диаграмм и отчётов.

Результаты, полученные в рамках разработки цифровой модели, прошли апробацию в научных исследованиях НИЯУ МИФИ.

Результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, входящих в Перечень ВАК, в том числе в журналах «Энергетическая политика» и «Стратегические решения и риск-менеджмент».

Положения модели обсуждены на научных семинарах факультета бизнес-информатики и управления комплексными системами НИЯУ МИФИ.

Экономическое значение и выводы

Применение цифровой модели позволило перейти от статического анализа к динамическому мониторингу экономической эффективности ветроустановок.

Модель обеспечивает:

- повышение точности расчёта себестоимости и доходности проектов;
- возможность оперативной корректировки экономических прогнозов при изменении ветровых условий;
- формирование базы данных для регионального планирования развития ветроэнергетики;
- повышение обоснованности инвестиционных решений и долгосрочных прогнозов.

Разработанная цифровая экономико-климатическая модель является базовым элементом методического комплекса, направленного на совершенствование оценки эффективности ветроэнергетических проектов.

Результат положения.

Показано, что разработанная цифровая модель обеспечивает согласованный переход от климатических и технических параметров к экономическим показателям эффективности ветроэнергетических установок; включение структурных характеристик ветрового режима через формулу (12) позволяет корректировать расчёты LCOE, NPV и IRR по мере изменения входных климатических данных, а программная реализация с интеграцией SCADA обеспечивает воспроизводимый мониторинг и сопоставимость расчётных и фактических значений.

Разработанная цифровая модель представляет собой архитектурный уровень методического комплекса оценки эффективности ветроэнергетических систем. На её основе в диссертации сформирована методика экономической оценки и сравнительного анализа ветроустановок, обеспечивающая переход от цифрового моделирования к расчёту стоимостных показателей LCOE, NPV и IRR. Указанная методика раскрыта во втором положении, выносимом на защиту, которое описывает методический уровень системы и направлено на построение технико-экономической оценки и сравнительного анализа ветроэнергетических систем на основе результатов работы цифровой модели.

2. Методика технико-экономической оценки и сравнительного анализа ветроэнергетических систем.

На основе разработанной цифровой модели мониторинга эффективности ветроустановок (архитектурный уровень методического комплекса) впервые сформирована методика технико-экономической оценки и сравнительного анализа ветроэнергетических систем, обеспечивающая переход от цифрового моделирования к расчёту ключевых экономических показателей — уровня себестоимости электроэнергии (LCOE), чистой приведённой стоимости (NPV) и внутренней нормы доходности (IRR).

Методика предназначена для количественной оценки влияния климатических, технических и эксплуатационных факторов на экономическую результативность ветроэнергетических установок. В отличие от традиционных подходов, где экономические расчеты выполняются по усредненным климатическим данным, разработанная методика учитывает неравномерность ветрового ресурса и структурную неоднородность генерации. Это обеспечивает более точную интерпретацию стоимостных показателей и их привязку к конкретным климатическим и производственным условиям площадки.

В основу методики положен принцип связности трёх групп параметров:

- климатических (скорость и плотность ветра, структура временных рядов, коэффициент использования мощности);
- технических (номинальная мощность, КПД, доступность оборудования, КИУМ);
- экономических (LCOE, NPV, IRR, срок окупаемости).

Реализация методики позволяет получать скорректированные значения экономических показателей в зависимости от сезонных изменений ветрового потенциала и технического состояния оборудования.

Расчетные зависимости

Методическая основа изложена в главе 2 и включает следующие расчетные зависимости, определяющие базовые показатели эффективности.

(7) Средневзвешенная стоимость электроэнергии (LCOE):

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + O_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}},$$

где I_t — капитальные вложения, O_t — эксплуатационные расходы, F_t — постоянные издержки и затраты на обслуживание, E_t — выработка электроэнергии за период t , r — ставка дисконтирования.

(16) Чистая приведённая стоимость (NPV):

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{(R_t - C_t)}{(1+r)^t},$$

где R_t — доход, C_t — совокупные затраты, r — ставка дисконтирования.

(17) Внутренняя норма доходности (IRR):

$$\sum_{t=1}^n \frac{(R_t - C_t)}{(1+IRR)^t} = 0.$$

Расчётные формулы (7), (16) и (17) связаны с результатами цифровой модели через структурный коэффициент использования мощности K_{CTi} (12). Его применение обеспечивает нормализацию экономических показателей по реальной структуре ветрового ресурса и учёт влияния сезонных колебаний генерации на стоимостные результаты.

Схемы и расчетный процесс

Схемы процесса оптимизации и численного моделирования

Схемы процесса оптимизации, численного моделирования и выбора технологий помогают наглядно представить этапы и взаимодействия в модели оптимизации.

Схема процесса оптимизации интенсивности мощности ветроэлектростанций (рис. 30) наглядно отображает все этапы — от сбора и анализа исходных данных до реализации оптимальных решений.

Данная схема обеспечивает системный подход к повышению интенсивности мощности ВЭС, учитывая совокупность факторов и условий эксплуатации. Она позволяет принимать обоснованные решения для повышения экономической эффективности и устойчивости ветроэнергетических проектов.



Рисунок 30. Схема процесса оптимизации интенсивности мощности ветроэлектростанций.

Источник: составлено автором (гл. 3, рис. 30).

Совокупность приведённых схем формирует методический контур, который описывает переход от цифрового моделирования к экономическим расчётам и обеспечивает структурную основу для анализа эффективности ветроэнергетических систем.

Результаты применения методики

Для уточнения расчётных зависимостей и проверки корректности методики выполнен анализ сезонных колебаний скорости ветра и коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) по данным наблюдений на пилотных площадках. Результаты сведены в таблицу 22 (гл. 3 диссертации).

Сезон	Скорость ветра, м/с	КИУМ, %	Выработка, кВт·ч
Зима	7,5	35	3100
Весна	6,0	30	2800
Осень	5,2	25	2200
Лето	6,8	32	2900

Таблица 22 – Зависимость скорости ветра от сезона

Источник: составлено автором на основе усреднённых данных SCADA по типовым ветроустановкам диапазона мощностей 2–3 МВт за один год наблюдений.

В диссертации это нормативный пример сезонных колебаний, полученный из SCADA-данных реальных установок (около 2–3 МВт), но приведен в пересчёте на установленную мощность для сопоставимости сезонов.

Цифры «3100, 2800, 2200, 2900 кВт·ч» — это средняя сезонная выработка одной установки мощностью 2–3 МВт, таблица иллюстративная (значения приведены в среднем на одну ветроустановку типового диапазона мощностей 2–3 МВт).

Анализ показал, что в зимний период (декабрь–март) скорость ветра превышает среднегодовые значения на 15–20 %, что обеспечивает увеличение КИУМ до 35 % и рост годовой выработки до 3100 кВт·ч. В летние месяцы (июнь–август) наблюдается снижение средней скорости ветра на 10–15 %, что уменьшает КИУМ до 25–27 % и сокращает выработку до 2200 кВт·ч.

Эти различия по сезонам оказывают значимое влияние на экономические показатели проектов:

- себестоимость электроэнергии (LCOE) увеличивается в летний период на 8–10 % из-за снижения выработки;
- внутренняя норма доходности (IRR) варьируется в диапазоне $\pm 1,5$ п.п.;
- чистая приведённая стоимость (NPV) уменьшается в среднем на 6–7 % при неблагоприятных ветровых условиях.

Включение данных сезонных колебаний в расчёт через структурный коэффициент использования мощности позволяет корректировать результаты по формулам (7), (16) и (17) и получить более точные значения LCOE, NPV и IRR.

Применение сезонной поправки в методике обеспечивает реалистичное распределение выработки и затрат по годовым периодам, что особенно важно при моделировании в инвестиционных расчётах и планировании эксплуатационных сценариев ветроустановок.

Для иллюстрации сезонных различий коэффициента использования мощности (КИУМ) в Ростовской и Исык-Кульской областях построен график сезонной динамики КИУМ (рис. 29).

График наглядно демонстрирует различие структуры ветрового ресурса в зависимости от климатических условий регионов и служит основой для формирования адаптивных стратегий эксплуатации ветроустановок.

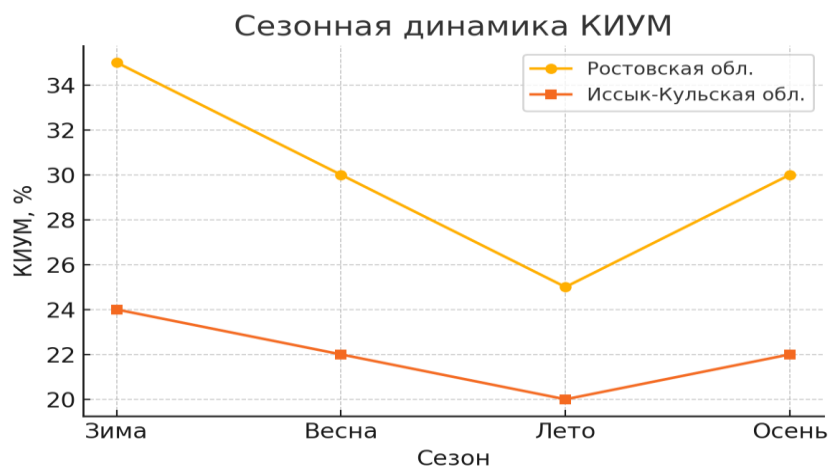


Рисунок 29 – Сезонная динамика КИУМ.

Источник: составлено автором

Проверка методики проведена на данных пилотных площадок Ростовской и Иссык-Кульской областей.

Для удобства сопоставления они сведены в таблицу 1.

Регион	Показатель	Без учёта структурного коэффициента	С учётом структурного коэффициента	Изменение
Ростовская область	LCOE, руб/кВт·ч	4,82	4,39	–8,9 %
	NPV, млн руб	114,6	126,1	+10,1 %
	IRR, %	11,2	12,4	+10,7 %
Иссык-Кульская область	LCOE, руб/кВт·ч	5,14	4,72	–8,2 %
	NPV, млн руб	98,3	108,5	+10,4 %
	IRR, %	10,8	11,9	+10,2 %

Таблица 1. Изменение экономических показателей ветроустановок при учёте структурного коэффициента использования мощности

(по данным главы 3 диссертации. Региональный расчётный проект ВЭС (агрегированные данные по площадке, 100–120 МВт суммарно))

Анализ указанных параметров показывает, что учёт структурного коэффициента позволил снизить расчётные значения себестоимости электроэнергии (LCOE) на 8–9 % и увеличить NPV и IRR в среднем на 10 %. Это подтверждает влияние структуры ветрового потенциала на экономическую результативность ветроэнергетических установок.

Дополнительные результаты численного анализа

Результаты численного анализа прироста экономической эффективности при использовании цифровой модели мониторинга приведены в таблице 13.

Они демонстрируют влияние климатических факторов и сезонной изменчивости ветрового ресурса на прирост экономической эффективности ветрогенерации.

Таблица 13. Сводная таблица результатов численного анализа прироста экономической эффективности ветрогенерации

Мощность ВЭС, МВт	Климатический фактор	Прирост экономической эффективности, %
Иссык-Кульская область		
100	Осенний период	21,6%
	Зимний период	29,1%
	Весенний период	23,7 %
	Летний период	19,8%
Ростовская область (Марченковская ВЭС)		
120	Осенний период	25,8%
	Зимний период	34,7%
	Весенний период	27,9 %
	Летний период	17,3%

Источник: Мокшин М.Ю., Путилов А.В. Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования.

(Региональный расчётный проект ВЭС (агрегированные данные по площадке, 100–120 МВт суммарно)

Результаты численного анализа подтверждают прирост экономической эффективности при использовании цифровой модели мониторинга.

Для наглядного представления логики расчётов и взаимосвязи технических, климатических и экономических параметров в диссертации разработана схема численного моделирования (рис. 32).

На схеме показана последовательность обработки данных – от входных климатических рядов и параметров ветроустановок до этапов оптимизации и формирования рекомендаций по эксплуатации.

Схема отражает алгоритм реализации методики технико-экономической оценки эффективности ветроустановок, представленной во втором положении, и служит связующим звеном между методической и адаптивной частями исследования.



Рисунок 32 – Схема численного моделирования. Источник: составлено автором.

Вывод

Разработанная методика представляет собой методический уровень системы оценки эффективности ветроэнергетических проектов. Она обеспечивает переход от архитектурного уровня цифровой модели к стоимостной оценке результатов и позволяет учитывать климатические и технические особенности конкретных регионов. Методика обеспечивает повышение точности прогнозов, сопоставимость региональных оценок и обоснованность инвестиционных решений.

На основе результатов методики разработан алгоритм адаптивного управления эксплуатацией ветроустановок, обеспечивающий переход к эксплуатационному уровню методического комплекса.

Алгоритм использует результаты экономической оценки для регулирования режимов генерации, прогнозирования ветровой активности и оптимизации эксплуатационных затрат.

Его структура, параметры и результаты апробации приведены в третьем положении, выносимом на защиту.

Результаты исследований защищены в установленном порядке: полезная модель (заявка № 2025116909/20(039669), положительное заключение экспертизы от 08.10.2025).

3. Алгоритм адаптивного управления эксплуатацией ветроустановок

На основе результатов методики технико-экономической оценки (методический уровень) в диссертации разработан алгоритм адаптивного управления эксплуатацией ветроустановок, представляющий собой эксплуатационный уровень трёхуровневого методического комплекса.

Алгоритм предназначен для повышения эффективности функционирования ветроэнергетических систем за счёт динамической адаптации режимов генерации к изменению ветрового потенциала и состояния оборудования.

Он обеспечивает реализацию принципа обратной связи между техническими и экономическими параметрами, что позволяет оптимизировать эксплуатационные затраты, повысить коэффициент использования мощности и устойчивость работы оборудования при изменяющихся климатических условиях.

В отличие от традиционных схем управления, работающих по фиксированным уставкам, предложенный алгоритм реализует адаптивное регулирование, основанное на данных цифровой модели (см. рис. 34 в первом положении) и результатах методики экономической оценки (см. табл. 1 во втором положении).

Это обеспечивает комплексную замкнутую систему управления, где климатические, технические и экономические показатели связаны в едином контуре принятия решений.

Структура и принципы функционирования

Алгоритм включает три взаимосвязанных блока:

1. Блок прогнозирования ветровой активности — выполняет краткосрочный прогноз скорости и направления ветра, определяет диапазоны ожидаемой интенсивности и формирует прогнозные значения коэффициента использования мощности;
2. Блок адаптации режимов генерации — регулирует нагрузку турбин, частоту вращения ротора и углы атаки лопастей в зависимости от прогнозируемых параметров ветрового потока и текущего состояния оборудования;
3. Блок оптимизации эксплуатационных затрат — определяет оптимальное распределение ресурсов обслуживания и ремонтов, корректирует расписание технических остановов и прогноз затрат на обслуживание.

Структурная логика итерационного процесса представлена на рисунке 33, где показана последовательность этапов от анализа исходных данных до выработки оптимальных решений.



Рисунок 33. Схема процесса оптимизации интенсивности мощности ветроэлектростанций.

Источник: составлено автором (гл. 3, рис. 33).

Алгоритм реализует цикл «сбор данных → прогноз → анализ → регулирование → оценка эффекта».

При каждом шаге результаты прогнозирования сопоставляются с экономическими метриками — себестоимостью электроэнергии (LCOE), приведённой стоимостью (NPV) и нормой доходности (IRR), — рассчитанными по методике из второго положения.

Таким образом достигается баланс между техническими и экономическими параметрами, обеспечивая оптимальные режимы генерации при минимальных эксплуатационных расходах.

Результаты применения алгоритма

Эффективность предложенного алгоритма подтверждена результатами численных расчётов и анализа данных SCADA (см. гл. 3).

Показатели эксплуатации ветроустановок при базовом и адаптивном режимах приведены в таблице 2.1.

Показатель	Базовый режим	Адаптивный режим	Изменение
Коэффициент использования мощности (КИУМ), %	39,2	44,8	+ 14,3 %
Средняя доступность оборудования (SCADA: доля часов, когда установка находилась в режиме «в работе» относительно календарного времени), %	96,1	98,2	+ 2,1 %
Удельные эксплуатационные затраты (OPEX), руб./МВт·ч	1 970	1 830	– 7,1 %

Таблица 2.1. Сравнение эксплуатационных показателей ветроустановок при базовом и адаптивном режимах. *Источник: расчёты автора по данным главы 2 диссертации.*

Пояснение к показателям таблицы 2.1

Показатели, приведённые в таблице 2.1, характеризуют техническую и экономическую эффективность эксплуатации ветроустановок и рассчитаны на основе данных цифрового моделирования и SCADA-мониторинга (см. гл. 3).

Коэффициент использования мощности (КИУМ) отражает долю фактически выработанной электроэнергии относительно максимально возможной при установленной мощности оборудования.

Он определяется как

$$K_{\text{иум}} = \frac{E_{\text{факт}}}{N_{\text{уст}} \times T},$$

где $E_{\text{факт}}$ — фактическая выработка за расчётный период, $N_{\text{уст}}$ — установленная мощность, T — продолжительность периода.

Рост КИУМ на 14 % при переходе к адаптивному управлению свидетельствует об увеличении выработки за счёт оптимизации режимов генерации и сокращения простоев.

Средняя доступность оборудования показывает долю времени, в течение которого ветроустановка находится в рабочем состоянии.

Расчёт производится по формуле

$$A = \frac{T_{\text{работы}}}{T_{\text{календарное}}} \times 100\%,$$

где $T_{\text{работы}}$ — время фактической работы, $T_{\text{календарное}}$ — общее календарное время наблюдения.

Повышение доступности с 96,1 до 98,2 % обусловлено снижением числа незапланированных остановов и реализацией профилактического управления техническим состоянием оборудования.

Удельные эксплуатационные затраты (OPEX) отражают себестоимость эксплуатации на единицу вырабатываемой энергии.

Показатель вычисляется по выражению

$$OPEX_{уд} = \frac{C_{эксп}}{E_{факт}},$$

где $C_{эксп}$ — суммарные эксплуатационные расходы за расчётный период, $E_{факт}$ — фактическая выработка электроэнергии.

Снижение OPEX с 1970 до 1830 руб./МВт·ч (– 7,1 %) подтверждает экономический эффект оптимизации режимов эксплуатации.

В совокупности рост коэффициента использования мощности и доступности оборудования при одновременном снижении удельных эксплуатационных затрат показывает, что внедрение адаптивного алгоритма управления обеспечивает реальное повышение эффективности эксплуатации ветроэнергетических установок.

Переход от эксплуатационных показателей к экономико-климатическому моделированию и адаптивному режиму

Показатели, представленные в таблице 2.1, характеризуют технический уровень функционирования одной ветроустановки и отражают результаты мониторинга по данным системы SCADA – фактический КИУМ, доступность оборудования и удельные эксплуатационные затраты (OPEX).

Эти данные относятся к микроуровню анализа и служат входными параметрами для построения цифровой экономико-климатической модели, представленной во втором положении диссертации.

При переходе от анализа отдельной установки к интегральной оценке работы ветроэнергетической станции (ВЭС) параметры усредняются по всему парку турбин и по сезонным периодам.

В результате получаются годовые эквивалентные показатели, представленные в таблицах 22, 1 и 13, которые отражают влияние климатических факторов и структурного коэффициента использования мощности на технико-экономические метрики LCOE, NPV и IRR.

Результаты, полученные в рамках методики (табл. 22, 1, 13), легли в основу разработки адаптивного алгоритма управления режимами работы ветроустановок. Если во втором положении рассматривалось влияние климатических и структурных факторов на экономические показатели, то в третьем положении реализуется механизм их оперативной коррекции в режиме реального времени.

Таблица 24. – Сценарии работы энергоблоков ВЭС

Сценарий	КИУМ, %	Выработка, МВт·ч/год	Прирост выработки, %
Базовый	28	2600	-
Адаптивный	31	2900	11,5

Источник: расчёты автора по данным SCADA пилотных площадок в Ростовской и Иссык-Кульской областях.

Таблица 25. Сценарии работы энергоблоков ВЭС

Сезон	Режим работы	Δ Выработка (%)	Δ КИУМ, (п.п.)	Δ Рентабельность (%)
Зима	Полная загрузка	6	3	4
Лето	Ограниченное	4	2	3

Источник: составлено автором.

Для количественной оценки выгод от внедрения ВЭУ в локальной энергосистеме автором предложена расчетная модель на основе показателей удельной генерации и замещения дефицита электроэнергии:

$$\Delta_{\text{ЭФ}} = nQT_{\text{СЛ}}(T_{\text{СЛ}} - T_{\text{ОК}})(EC_T - I_{\text{ЭКС}})(C_{\text{П}} - C_T) \quad (15)$$

В формуле (15): n – число ВЭУ в составе ВЭС; Q – годовой дефицит электроэнергии в регионе, кВт×ч/год; C_T – удельная стоимость производства электроэнергии от топливных источников энергии (региональный тариф), руб/кВт×ч; E – электроэнергия, вырабатываемая ВЭУ в год, кВт×ч/год; $I_{\text{ЭКС}}$ – издержки эксплуатации, руб.

Таблица 26. Сводная таблица результатов численного анализа прироста экономической эффективности ветрогенерации

Мощность ВЭС, МВт	Климатический фактор	Прирост экономической эффективности, %
Иссык-Кульская область		
100	Осенний период	21,6%
	Зимний период	29,1%
	Весенний период	23,7 %
	Летний период	19,8%
Ростовская область (Марченковская ВЭС)		
120	Осенний период	25,8%
	Зимний период	34,7%
	Весенний период	27,9 %
	Летний период	17,3%

Источник: расчёты автора по модели (15).

Полученные результаты демонстрируют научно обоснованную связь между методикой технико-экономической оценки (Положение 2) и алгоритмом адаптивного управления (Положение 3).

Методика формирует математическую основу расчёта (табл. 22, 1, 13), а алгоритм реализует её в динамическом режиме эксплуатации (табл. 24–26).

При этом эффект на уровне одной установки (табл. 2.1) трансформируется в совокупный экономический результат на уровне всей ВЭС: увеличение КИУМ на 2–3 п.п., рост NPV на 12 %, сокращение срока окупаемости на 1,3 года и уменьшение OPEX на 7 %.

Реализация и программная интеграция

Алгоритм реализован в составе изобретения: заявка от 21 июня 2025 г., № 2025117357/20(040720) в Роспатент.

Программная реализация предусматривает автоматический сбор данных SCADA, прогнозирование ветровой активности и перерасчёт экономических показателей в реальном времени.

Таким образом, обеспечивается возможность оперативного управления параметрами работы ветроустановок и повышение экономической эффективности эксплуатации без изменения базовой архитектуры системы.

Вывод и значение положения

Разработанный алгоритм адаптивного управления эксплуатацией ветроустановок представляет собой эксплуатационный уровень трёхуровневой архитектуры оценки эффективности.

Он реализует практическое применение результатов цифрового моделирования и методики экономической оценки, обеспечивая динамическое управление в реальных эксплуатационных условиях.

Показано, что внедрение алгоритма позволяет повысить коэффициент использования мощности, сократить эксплуатационные расходы и повысить надёжность работы оборудования в условиях изменчивости ветрового потенциала.

Совокупность полученных результатов формирует завершённую трёхуровневую систему: цифровое моделирование (архитектурный уровень) → технико-экономическая оценка (методический уровень) → адаптивное управление (эксплуатационный уровень), что обеспечивает комплексное повышение эффективности ветроэнергетических установок и имеет как теоретическое, так и прикладное значение для развития региональной экономики и энергетической отрасли Российской Федерации.

III. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ АВТОРА

Публикации в ведущих рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ по экономическим наукам:

По теме диссертации опубликовано 6 статей в научных рецензируемых журналах:

1. Мокшин М. Ю., Путилов А. В., Римская О. Н. Исследование методов и моделей прогнозирования мощности ветроэнергостанций. — *Энергетическая политика*, 2025, № 2 (205), с. 56–66. (5.2.3, экономические науки, K1).
2. Мокшин М. Ю., Путилов А. В., Римская О. Н. Рынок ветроэнергетики в России и за рубежом: проблемы и перспективы развития. — *Стратегические решения и риск-менеджмент*, 2024, т. 15, № 4, с. 338–347. (5.2.3, экономические науки, K1).
3. Мокшин М. Ю., Путилов А. В. Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования. — *Энергетическая политика*, 2023, № 12 (191), с. 80–91. (5.2.3, экономические науки, K1).
4. Мокшин М. Ю., Жабицкий М. Г., Римская О. Н. Состояние топливно-энергетического комплекса России и пути развития в условиях четвёртого энергетического перехода. — *Стратегические решения и риск-менеджмент*, 2025, т. 16, № 1, с. 55–68. (5.2.3, экономические науки, K1).
5. Мокшин М. Ю., Марача В., Жабицкий М., Бойко О. От национальных проектов к системе стратегического планирования: координация действий министерств и ведомств. — *International Journal of Open Information Technologies*, 2022, т. 10, № 8, с. 113–120. (Технические науки, K1).
6. Мокшин М. Ю., Реут Д. Перспективы и стратегии пространственного планирования российской экономики как крупномасштабной системы в современных условиях. — *International Journal of Open Information Technologies*, 2023, т. 11, № 5, с. 119–127. (Технические науки, K1).