

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**

5.2.3. Региональная и отраслевая экономика

Научный руководитель: Путилов Александр Валентинович, доктор технических наук, профессор, Академик отраслевой академии наук, декан Факультета бизнес-информатики и управления комплексными системами НИЯУ МИФИ

Автор:

Мокшин Михаил Юрьевич

Москва 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	15
1.1. Сущность экономической эффективности, показатели эффективности хозяйственной деятельности промышленного предприятия	15
1.2. Современное состояние и тенденции развития мировой и российской ветроэнергетики.....	37
1.3. Анализ методик мониторинга экономических показателей промышленного предприятия	54
Выводы по главе 1	72
ГЛАВА 2. ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ	75
2.1. Основные показатели эффективности работы ВЭС	75
2.2. Подходы к цифровому моделированию в ветроэнергетике. Модель цифрового моделирования экономических показателей ВЭС	95
2.3. Оптимизация работы ВЭС на основе алгоритмического анализа	126
Выводы по главе 2	154
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МОНИТОРИНГА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	157
3.1. Методика оценки интенсивности использования мощности ВЭС.....	157
3.2. Цифровая модель мониторинга экономических показателей ветроэнергетики	165
3.3. Апробация модели мониторинга экономических показателей ВЭС	176
Выводы по главе 3	179
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	182
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ И ИСТОЧНИКОВ.....	189
Приложение 1	210
Приложение 2.....	213

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы 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 Иссык-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 научной разработанности исследуемой 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. Сабинина. 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 перового 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., Алькатаа 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 труда 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.

Вопросами методики расчёта мощности ветра, эффективности работы ветропарков, финансирования инвестиционных проектов, развития ветроэнергетики в контексте целей устойчивого развития и иных финансово-экономических аспектах в разное время занимались российские ученые и исследователи Андриянов Д.Л., Алиходжина Н. В., Тягунов М. Г., Шестопалова Т. А., Велькин В. И., Зубакин В. А., Давыдов Д. Ю., Игнатьев Е. В., Обухов С. Г., Старкова Г. С., Манусов В. З., Мартьянов А. С., Кулагин В. А., Грушевенко Д. А., Капустин Н. О., Яковлева Д. Д., Головкин М. В., Сетраков А. Н., Томилин С. А., Глазунова А. М., Ковальчук Д. В., Климов Г. М., Артемьев А. Ю., Шакиров В. А., Юсупов К. И., Тожибоев С. Т., Путилов А. В., Мокшин М. Ю., Кирьянов Д. А., Куделин А. Г., Шерьязов С. К., Шелубаев М. В., Зинатуллин А. В., Чибисова Е. Ю., Беккер Н. А., Гвоздев В. А., Гуров В. И. и многие другие. Проблематика изучалась в профильных российских научно-исследовательских институтах и университетах: РАН, ЦАГИ, АО «ВИЭН», НИЯУ МИФИ, НИУ «МЭИ», Томском политехническом университете, РГУ нефти и газа и др. Однако единого подхода и официально утвержденной методики расчета мощности ветра в России на момент проведения исследования не сложилось.

Математическим методам исследования ветроэлектростанций уделено внимание в работах отечественных ученых Асанова М.М., Белякова П. Ю., Оборского Г.А., Мартьянова А.С., Оганесяна Э.В., Бекирова Э.А., Путилова А.В., Алиходжиной Н. В., Тягунова М. Г., Шестопаловой Т. А., Левченко С.А., Тютюма В.В., Орлова А.В., Чернышова А.В. 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., Болквадзе 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 KPI 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.

Гипотеза исследования: планомерное увеличение объема мощности и уменьшение стоимости единицы производства электроэнергии посредством ветрогенерации возможны, в том числе, за счет цифрового мониторинга экономических и технических характеристик работы ветроэлектростанции.

Полигоном исследования послужили пилотные регионы: Ростовская область (РФ) и Иссык-Кульская область (КР), где реализуются или планируются к реализации ветроэлектростанции, включая объекты АО «НоваВинд».

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.

Цель работы — 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.

Область исследования. Работа выполнена по специальности 5.2.3. «Региональная и отраслевая экономика». Содержание диссертации соответствует 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» и п. 2.16. «Инструменты внутрифирменного и стратегического планирования на промышленных предприятиях, отраслях и комплексах» в части, касающейся оценки и повышения эффективности хозяйственной деятельности ветроэлектростанций и стратегического планирования в энергетическом секторе, специальности 5.2.3. «Региональная и отраслевая экономика».

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

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.

Научная новизна исследования:

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.

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.

Основные научные результаты, выносимые на защиту и содержащие элементы научной новизны:

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.

2. Методика технико-экономической оценки и сравнительного анализа ветроэнергетических систем. На основе разработанной цифровой модели мониторинга эффективности ветроустановок 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).

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

Теоретической и методологической основой диссертационного исследования послужили положения институциональной, энергетической и производственной экономики, теория инвестиционной эффективности, методы математического моделирования, вейвлет-анализа, сценарного анализа и динамического программирования.

Информационно-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 данные и климатические наблюдения за 2013–2023 гг., предоставленные национальными и региональными гидрометцентрами РФ и Кыргызской Республики;
- технические и экономические отчёты по эксплуатации ВЭС, включая SCADA-данные (оперативные данные телеметрии) по ключевым площадкам ВЭС АО «НоваВинд» в Ростовской области и Иссык-Кульской области;
- материалы инженерных обследований, технические паспорта оборудования, а также экспертные заключения о режиме функционирования установок;
- социально-экономические показатели регионов, включая демографическую нагрузку, структуру потребления энергии, показатели валового регионального продукта, занятости, инвестиционной активности;
- собственные расчёты, построенные на основе моделирования и адаптивной оценки, выполненные автором в 2023–2025 гг. в рамках научной работы на базе НИЯУ МИФИ.

Методы исследования, примененные в работе: сравнительный, технико-экономический, статистический анализы данных; метод анализа и синтеза; метод причинно-следственных связей; экспертных и прогнозных оценок; анализа научных публикаций и статистических данных отрасли; вейвлет-анализ сезонных ветровых колебаний; имитационное моделирование генерации энергии; сценарный анализ экономической эффективности; математические расчёты показателей LCOE, IRR, NPV; построение моделей KPI-мониторинга в реальном времени.

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).

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается:

- использованием в работе общепринятых и апробированных методов экономического анализа, включая LCOE, IRR, NPV, а также специализированных методов анализа климатических данных (вейвлет-анализ, корреляционный и спектральный анализ);
- использованием официальных и репрезентативных источников данных, охватывающих длительные временные ряды, включая SCADA-данные с точной телеметрией;

- многократной проверкой результатов расчётов на двух независимых полигонах (Ростовская и Иссык-Кульская области), что позволило подтвердить универсальность и воспроизводимость методики;

- сопоставлением полученных модельных значений с фактическими значениями выработки электроэнергии и финансовыми результатами действующих ВЭС;

- апробацией результатов на конференциях, в публикациях и в рамках практической деятельности на базе НИЯУ МИФИ.

Список работ, опубликованных по теме диссертации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в научных статьях в рецензируемых изданиях, включенных в перечень, сформированный Минобрнауки России, по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки.

По теме диссертационного исследования опубликованы 6 работ, из которых 4 статьи опубликованы в изданиях, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Мокшин М.Ю., Путилов А.В., Римская О.Н. Исследование методов и моделей прогнозирования мощности ветроэнергостанций. Энергетическая политика. Номер 2 (205) 2025 стр. 56-66;

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. Том: 15. Номер: 4 Год: 2024 Страницы: 338-347;

3. Мокшин М.Ю., Путилов А.В. Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования. Энергетическая политика. Номер: 12 (191) Год: 2023. Страницы: 80-91;

4. Мокшин М.Ю., Жабицкий М.Г., Римская О.Н. Состояние топливно-энергетического комплекса России и пути развития в условиях четвертого энергетического перехода. Стратегические решения и риск-менеджмент. 2025;16(1): 55-68;

5. Мокшин М., 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. vol. 10, no. 8, с. 113-120;

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. vol. 11, no.5, С. 119-127.

Автор принял участие 7 профильных конференциях разного уровня, в том числе с докладами.

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).

Структура и объем диссертации обусловлены целью, поставленными задачами и логикой исследования. 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.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

1.1. Сущность экономической эффективности, показатели эффективности хозяйственной деятельности промышленного предприятия

Современный мир существует в условиях нестабильной политической ситуации, стагнации мировой экономики, военных конфликтах, опережающего уровня технологического развития, проникающей во все сферы жизни цифровизацией, миграционного кризиса и в целом высокой турбулентности глобальной экономической системы. В условиях глобализации мировой экономики и запущенных процессов изменения технологических укладов¹, перехода на 4-й энергетический уровень на фоне мировой зеленой повестки, переориентация стран на цифровую экономику², устойчивость и развитие российской экономики становится одним из приоритетов национальной политики. Фундамент экономики любого государства составляют промышленные предприятия, а их эффективная деятельность и конкурентоспособность является залогом развития национальной экономической системы.

Прежде чем рассматривать понятие «экономическая эффективность», следует рассмотреть составляющие его термины «эффект» и «эффективность». В современном экономическом словаре понятие «эффект»³ трактуется как достигаемый результат в его материальном, денежном или социальном выражении. В некоторых источниках, посвященных определению экономической эффективности, вместо термина «эффект» употребляется термин «результат». Эти два понятия практически идентичны и определяют достигнутый эффект или

¹ Глазьев С. Ю. Глобальная трансформация через призму смены технологических и мирохозяйственных укладов // AlterEconomics. 2022. Т. 19. № 1. С. 93-115. <https://doi.org/10.31063/AlterEconomics/2022.19-1.6>.

² Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» утвержденная протоколом заседания президиума Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам от 4 июня 2019 г. № 7.

³ Райзберг Б.А., Лозовский Л.Ш., Стародубцева Е.Б. Современный экономический словарь. НИЦ ИНФРА-М, 2014 стр. 512

результат от деятельности предприятия в абсолютном выражении.⁴ Понятие «эффективность» трактуется как относительный эффект, результативность процесса, операции, проекта, определяемые как отношение эффекта или результата к затратам, расходам, обусловившим или обеспечивающим его получение.⁵

Величина эффекта, как правило, задана и определяется расчетами. В одном случае затраты являются оптимальным вариантом – без потерь и перерасходов. В другом случае в затраты входят все возможные потери: простой оборудования, физическое повреждение продукции, наличие сверхнормативных запасов материально-технических ресурсов или их дефицит, а, следовательно, замены, низкое качество продукции, неполное использование технических средств и снижение производительности труда.

Термин «эффективность» широко применяется во многих сферах человеческой деятельности, в том числе и в экономической науке. В экономической теории существуют различные определения сущности понятия «экономическая эффективность». В экономике термин имеет особый и уникальный смысл, а суть самого определения остается идентичной в трактовке разных ученых, а также сохраняется комплексность и многофакторность содержания термина.

Исторически в экономической науке сложилось ⁴ подхода к трактовке понятия «экономическая эффективность».

Отношения между результатом и затратами. Приверженцем этого подхода стал классик политической экономии Д. Рикардо, который в 1817 году определили экономическую эффективность в работе «Начала политической экономии и налогового обложения» как отношение результата к определенному виду затрат, иначе — «превышение результата над затратами».⁶ Советский экономист Т.С. Хачатуров предлагал аналогичное определение эффективности: «Отношение экономического или социального эффекта к необходимым на его достижение затратам»⁷. Современные исследователи, например И.А. Мухина считает, что

⁴ Шарова И.Д. Определение экономической эффективности производственно-хозяйственной деятельности на различных уровнях управления.

⁵ Там же.

⁶ Политическая экономия Д.Рикардо. <https://ricardoeconomy.tilda.ws/>

⁷ Хачатуров Т.С. Эффективность капитальных вложений. М.: Экономика, 1979. 335 с

«эффективность – это соотнесение результата с затратами (или ресурсами), которые повлияли на данный результат»⁸, а для А. М. Фридмана «эффективность – это отношение эффекта (результата) к используемым или потребляемым ресурсам».⁹

Идея достижения максимальных результатов при минимальных затратах подразумевает акцент внимания не только на количественных показателях, но и на эффективности использования ресурсов и снижении издержек. «Способность корпорации преобразовывать свои ресурсы в готовый, имеющий потребительскую ценность продукт с наименьшими потерями», – аналогичным образом трактует понятие «эффективность» Д.С. Плетнев¹⁰. Исследователь Г.П. Журавлева¹¹ также представляет «эффективность как понятие, которое характеризует соотношение объема произведенных экономических благ и количества ресурсов, производство данного объема благ с минимальными издержками или же производство максимального объема благ при данных ресурсах».

Качественные аспекты эффективности. Т.В. Рыжкова и Л.В. Горелова описывают эффективность как «качественную категорию, связанную с интенсивностью деятельности предприятия».¹²

Это подразумевает, что эффективность может зависеть не только от количества результатов, но и от их качества, что также подтверждено трудами К.А. Наминовой,¹³ в учебнике по микроэкономике авторов Журавлевой Г.П., Позднякова Ю.А., Позднякова Н.А.¹⁴

⁸ Тулина Ю. Г. Шевцова, Н. В. Эффективность как экономическая категория. секция «экономика предпринимательства: концептуальный и региональный аспекты». Стр.145-147. file:///C:/Users/c/Desktop/osnovnye-podhody-k-opredeleniyu-effektivnosti-organizatsii-proizvodstva.pdf

⁹ Фридман А.М. Экономика предприятий торговли и питания потребительского общества: учебник. 5-е. изд., стер. М.: Дашков и К, 2019. 656

¹⁰ Архиреев А.В. Генезис понятия эффективности. Структура, состояние, оценка. DOI: 10.34670/AR.2024.43.45.004

¹¹ Журавлева Г.П. Экономическая теория. Микроэкономика – 1,2. Мезоэкономика: учебник. 7-е. изд. М.: Дашков и К, 2016. 934 с.

¹² Рыжкова Т.В., Горелова Л.В. Оценка эффективности деятельности предприятий (история и современность теории и методологии). Вестник Екатеринбургского института, № 4 (24), 2013. Стр: 051-055

¹³ Наминова К.А. Современное состояние страхования рисков сельскохозяйственных организаций с государственной поддержкой в России // Апробация. 2016. № 7 (46). С. 100-105.

¹⁴ Журавлева Г.П., Поздняков Ю.А., Поздняков Н.А. Экономическая теория. Микроэкономика. Учебник. НИЦ ИНФРА-М, 400 с.

Способность достигать целей. По определению А. Азрилияна, экономическая эффективность это «способность приносить эффект, оказывать действие».¹⁵ Подразумевается, что эффективность может измеряться не только количественно, но и качественно, с ориентацией на достижение конкретных целей. Экономист С.Л. Соркин говорит об эффективности как о «результативности функционирования любой системы, в том числе экономической»¹⁶.

Понятие «экономическая эффективность» широко использовалось в трудах известных зарубежных ученых. К. Маркс, определял экономическую эффективность как «основное условие трансформации одной общественно-политической формации в другую».¹⁷ Дж. Гэлбрейт писал, что «экономическая эффективность определяется способностью достигать поставленных целей»¹⁸.

С целью более глубокого понимания сущности понятия «эффективность» исследователь О.Н. Хижа провела анализ существующих определений «экономической эффективности» и разработала классификацию определений дефиниции «эффективность» по четырем группам¹⁹:

1. Отношение.
2. Достижение результата.
3. Показатель результата.
4. Критерий результата.

Исследователь О.Н. Хижа предлагает понимание дефиниции «эффективность», как «способности системы генерировать результат в конкретных временных рамках с минимальными затратами — с учетом недостатков предыдущих и в соответствии с российскими реалиями, что обуславливает

¹⁵ Большой экономический словарь / под ред. А. Н. Азрилияна. — 7-е изд., доп. — М. : Ин-т новой экономики, 2007. — 1472 с.

¹⁶ Соркин С.Л. Эффективность внешнеэкономической деятельности: понятие, измерение и оценка. Гродно: ГрГУ, 2011. 130 с

¹⁷ Маркс К. К критике политической экономии. М.: ЛИБРОКОМ, 2012. 178 с. С. 42.

Оборина, О. Е. Экономическая эффективность: понятие и сущность / О. Е. Оборина. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2020. — № 23 (313). — С. 427-429. — URL: <https://moluch.ru/archive/313/71251/> (дата обращения: 13.03.2025).

¹⁸ Поликарпов М.Д. Рассмотрение понятия экономической эффективности в современных условиях. <https://www.xn---8sbempeclwd3bmt.xn--p1ai/article/7991>

¹⁹ Хижа О.Н. Эволюция подходов к трактовке понятия «эффективность» в экономической науке. Вестник Челябинского государственного университета. 2018. № 7 (417). Экономические науки. Вып. 61. С. 21—27.

практическую ценность работы: построение качественно новой системы показателей с целью управления социально-экономическими явлениями».²⁰

Большой экономический словарь трактует экономическую эффективность как «результативность экономической деятельности, экономических программ и мероприятий, которая характеризуется отношением полученного экономического эффекта (результата) к затратам факторов, ресурсов, обусловившим получение этого результата».²¹

Рассматривая работы современных российских ученых, можно выделить следующие определения термина «экономическая эффективность».

1. А.Н. Асаул трактует понятие экономической эффективности как «качественную категорию, которая отражает глубинные процессы совершенствования, происходящие во всех элементах предпринимательской деятельности (результативность производства, уровень организованности системы, степень достижения поставленных целей и т. д.)».

2. Н.А. Полянская определяет экономическую эффективность как результат экономической деятельности, экономических программ и мероприятий, характеризуемый отношением полученного экономического эффекта, к затратам факторов, ресурсов, обусловившим получение этого результата.²²

3. Ученые З. А. Демченко и Е. И. Быковский описывают экономическую эффективность как отражение конечных результатов использования всех ресурсов производства за определенный промежуток времени.²³

4. О.Е. Оборина отмечает актуальность вопроса о соотношении понятий «экономическая эффективность», «эффект» и «результативность», которые неразрывно связаны между собой. Так, понятие «эффект» является частью определения экономической эффективности: экономическая эффективность — это

²⁰ Хижа О.Н. Эволюция подходов к трактовке понятия «эффективность» в экономической науке. Вестник Челябинского государственного университета. 2018. № 7 (417). Экономические науки. Вып. 61. С. 21—27..

²¹ Словарь «Борисов А.Б. Большой экономический словарь. — М.: Книжный мир, 2003. — 895 с.»

²² Оборина, О. Е. Экономическая эффективность: понятие и сущность / О. Е. Оборина. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2020. — № 23 (313). — С. 427-429. — URL: <https://moluch.ru/archive/313/71251/> (дата обращения: 14.03.2025).

²³ Демченко З. А., Быковский Е. И. Экономическая эффективность предприятия: понятие, сущность, показатели, способы определения // Наука XXI века: СПб., 2016. С. 141–145.

отношение конечного эффекта (результата) к затраченным на это ресурсам. Эффект — это абсолютная величина и является результатом какого-либо процесса²⁴, определяется по формуле:

$$\text{Эффект} = \text{Результат} - \text{Затраты} \quad (1)$$

Эффект может быть положительным и отрицательным.

Экономическая эффективность является относительной величиной, получаемой при сопоставлении абсолютной величины эффекта с абсолютными величинами затрат и ресурсов, и характеризует результативность деятельности предприятия:

$$\text{Эффективность} = \text{Результат} / \text{Затраты} * 100\% \quad (2)$$

Суть эффективности в том, чтобы выяснить какой ценой (затратами, ресурсами) были достигнуты полученные результаты. Эффективность всегда является относительной положительной величиной.

Под результативностью понимают степень достижения запланированного результата, то есть соотношение фактического и планового выходов.²⁵

Резюмируя вышеизложенное, можно утверждать, что понятия «эффективность», «эффект» и «результативность» являются взаимодополняющими и взаимосвязанными, но не являются тождественными²⁶ (рис.1).

Сравнивая определения зарубежных и российских авторов, приходим к выводу, что понятие «экономическая эффективность» не имеет однозначного определения, что свидетельствует, о многогранности категории экономической эффективности, с другой — о сложности ее представления в показателях и измерителях.

²⁴ Козырев В. М. Основы современной экономики: учебник. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. Финансы и статистика, 2001. — 432 с.

²⁵ Иваницкий В. С. Оценка экономической эффективности функционирования предприятия в рыночных условиях: дисс. канд. экон. наук: 08.00.05. — Екатеринбург, 2003. — 149 с.

²⁶ Оборина, О. Е. Экономическая эффективность: понятие и сущность / О. Е. Оборина. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2020. — № 23 (313). — С. 427-429. — URL: <https://moluch.ru/archive/313/71251/> (дата обращения: 18.05.2025).

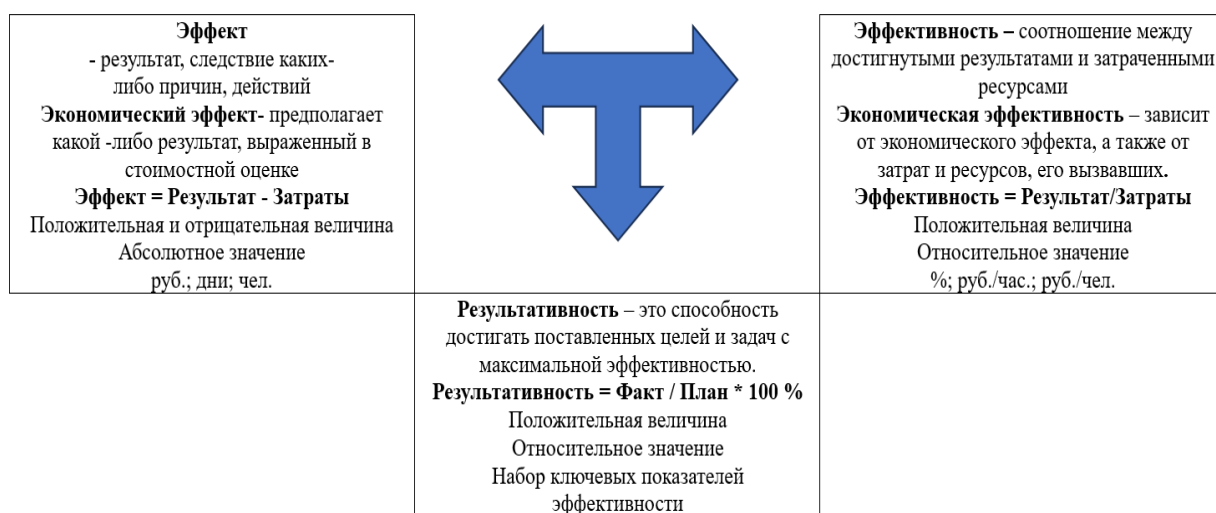


Рисунок 1. – Схема взаимозависимости понятий эффект, эффективность и результативность.

Источник: составлено автором.

Однако все же большинство авторов сходятся во мнении, что экономическая эффективность есть не что иное, как отношение конечного эффекта (результата) к затраченным на это ресурсам.

Эффективность производства относится к числу ключевых категорий рыночной экономики, которая непосредственно связана с достижением цели развития как каждого предприятия в отдельности, так и общества в целом. Для оценки и измерения эффективности предприятия используется понятие экономической эффективности. Понятие характеризует результативность хозяйственной деятельности предприятия, которая определяется путем сопоставления полученных результатов и затрат, израсходованных для достижения результатов.

Обеспечение экономической эффективности предприятия, постоянный мониторинг набора экономических показателей его хозяйственной деятельности являются актуальными процессами для современного предприятия. Умение руководства компанией эффективно управлять хозяйственной деятельностью предприятия отражается на величине получаемой прибыли. Ввиду дефицита природных ресурсов, ужесточения конкуренции, глобализации бизнеса, увеличением предпринимательских рисков из геополитических причин,

мониторинг ключевых показателей эффективности работы промышленного предприятия особенно важен.

Таким образом, экономическая эффективность деятельности предприятия это относительное и многофакторное значение, а достижение заданного значения эффективности работы предприятия представляет собой длительный и многоступенчатый процесс (рис.2). Подразумевается, что предприятие эффективно, когда результаты растут, а затраты на их достижение уменьшаются.

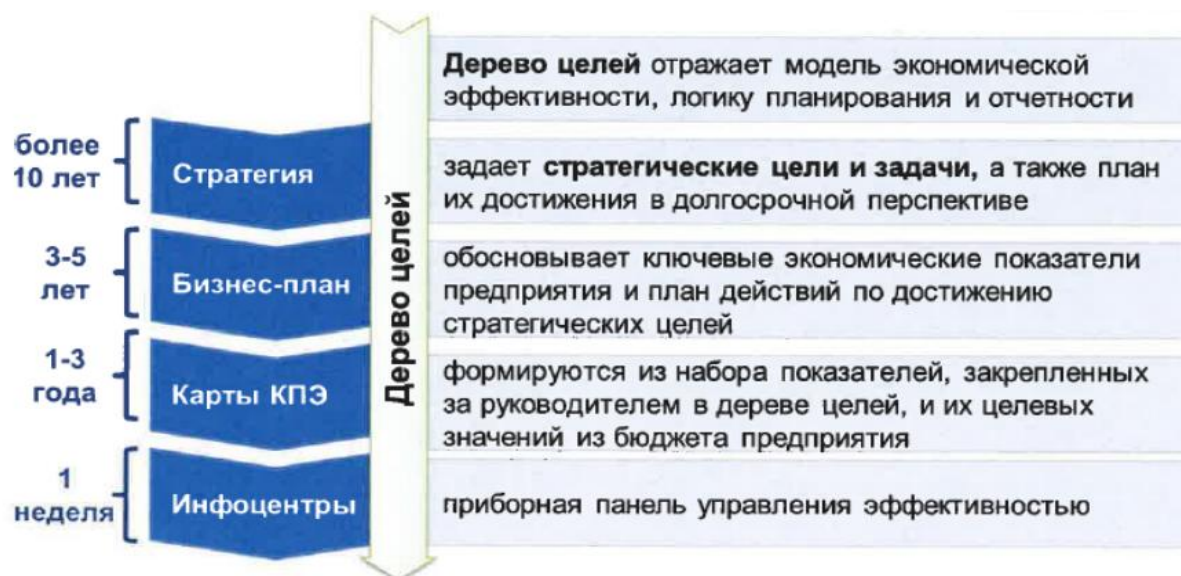


Рисунок 2. – Связь инструментов управления эффективностью и декомпозиции целей.

Источник: составлено автором.

Над изучением проблем повышения экономической эффективности хозяйственной деятельности предприятий работали российские экономисты И. Ансофф, В.М. Баутин, Е. Дихтль, Ф. В. Ковалев, Г.В. Савицкая, Г.В. Складенко, А.И. Хорев и др. Ими исследованы и решены многие теоретические и практические проблемы повышения экономической эффективности организаций. Из зарубежных ученых в изучение данного вопроса внес большой вклад американский ученый Э.Б. Ловинс.

Установлено, что экономическая эффективность является одной из сложных категорий экономической науки и объединяет много стадий производственного процесса предприятия, является основой для построения критериев ценности

принимаемых решений. Экономическая эффективность отражает системный результат хозяйственной деятельности предприятия и взаимодействия его ключевых элементов. Критерии оценки экономической эффективности представляют собой систему показателей абсолютной, относительной и динамической эффективности, которые позволяют оценить результативность инструментов и методов обеспечения экономической эффективности, применяемых на предприятии.²⁷

Согласно мнению зарубежных экспертов, «экономическая эффективность производства отражает соотношение между затратами и доходами, приносимыми бизнесу»²⁸. Таким образом, если затраты на производство ниже доходов от продажи произведенных товаров и услуг, мы можем говорить о высокой экономической эффективности компании.

Следовательно, категория «экономическая эффективность» связывает наиболее важные характеристики хозяйственной деятельности предприятия, такие как: динамичность, целостность, конкурентоспособность, бизнес-планирование, конкурентоспособность. Повысить экономическую эффективность означает²⁹:

- получить больший результат при одинаковых затратах ресурсов;
- получить одинаковый результат при меньших затратах ресурсов;
- достичь большего результата с меньшими затратами ресурсов.

В условиях рыночной экономики необходимо обеспечивать соответствие производства требованиям рынка, использовать современные технологии и методы управления. Среди основных видов эффективности деятельности организации выделяют технологическую, экономическую, социальную и экологическую эффективность.³⁰

²⁷ Оборина, О. Е. Экономическая эффективность: понятие и сущность / О. Е. Оборина. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2020. — № 23 (313). — С. 427-429. — URL: <https://moluch.ru/archive/313/71251/> (дата обращения: 18.05.2025).

²⁸ Belton, V. and Stewart, T.J. (2002) Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Springer-Science + Business Media, B.V., Berlin, Heidelberg. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1821267>

²⁹ Бариленко, В.И. Анализ хозяйственной деятельности: Учебное пособие/ В.И. Бариленко. – М.: Омега-Л, 2013. – 363 с.

³⁰ Глушак, В. В. Экономическая сущность эффективности деятельности организации / В. В. Глушак. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2019. — № 14 (252). — С. 97-99. — URL: <https://moluch.ru/archive/252/57787/> (дата обращения: 13.03.2025).

Единого подхода к определению экономической эффективности работы предприятий не сложилось. Из всего многообразия существующих в настоящее время общих подходов и методик определения эффективности, рассмотрим некоторые из них (табл.1).

Таблица 1 – Общие подходы к оценке экономической эффективности.

Подход	Суть	Результат	Особенности
1	2	3	4
Ресурсный подход ³¹	Построение сводного показателя общей и хозрасчетной эффективности производительной деятельности экономических объектов	Основным показателем результата производительной деятельности является новая стоимость, созданная в производстве товаров и услуг. В полном объеме стоимость рассчитывается по сумме доходов, выплачиваемых производителем непосредственным участникам производства.	Один из популярных методов. При этом подходе максимальные показатели затраченных ресурсов сопоставляются с объёмом произведённой продукции или оказанных услуг. Показатели экономической эффективности выражаются в категории производительности.

³¹ Лихачев В.Н., Пушкина Н.Н. Ресурсный подход к оценке экономической эффективности производства. Том 18 № 4 (2022) DOI: <https://doi.org/10.22213/2618-9763-2022-4-13-26>

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4
Чистый денежный поток ³² (ЧДП)	ЧДП или Net Cash Flow (NCF) — основной показатель при оценке эффективности инвестиционных проектов. Он отражает разницу между денежными поступлениями и расходами, связанными с реализацией проекта, за исключением притоков и оттоков капитала.	Чистый денежный поток (Net Cash Flow, NCF) является основным показателем при оценке эффективности инвестиционных проектов. Этот показатель помогает инвесторам понять, насколько эффективно бизнес генерирует денежные средства и способен ли он обеспечить возврат инвестированного капитала.	ЧДП отражает разницу между денежными поступлениями и расходами, связанными с реализацией проекта, за исключением притоков и оттоков капитала.
Комплексный подход ³³	Комплексный анализ показателей, характеризующих организацию как динамическую систему. Анализируется объем выручки, прибыли, активов (и т.д.) во временном разрезе.	Комплексный анализ не просто сумма анализов отдельных сторон производства и отдельных результативных показателей, а системное изучение экономики предприятия, взаимную связь и обусловленность отдельных направлений анализа его деятельности и показателей.	Сложились две группы методов комплексной оценки экономической эффективности предприятия: без расчета единого интегрального показателя (эвристические методы; с расчетом единого интегрального показателя.

³² Финансовый анализ. Чистый денежный поток. <https://1-fin.ru/?id=281&t=642>

³³ Михалева О.Л. Теоретические аспекты комплексной оценки экономической эффективности деятельности организации. экономика и управление: анализ тенденций и перспектив развития. Стр.243-252. <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-aspekty-kompleksnoy-otsenki-ekonomicheskoy-effektivnosti-deyatelnosti-organizatsii/viewer>

Продолжение таблицы 1.

Свободный поток денег ³⁴ .	Этот способ оценки ориентирован на движение денежных средств без постоянных затрат на его обеспечение.	Показатель экономической эффективности выражается объемом маржинального дохода предприятия.	Свободный денежный поток может быть положительным и отрицательным. Отрицательное значение говорит о том, что компания больше тратит денежных ресурсов, чем зарабатывает
Сравнительный подход ³⁵ .	критериев организации и определении похожих по характеристикам организаций-аналогов.	Предполагает оценку эффективности деятельности организации при сравнении с аналогичными организациями. Подход очень прост, однако выбор источников данных и способа их обработки может серьезно повлиять на результаты. Сравнительные методы можно разделить на группы в зависимости от используемого индикатора, способа его вычисления и источника информации, применяемого в расчетах.	Некоторые преимущества сравнительного подхода: он значительно проще, чем доходный; отражает реальную стоимость компании; не требует специальных знаний. Недостатки сравнительного подхода: оценщик ориентируется на других специалистов в отрасли; сравнение возможно только с максимально аналогичными компаниями; для оценки используется минимум показателей.

³⁴ Free cash flow | Свободный денежный поток. <https://cbonds.ru/glossary/free-cash-flow/>

³⁵ Оценка компании сравнительным подходом. <https://www.alt-invest.ru/wp-content/uploads/market-based.pdf>

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4
Затратный подход ³⁶ .	Суть подхода — концентрироваться на анализе производственных расходов и их влиянии на конечные результаты.	Опирается на имеющиеся у организации активы, но не учитывает вероятность изменения рыночной ситуации и уровень прибыли и рентабельности организации в будущем.	Предназначен для нахождения стоимости компаний, действующих на протяжении многих лет. Такой подход помогает выявить нерациональные затраты и определить пути оптимизации себестоимости продукции.
Структурный подход Куросавы ³⁷	Включает три компонента: оценки экономических показателей деятельности предприятий, оценки по качественным критериям и оценки экономических показателей отрасли.	Согласно концепции Куросавы, измерение эффективности предприятия помогает анализировать прошлое и планировать новые виды деятельности. Даёт возможность получить систему взаимосвязанных индексов.	Особенности подхода: учитывает структуру предприятия и анализирует экономические показатели отрасли и деятельности компаний; позволяет на основе прошлого опыта сделать вывод о будущем компании и освоить новые виды деятельности.

³⁶ Михалева О.Л. Теоретические аспекты комплексной оценки экономической эффективности деятельности организации. экономика и управление: анализ тенденций и перспектив развития. Стр.243-252. <http://teoreticheskie-aspekty-kompleksnoy-otsenki-ekonomicheskoy-effektivnosti-deyatelnosti-organizatsii.pdf>

³⁷ Толстых Т.О., Дударева О.В. Критерии и методы оценки эффективности деятельности предприятия. <https://masters.donntu.ru/2018/ief/pavlova/library/stat1.pdf>

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4
Бенчмаркинг ³⁸	Это система раннего предупреждения о назревающих проблемах предприятия. Это процесс измерения характеристик продукции, услуг или методов работы для сравнения с сильнейшими конкурентами и лидирующими в отрасли компаниями.	Бенчмаркинг обеспечивает получение информации, позволяющей сравнивать: финансовые показатели; работу персонала по функциям, типу и размещению; длительность цикла разработки; показатели в области качества и услуг.	Достоинством бенчмаркинга по затратам, проводимого по цепочкам затрат и по основным факторам, влияющим на величину издержек, состоит в том, что он позволяет рассчитать влияние увеличения объема выпуска или использования альтернативного процесса производства на себестоимость единицы продукции.

Источник: составлено автором

Несмотря на различия рассмотренных подходов, они не исключают друг друга, а лишь характеризуют функционирование предприятия с разных сторон. Каждый из этих подходов уникален тем, что выделяет наиболее важные (по мнению руководителей), ключевые моменты в анализе динамики работы компании.

Из многообразия подходов автор выбрал для детального рассмотрения в рамках поставленной задачи четыре подхода (табл.2).

³⁸ Толстых Т.О., Дударева О.В. Критерии и методы оценки эффективности деятельности предприятия. <https://masters.donntu.ru/2018/ief/pavlova/library/stat1.pdf>.

Таблица 2 – Избранные подходы к оценке экономической эффективности предприятий.

Подход	Автор	Год	Различия	Применимость
Результат/затраты	Рикардо, Хачатуров	1817	Фокус на соотношении эффекта и затрат	Упрощенный метод для первичной оценки проектов
Максимальный результат при минимальных затратах	Плетнев, Журавлева	2005	Акцент на оптимизации ресурсов	Применим для повышения производительности
Качественные аспекты	Рыжкова, Горелова	2013	Учёт произвольных факторов качества	Полезен при оценке комплексных эффектов
Достижение целей	Азрилян	2018	Ориентация на поставленные задачи	Применим в стратегическом управлении

Источник: составлено автором

Для проведения дальнейших расчетов автором была выбрана методика «Максимальный результат при минимальных затратах».

Многочисленные исследования подходов к оценке экономической эффективности предприятия показали, что нет четкой единой методики, с помощью которой можно оценить экономическую эффективность деятельности предприятия. Наиболее распространенным подходом — является качественная оценка (неколичественная) оценка, сделанная на основании показателей экономического и финансового анализа. Существенным недостатком такого подхода является сложность интерпретации, вызванная значительным числом рассматриваемых показателей экономического анализа.³⁹

Большинство экономистов поддерживает точку зрения о том, что наиболее общий ответ на вопрос об экономической эффективности предприятия дают

³⁹ Илюшина, О. С. Анализ методических подходов к оценке экономической эффективности деятельности предприятия / О. С. Илюшина, Ю. К. Стуколова. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 19 (153). — С. 127-131. — URL: <https://moluch.ru/archive/153/43376/> (дата обращения: 20.05.2025).

показатели рентабельности. В ходе исследования были выявлены наиболее распространенные показатели экономической эффективности деятельности предприятия, представленные в таблице 3, в число которых вошли фондоотдача, производительность труда, ресурсотдача, оборачиваемость оборотных средств и др.

Серьезную проблему представляет сравнение экономической эффективности предприятия с другими предприятиями из-за обилия показателей, которые могут показать различную друг по отношению к другу динамику.

Установлено, что эффективность может быть измерена разными способами и показателями: количественными и качественными, в том числе с помощью интегрального набора показателей. Например, финансовых показателей, качества продукции или услуг, производительности труда, уровня удовлетворенности клиентов, лояльности персонала компании и других критериев.

Следовательно, эффективность представляет собой интегральный многомерный динамический показатель, измеряющийся в абсолютных величинах и имеющий только положительное значение.

Таким образом, определение понятия «эффективность» и его сравнение между различными субъектами требуют учета многих факторов, методического подхода и глубокого анализа.

Для каждой конкретной цели выбирается конкретный показатель эффективности деятельности предприятия или набор показателей, следуя таким рекомендациям:⁴⁰

- возможность измерить (количественно или в стоимостном выражении) или оценить (качественно);
- показатель привязан ко времени – возможно отследить его динамику во времени (за несколько периодов);
- показатель конкретный и достижимый – его расчет приводит к конкретным результатам;

⁴⁰ Ключевые экономические показатели предприятия: как рассчитать и анализировать. <https://upr.ru/article/klyuchevye-ekonomicheskie-pokazateli-predpriyatiya-kak-rasschitat-i-analizirovat/>

- точность данных для расчета критерия.

Следовательно, суть понятия «эффективность» предполагает получение не просто результата, а эффекта (эффективного результата), то есть наибольшего (объема, величины), наилучшего (качества, надежности) результата при оптимальных затратах.⁴¹ Величину оптимума затрат определить в каждом конкретном случае практически невозможно.⁴²

Экономическая эффективность – это результативность экономической деятельности, экономических программ и мероприятий, характеризуемая отношением полученного экономического эффекта (результата) к затратам факторов, ресурсов, обусловившим получение этого результата; достижение наибольшего объема производства с применением имеющегося ограниченного количества ресурсов или обеспечение заданного выпуска при минимальных затратах. Эффективным считается такое состояние экономики, в котором потребности потребителей в максимальной степени удовлетворены при условии ограниченности ресурсов. В табл.3 приведены наиболее распространенные показатели оценки эффективности деятельности предприятия.

Таблица 3 – Показатели оценки эффективности деятельности предприятия.

Наименование показателя	Алгоритм расчета
1	2
1.Интегральный показатель экономической эффективности функционирования предприятия – рентабельность активов	Прибыль/Средняя величина активов
2.Общие показатели эффективности функционирования предприятия	
2.1. Фондоотдача	Выручка от реализации/Средняя стоимость основных средств
2.2. Производительность труда	Выручка от реализации/Среднесписочная численность

⁴¹ Там же.

⁴² Боголюбова Н.П. Микроэкономическая теория: фирма в производстве и в сфере обмена. https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/61496/1/978-5-7996-2337-1_2018.pdf

1	2
2.3. Ресурсоотдача	Выручка от реализации/Средняя стоимость ресурсов
2.4. Оборачиваемость оборотных средств	Себестоимость продукции, реализованной в отчетном году/Средняя величина оборотных средств
2.5. Рентабельность собственного капитала	Прибыль/Собственный капитал
2.6. Рентабельность продаж	Чистая прибыль/Выручка от реализации
2.7. Рентабельность персонала	Прибыль от реализации/ Среднесписочная численность
2.8. Фондорентабельность	Чистая прибыль/ Среднегодовая стоимость основных средств

Источник: Илюшина, О. С. Анализ методических подходов к оценке экономической эффективности деятельности предприятия / О. С. Илюшина, Ю. К. Стуколова

Экономическая эффективность определяется в относительных единицах, например, эффективность общественного производства. В свою очередь показатели экономической эффективности общественного производства, как составляющей национальной экономики, включает в себя процесс создания общественных благ путём трансформации природных ресурсов для удовлетворения потребностей человека. Таким образом, показателями экономической эффективности производства являются только абсолютные величины, например:

- валовой внутренний продукт (ВВП) – совокупная стоимость продукции сферы материального производства и сферы услуг, созданных внутри страны;
- валовой национальный продукт (ВНП) – совокупная стоимость конечных товаров и услуг, созданных как внутри страны, так и за ее пределами. Здесь стоит отметить, что в обеих трактовках, как и в понятии «эффективность», присутствует соотношение «эффект (результат) – затраты».

Применительно к производственному процессу высокотехнологической компании, дефиниция «экономическая эффективность» приобретает специфические признаки. Например, для оценки энергоэффективности продукции и технологического процесса электростанций используется показатель «энергетической эффективности», который измеряет потребление или потери энергетических ресурсов.

В стандарте ГОСТ Р 51380-9943 приведено понятие «показателя энергетической эффективности»: «абсолютная, удельная или относительная величина потребления или потерь энергетических ресурсов для продукции любого назначения или технологического процесса».

Таким образом, экономическая эффективность отражает результат хозяйственной деятельности предприятия во всем комплексе и взаимодействии его элементов. По своей экономической сущности все показатели эффективности представляют собой отношение результата к затратам или к ресурсам⁴⁴:

$$\frac{\text{Результат (эффект)}}{\text{Затраты}} \text{ или } \frac{\text{Результат (эффект)}}{\text{Ресурсы}} \quad (3).$$

Эффективность невозможна без результативности.

На практике эффективность предприятия может включать в себя различные показатели, среди которых могут быть следующие:

- Чистая прибыль.
- Производительность труда.
- Рентабельность продаж.
- Рентабельность активов.
- Рентабельность собственного капитала.
- Денежный поток.
- Материалоёмкость и иные показатели.

Критерии оценки экономической эффективности представляют собой систему показателей абсолютной, относительной и динамической эффективности, которые позволяют оценить результативность инструментов и методов обеспечения экономической эффективности, применяемых на предприятии.⁴⁵ По ключевым экономическим показателям предприятия владелец бизнеса может планировать

⁴³ ГОСТ Р 51380-99: Энергосбережение. Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции их нормативным значениям. Общие требования. https://normative_reference_dictionary.academic.ru/

⁴⁴ Савицкая Г.В. Критерии и показатели экономической эффективности бизнеса. журнал исследований по управлению Том 3 № 2, 2017, стр.26-48

⁴⁵ Оборина, О. Е. Экономическая эффективность: понятие и сущность / О. Е. Оборина. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2020. — № 23 (313). — С. 427-429. — URL: <https://moluch.ru/archive/313/71251/> (дата обращения: 13.03.2025).

расходы, бюджет и выстраивать стратегию дальнейшей деятельности предприятия в целом.

Очевидно, что в рыночной экономике при оценке эффективности работы предприятия в приоритете находится финансовый блок показателей эффективности, в основе которых лежит прибыль, которая является основным источником наращивания собственного капитала и стоимости компании на рынке.

Для оценки эффективности деятельности промышленного предприятия используют ключевые показатели деятельности предприятия KPI (Key Performance Indicators). KPI это показатель деятельности, который дает возможность максимально точно оценить работу предприятия, или его подразделения в достижении стратегических целей развития.⁴⁶ В банке ключевых показателей содержатся различные показатели, которые выбираются руководством предприятия в зависимости от поставленных на текущий момент целей. Примеры ключевых показателей деятельности в различных сферах отражены в таблице 4.

Таблица 4 – Примеры ключевых показателей деятельности в различных сферах

Вид деятельности	Ключевые показатели
1	2
Производство товаров	Показатели использования ресурсов: их стоимость и объемы потребления (например, коэффициенты оборачиваемости активов, запасов, основных средств предприятия, дебиторской задолженности, фондоотдача и фондоемкость). Показатели производительности (показывают использование действующих мощностей). Показатели отдачи производства, активов. Показатели, отражающие итоги работы производства и т.д.

⁴⁶ Переводим цели в цифры: как определить KPI. <https://practicum.yandex.ru/blog/pokazateli-effektivnosti-kpi/>

1	2
Продажа	Эти показатели отражают, в первую очередь, результаты работы работников отдела продаж: Показатели рентабельности, объема продаж, прибыльности, доходности. Показатели клиентские – оценивают прост покупателей и их качественные характеристики (прирост новых покупателей, рост числа постоянных клиентов, минимизация негативных отзывов и работа с ними, увеличение положительных отзывов). Денежные показатели (рост выручки по отделам, числа заказов, объемов производства по отдельным продавцам и т.д.).
Управление персоналом	Количественные (нормы выработки, переработка, работа в выходные и праздничные дни, в сверхурочное время и т.д.). Качественные (минимизация брака, положительные отзывы клиентов и их оценка работы сотрудников, отсутствие опозданий, выполнение работы в установленные сроки и т.д.). Стимулирование работы персонала, поощрение лучших работников, премирование сотрудников и т.д.

Источник: Ключевые экономические показатели предприятия: как рассчитать и анализировать.

<https://upr.ru/article/klyuchevye-ekonomicheskie-pokazateli-predpriyatiya-kak-rasschitat-i-analizirovat/>

Мониторинг ключевых показателей эффективности должен быть постоянным процессом с целью соответствия целям, которое предприятия поставило для достижения запланированных результатов работы. Непрерывный мониторинг КРІ позволяет разрабатывать эффективную политику управления предприятием и план мероприятий по достижению поставленных руководством целей.⁴⁷ Например, для повышения оборачиваемости активов целесообразно увеличить производственные мощности, при это корректируется технология производства товара, вкладываются инвестиции в основной капитал, закупается новое оборудование или модернизируется уже имеющееся, анализируются запасы, проводится работа с дебиторами и т.д. Цель увеличения доходов ставит задачу расширения производства, выход на новые рынки сбыта, увеличения количества покупателей, затрат на рекламу и продвижение.

⁴⁷ Данилин О. Принципы разработки ключевых показателей эффективности (КПЭ) для промышленных предприятий и практика их применения. https://www.cfin.ru/management/strategy/plan/industry_keyindicators.shtml

Объединение КРІ в систему сбалансированных показателей определяется несколькими условиями. Необходимо определить объект контроля, в роли которого может выступить производственное предприятие, структурное подразделение или цех, а также выбрать ключевые факторы успеха для решения стратегической задачи, установленной для предприятия. Правильный выбор значительно сужает перечень КРІ и оставляет те показатели, которые важны для оценки деятельности в настоящий период времени.

Проанализировав наиболее известные определения термина «экономическая эффективность», можно кратко резюмировать основные смысловые послы данного понятия.⁴⁸

Экономическая эффективность — это то, насколько эффективно общество использует ограниченные ресурсы для производства товаров.

В экономике есть несколько способов измерения экономической эффективности, основанных на распределении ресурсов, затрат или конечных потребительских товаров.

Производственная эффективность — это ситуация, когда компании ищут оптимальное сочетание ресурсов для снижения производственных затрат.

Эффективность распределения означает, что экономические ресурсы распределяются таким образом, чтобы обеспечить максимальное удовлетворение потребностей потребителей по сравнению со стоимостью ресурсов.

По мнению известного экономиста и социолога В. Паретто, эффективность означает ситуацию, в которой: «Всякое изменение, которое никому не приносит убытков, а некоторым людям приносит пользу (по их собственной оценке), является улучшением. Значит, признаётся право на все изменения, которые не приносят никому дополнительного вреда».⁴⁹ Широко известный «принцип Паретто» или

⁴⁸ Экономическая эффективность: Определение и примеры. Рецензент Caitlin Clarke. https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru/ae2e5b0c-67d3e56c-326c543f-74722d776562/https/www.investopedia.com/terms/e/economic_efficiency.asp

⁴⁹ Агапова И. И. История экономической мысли. Курс лекций. <https://itexts.net/avtor-irina-ivanovna-agapova/186589-istoriya-ekonomicheskoy-mysli-kurs-lekciy-irina-agapova/read/page-12.html>.

«правило 80/20», применяемый в различных сферах экономики, заключается в том, что «лишь 20% усилий приносят 80% результата».⁵⁰

Достижение эффективной деятельности предприятия требует максимального использования ресурсов и стремления к оптимальным результатам и системного мониторинга сбалансированной системы показателей эффективности деятельности для конкретного предприятия.

1.2. Современное состояние и тенденции развития мировой и российской ветроэнергетики

Энергетическая отрасль является основополагающей и связывающей разные отрасли промышленности любой страны. Трендом в мировой энергетике 21 века стало совместное использование ископаемых и возобновляемых источников энергии, с преобладанием доли ископаемого топлива. Нефть остается доминирующим энергоносителем во всем мире, с трендом роста ее добычи и потребления. Второе место среди основных мировых энергоносителей занимает уголь, на который в 2023 году был установлен очередной рекорд потребления в 8,5 миллиардов тонн, который еще года три назад многими экспертами представлялся невозможным.⁵¹ Третье место принадлежит природному газу, потребление которого сопоставимо с объемом угля. Атомная энергетика является довольно дорогим видом генерации энергии. Атомная энергетика представлена в тридцать одной стране мира, где получают энергию посредством 192 атомных электростанций, на которых эксплуатируется 438 энергоблоков. В России работает 10 АЭС, на которых функционируют 33 энергоблока.⁵²

⁵⁰ Экономическая теория: учебное пособие для высшего профессионального образования / [И.В. Скоблякова, В.В. Смирнов, Е.М. Родионова и др.]; под ред. д-ра эконом. наук, проф. В.В.Смирнова. –Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», 2013. – 266 с.

⁵¹ Энергетика на трех быстроногих «черепахах». https://e-plus.media/technologies/atomnye-rekordy-dobycha-trudnoj-nefti-i-tri-glavnyh-istochnika-dlya-mirovoj-energetiki/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=energiia-stati-poisk&utm_content=text&utm_term=keyword&yclid=2171363320734679039

⁵² Сколько атомных станций работает в мире и в России? <https://rosatommd.ru/mediacenter/informatoriy/skolko-atomnyix-stanczij-rabotaet-v-mire-i-v-rossii.html>

Значительное увеличение производства и потребления энергии подтверждает непрерывный рост глобального спроса, основанный на росте мировой экономики, который был отмечен до 2022 года.

Современная электроэнергетика генерирует энергию из различных видов топлива: угля, нефти, газа, которые относят к ископаемым видам топлива и доступ к которым неравномерен в странах мира и природные ресурсы ограничены. В связи с дефицитом и ограниченностью природных ископаемых ресурсов, энергетики мира развивают новые способы выработки электроэнергии из чистых источников.

В настоящее время в РФ потребности промышленности и населения в электрической и тепловой энергии обеспечиваются в основном за счёт трёх источников генерации: тепловые электростанции, работающие на ископаемом топливе, гидро и атомные электростанции.

К возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) относят энергию воды, ветра, солнца, геотермальную энергию недр, переработку биомассы. Особо стоит упомянуть об атомной энергетике, где производство электрической и тепловой энергии происходит путём преобразования ядерной энергии. Анализ преимуществ и недостатков каждого вида источников возобновляемой энергии представлен в Приложении 1.

Мировое производство электроэнергии растет с ростом населения планеты, развития технологий и потребностями в электроэнергии населения и промышленности в условиях энергетического кризиса. Под влиянием цифровизации отрасли электроэнергетики, распределенной генерации и автоматизации активно развивается новая модель электроэнергетики. В условиях перехода к интеллектуальному управлению и низкоуглеродной экономике возрастает потребность в развитии нового сопутствующего направления в энергетике - системах накопления и хранения энергии. Агентство Bloomberg оценило мировой прогноз роста мощностей по хранению электроэнергии с 9 ГВт. ч. в 2019 г. до 1095 ГВт. час. или в 122 раза больше к 2040 году,⁵³ что является

⁵³ Борисов М.Г. Развитие систем хранения электрической энергии: новые возможности для стран Востока. DOI: 10.31696/2227-5568-2021-01-022-032

альтернативой введению в эксплуатацию новых мощностей электрической генерации.

В начале XXI века США перестали быть единственным мировым лидером по генерации электроэнергии. По совокупности показателей, таких как: наличие первичных источников энергии и месторождений полезных ископаемых, производство продуктов питания и промышленной продукции, научный потенциал, современные виды вооружения и пилотируемые космические программы, мировыми лидерами стали Китай, США и Россия (рис.3).

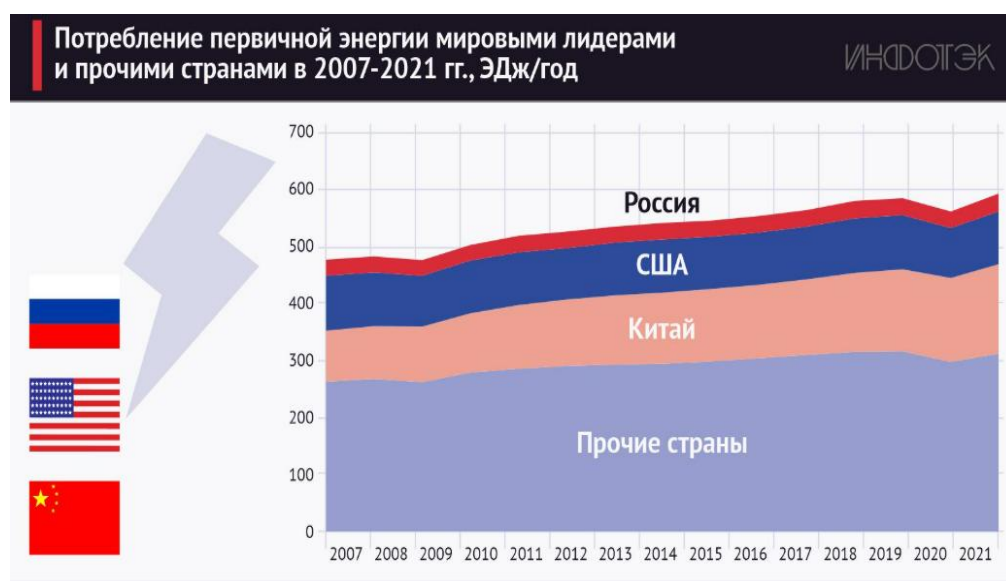


Рисунок 3. – Динамика потребления первичной энергии мировыми лидерами в период с 2007 по 2021.

Источник: Мировая энергетика. <https://itek.ru/reviews/mirovaya-energetika/>.

На рисунке 3 виден период снижения потребления электроэнергии с 2019 по 2020 годы, который связан с пандемией COVID-19 и приостановлением активности в промышленности стран. Данные для анализа представлены по 2021 год, что объясняется началом военного конфликта России с Украиной и закрытием статистических данных. Большую долю прироста - 58,24% всего увеличенного мирового потребления энергии обеспечил Китай. Китай, США и России стали мировыми лидерами в потреблении энергии, совокупная доля которых скоро достигнет 50%.⁵⁴

⁵⁴ Мировая энергетика. <https://itek.ru/reviews/mirovaya-energetika/>

Ускоренная электрификация стала основным трендом энергетического перехода в конечном потреблении энергоресурсов. Решая климатические задачи «зеленой повестки», дефицит ископаемых ресурсов и дороговизну электроэнергии в странах Европы, возникшую из-за геополитической ситуации 2022 года, мировая энергетика подошла к четвертому энергетическому переходу, ориентируясь на приоритетную генерацию энергии из ВИЭ-источников⁵⁵, в том числе мощности ветра (рис.4).

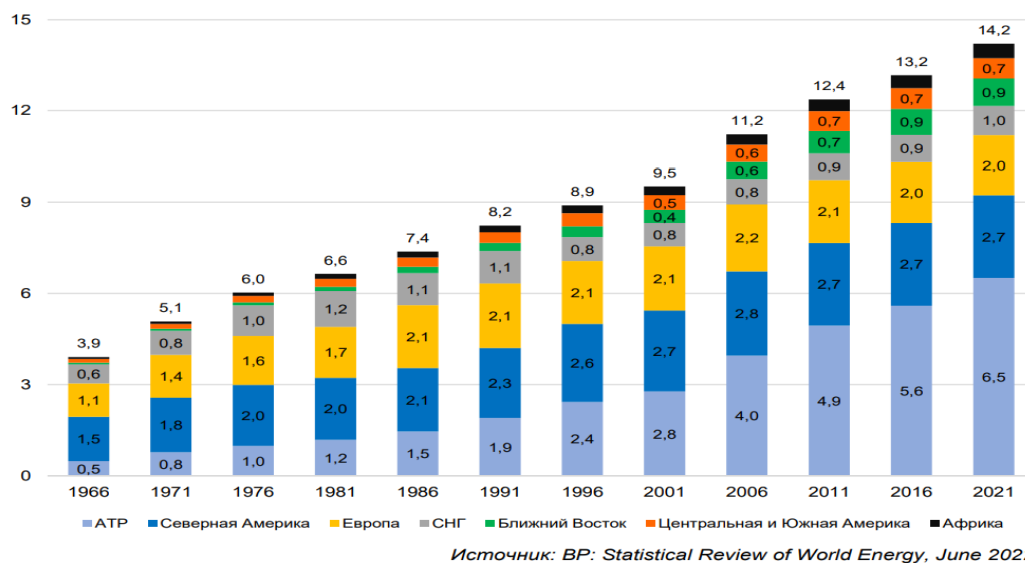


Рисунок 4. – Динамика мирового потребления энергии за период 1966-2022 годы.

Источник: Statistical Review of World Energy, June 2022

В РФ действует двухуровневый рынок электроэнергии: оптовый и розничный. Законодательная база регулирования рынка электроэнергии:

1. Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике»;
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 4 мая 2012 г. № 442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии»;
3. Федеральный закон от 26.03.2003 № 36-ФЗ «Об особенностях функционирования электроэнергетики в переходный период и о внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации и признании

⁵⁵ Мокшин М.Ю., Жабицкий М.Г., Римская О.Н. Состояние топливно-энергетического комплекса России и пути развития в условиях четвертого энергетического перехода. Стратегические решения и риск-менеджмент. 2025;16(1):55-68. <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2025-1-55-68>

утратившими силу некоторых законодательных актов Российской Федерации в связи с принятием Федерального закона «Об электроэнергетике»;

4. Постановление Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 1172 «Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности».

Либерализация энергетического рынка РФ назрела к 2011 году и представляла собой переход от государственного установления тарифов к рыночному ценообразованию, причем цены оптового рынка транслируются на розничный рынок. С 1 января 2011 года либерализация достигла 100% и произошла синхронно на обоих рынках. С этой даты цены на электроэнергию неуклонно растут.

Российская Федерация входит в мировую пятерку крупнейших производителей электроэнергии и в десятки раз отстаёт от других участников пятерки по показателю установленной мощности на ВИЭ-источниках. В таблице 4 приведены данные по потреблению, производству и потребности в электрической энергии Единой энергетической системы России⁵⁶ за период 2019-2025 годов (прогноз). Производство энергии показано в разрезе по источникам генерации энергии. Соотношение показывает, что российская система энергетики повторяет мировые тренды: наибольшее количество энергии произведено на ТЭС, затем следуют атомные станции и гидроэлектростанции, а замыкает список энергия из ВИЭ-источников (табл.5).

⁵⁶ Схема и программа развития Единой энергетической системы России на 2019 - 2025 годы. <http://gost.gtsever.ru/cgi-bin/ecat/ecat.cgi?b=2&pid=1&i=4293727666&pr=1>

Таблица 5 – Баланс электроэнергии ЕЭС России и объемы потребности и потребления за период 2019-2025 годов.

Наименование	Ед.изм.	ПРОГНОЗ						
		2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Потребление электроэнергии	Млрд.кв/ч.	1032,8	1050,3	1081,5	1071,5	1081,3	1093,8	1097,2
в т.ч. заряд ГАЭС	млрдкв/ч.	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71
экспорт	Млрд кв/ч.	11,63	11,68	11,82	11,85	11,98	11,98	11,08
импорт	Млрд кв/ч.	1,19	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
Потребность в электроэнергии	Млрд кв/ч.	1042,9	1060,6	1071,8	1081,9	1091,9	1104,4	1107,8
Производство электроэнергии, всего	Млрд кв/ч.	1042,9	1060,6	1071,8	1081,9	1091,9	1104,4	1107,8
ГЭС	Млрд кв/ч.	153,5	170,5	170,5	170,6	170,7	170,8	170,8
АЭС	Млрд кв/ч.	202,8	198,5	199,8	197,2	196,5	201,3	198,9
ТЭС	Млрд кв/ч.	685,12	687,33	695,3	706,2	715,4	722,2	727,99
ВЭС, СЭС	Млрд кв/ч.	1,58	4,35	6,14	7,9	9,21	10,12	10,12
Установленная мощность, всего	мВт	236828	235879	234320	235400	237031	237246	235803
ГЭС	мВт	45304	45394	45475	45525	45576	45591	45598
АЭС	мВт	30282	29282	29432	29432	30632	30832	29382
ТЭС	мВт	158840	157866	155175	155518	155401	155401	155401
ВЭС, СЭС	мВт	2401,5	3336,6	4237,4	4924,4	5422,1	5422,1	5422,1
Число часов использования установленной мощности	Час/год							
АЭС	Час/год	6697	6777	6789	6700	6414	6529	6768
ТЭС	Час/год	4313	4354	4481	4541	4604	4647	4685
ВЭС, СЭС	Час/год	656	1302	1448	1605	1698	1867	1867

Источник: Схема и программа развития Единой энергетической системы России на 2019 - 2025 годы.

Россия, обладая высококачественными и обильными солнечными и ветровыми ресурсами, намного отстаёт как от других стран БРИКС, так и от нефтегазодобывающих стран (Норвегия, Канада, Саудовская Аравия, ОАЭ, Катар и др.) по развитию солнечной и ветровой энергетики. В России электростанции, вырабатывающие электроэнергию из возобновляемых источников, строят по договорам предоставления мощности (ДПМ), гарантирующим возврат инвестиций. В случае успешной реализации первой программы ДПМ ВИЭ⁵⁷ в 2024 году на территории РФ, Россия находилась лишь в пятом десятке стран по установленной мощности солнечных и ветровых электростанций.

С учетом текущей геополитической ситуации, прогноз развития энергетики в мире и России до 2040 года учитывает снижение роста экономик стран мира, включая Россию. Из-за стагнации экономики и дороговизны электроэнергии, ожидается более широкое использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для производства электроэнергии и тепла, а прирост доли генерации электроэнергии из чистых источников к 2040 году составит 77%⁵⁸ (рис. 5). В горизонте планирования до 2040 года продолжится доминирование использования ископаемых видов топлива для электрогенерации при медленном увеличении доли ВИЭ ресурсов.⁵⁹

⁵⁷ Российская отрасль ВИЭ в международных сравнениях. <https://renen.ru/rossijskaya-otrasl-vie-v-mezhdunarodnyh-sravneniyah/>

⁵⁸ Ветроэнергетика бьет рекорды: 2023 год стал годом стремительного роста. <https://ecosphere.press/2024/04/25/vetroenergetika-bet-rekordy-2023-god-stal-godom-stremitelnogo-rosta/>

⁵⁹ Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года. Институт энергетических исследований РАН Аналитический центр при Правительстве РФ. <https://ac.gov.ru/files/publication/a/789.pdf>



Рисунок 5. – Потребление ВИЭ по видам, базовый сценарий.

Источник: Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года. Институт энергетических исследований РАН.

Ветроэнергетика — это отрасль энергетики, связанная с производством электроэнергии из ветра, который относится к возобновляемым источникам чистой энергии. Преимущества ветроэнергетики состоят в невысоких эксплуатационных затратах и отсутствие выбросов вредных веществ в окружающую среду. К недостаткам относят высокую стоимость установки и строительства, а также необходимость привлечения больших инвестиций на развитие инфраструктуры.

Вклад в развитие мировой ветроэнергетики внесли 54 страны, построив новые ветроэнергетические станции на всех континентах планеты. Благодаря этому рост генерации электроэнергии произошел по всему миру, за исключением Европы и Северной Америки. Кроме Китая, с объемом в 75 ГВт от новых ветрогенераторов, что составляет почти 65% от общемирового объема, крупные доли рынка ветроэнергетики занимают США - 18,8 ГВт; Бразилия - 4,8 ГВт; Германия - 11,4 ГВт; Индия - 7,1 ГВт.⁶⁰

⁶⁰ Ветроэнергетика бьет рекорды: 2023 год стал годом стремительного роста. https://finance.rambler.ru/business/52665071/?utm_content=finance_media&utm_medium=read_more&utm_source=copylink.

По данным Глобального совета по ветроэнергетике (GWEC), 2023 год стал прорывным для ветрогенерации, продемонстрировав ее потенциал как приоритетного источника чистой энергии в будущем⁶¹, а мировая мощность ветроэнергетики преодолела уровень в 1 тераватт.

Особенностями зарубежных энергосистем являются неоднородность структуры генерирующих мощностей, несбалансированность по электроэнергии и мощности некоторых национальных энергосистем, что приводит к необходимости поддержания дополнительных резервов, опасности перегрузки электрических сетей и иных форс-мажорных ситуаций.

Таким образом, проблема энергетической эффективности является одной из важнейших задач, первоочередное решение которой особенно актуально для развивающихся стран мира. Под энергетической эффективностью понимается рациональное использование энергетических ресурсов в процессе хозяйственной деятельности предприятий. Фактически энергоэффективность выражается в потреблении меньшего количества энергоресурсов для поддержания заданного уровня энергетического обеспечения зданий или технологических процессов.

Показателем уровня энергетической эффективности на производственных предприятиях является величина энергоемкости выпускаемой продукции, представляющая собой долю стоимости энергетических ресурсов в производимой продукции. Снижение энергоемкости продукции позволяет снизить себестоимость её производства и тем самым повысить конкурентоспособность. Усредненная энергоёмкость российских предприятий в 2-3 раза превышает аналогичный показатель в Канаде, Финляндии и США, Германии и Японии, что говорит о наличии потенциала повышения энергетической эффективности отечественных предприятий. Благодаря повышению энергоэффективности, в некоторых отраслях промышленности себестоимость выпускаемой продукции можно снизить на 20-30%.⁶²

⁶¹ Там же.

⁶² Энергоэффективность. <https://mcc-energo.ru/energoeffektivnost-predpriyatij>

Энергетическая отрасль является объектом государственного регулирования независимо от экономического развития и типа экономической системы государства, поскольку имеет стратегически важное значение в национальной экономике, а инфраструктура энергосистемы относится к естественным монополиям. Государственное регулирование в энергетике необходимо для обеспечения баланса интересов государства, субъектов отрасли и потребителей, а также создания условий для стабильного функционирования промышленности.

Около 100 стран имеют государственные программы развития ВИЭ и утвержденные количественные целевые показатели развития на среднесрочную и долгосрочную перспективу.⁶³ Практика показала, что развитие ВИЭ с темпами роста в десятки процентов в год на сегодняшний день невозможно без мощной государственной законодательной, финансовой и политической поддержки.

Прогноз развития мировой ветроэнергетики в технической трансформации заключается в увеличении размера турбин, снижении затрат на производство единицы электроэнергии, а ветроэнергоустановки будут сочетаться с накопителями энергии или производством водорода. Снижение затрат ожидается для всех направлений ветроэнергетики: приведенная стоимость электроэнергии (LCOE) к 2035 году снизится на 27% для наземных и на 17-35% для морских ветряных электростанций по сравнению с 2020 годом.⁶⁴

Для достижения целей мировой зеленой повестки и нейтрализации углеродного следа требуется значительное увеличение объема инвестиций для строительства производственных мощностей и инфраструктуры ветроэнергетики. Одновременно с осознанием важности зеленой повестки для сохранения благоприятного климата на планете, правительства многих стран поощряют инвестиции в ископаемое топливо ввиду его дешевизны, пока ветроэнергетические проекты приносят низкую прибыль.

В России действует двухуровневый рынок электроэнергии: оптовый и розничный. На оптовом рынке поставщики электроэнергии продают покупателям

⁶³ Возможно ли рассчитать окупаемость ВИЭ* в России? <https://www.eprussia.ru/epr/364/5415968.htm>

⁶⁴ Что говорят эксперты ветроэнергетики о будущем отрасли. <https://powergreen.pro/trendy/161-chto-govoryat-eksperty-vetroenergetiki-o-budushchem-otrasli>

два товара – электроэнергию и мощность. Оптовый рынок электроэнергии и мощности функционирует на территориях регионов Российской Федерации, объединенных в ценовые и неценовые зоны.⁶⁵

Энергетический баланс Единой энергетической системы России⁶⁶ (ЕЭС) один из самых "зеленых" в мире. За последние 15 лет установленная мощность российской электроэнергетики увеличилась на 18%, большинство станций были модернизированы. На долю природного газа и экологичного углеводорода приходится 48% энергобаланса России, а в совокупности с атомной и гидроэнергетикой доля зеленой энергетики составляет 85%.⁶⁷

Российская энергосистема является самой устойчивой и сбалансированной в мире, состоящей из электростанций всех типов. В системе доля неуправляемых источников энергии невелика и природные катаклизмы не подорвут надежность электроснабжения. Около 66% отечественных электростанций — это теплоэлектростанции, преимущественно газовые. Гидроэлектростанции занимают порядка 20%, атомные станции — 11,9%, ветровые и солнечные электростанции — примерно 2%. В 2023 году доля безуглеродной генерации в нашей стране достигла 34%⁶⁸, что является хорошим показателем для страны.

В настоящее время в России среди видов ВИЭ наиболее перспективными являются три технологии: энергетика на основе биомассы, наземная ветроэнергетика (преимущественно в районах, которые отрезаны от систем централизованного электроснабжения), солнечная фотоэнергетика.⁶⁹

По состоянию на 01.02.2025 совокупная установленная мощность объектов ВИЭ в России составляет 6,59 ГВт. В структуре мощности ВИЭ лидируют ветровые и солнечные электростанции - на них приходится

⁶⁵ Структура формирования цены на рынке электроэнергии. <https://kskkaluga.ru/legal/pricing/electricity-market-price-formation/>

⁶⁶ Единая энергетическая система России. <https://bigenc.ru/c/edinaia-energeticheskaja-sistema-rossii-ees-rossii-bc18fc>

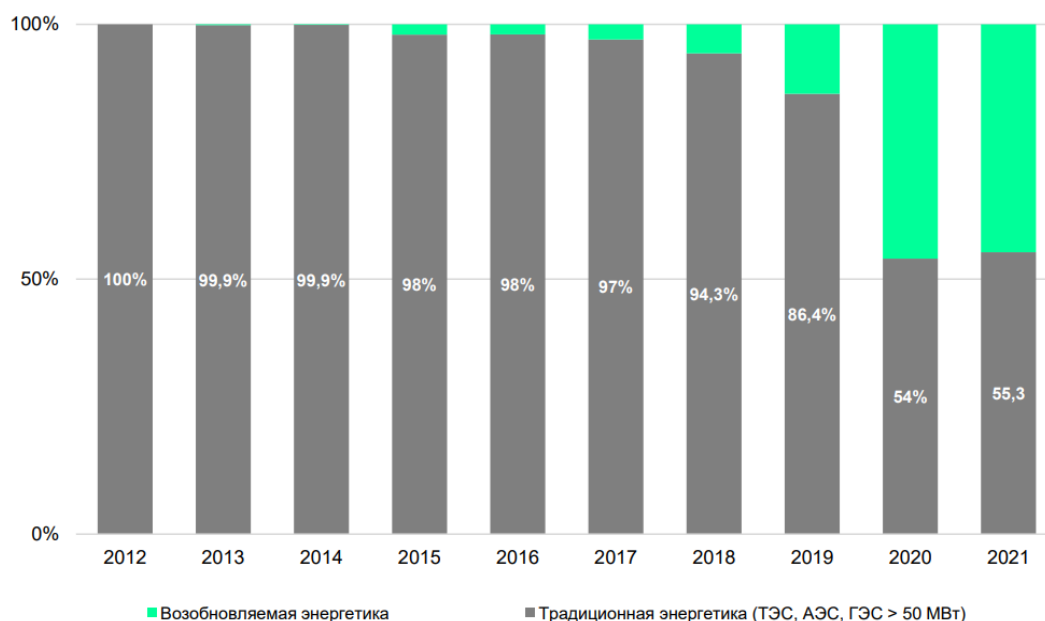
⁶⁷ Путин: энергобаланс РФ – один из самых «зеленых» в мире. <https://www.eprussia.ru/news/base/2024/7360342.htm>

⁶⁸ Атомные рекорды, добыча трудной нефти и три главных источника для мировой энергетики. https://e-plus.media/technologies/atomnye-rekordy-dobycha-trudnoj-nefti-i-tri-glavnyh-istochnika-dlya-mirovoj-energetiki/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=energiia-stati-poisk&utm_content=text&utm_term=keyword&yclid=2171363320734679039

⁶⁹ Lapaeva O.F., Inevatova O. A., Dedeeva S. A. (2019) Sovremennye problemy i perspektivy razvitiya toplivno-energeticheskogo kompleksa [Modern problems and prospects of development of fuel and energy complex]. Ekonomicheskie otnosheniya. 9. (3). – 2129-2142. doi: 10.18334/eo.9.3.40815

по 2,57 и 2,55 ГВт мощности соответственно, а также малые гидроэлектростанции мощностью до 50 МВт с объемом генерации 1,3 ГВт. Также эксплуатируются электростанции на основе биомассы, биогаза, свалочного газа, твердых бытовых отходов и геотермальной энергии, совокупной мощностью более 150 МВт.⁷⁰ С развитием национальной экономики и промышленности ожидаемо растет потребление электрической энергии на ВИЭ источниках (рис.6).

Среди генерации энергии на ВИЭ-источниках преобладает ветровая энергия⁷¹ (рис.7).



Источник: ФГБУ «РЭА» Минэнерго России

Рисунок 6. – Доля ежегодных вводов объектов генерации на ВИЭ, 2011-2021 годы.

Источник: Возобновляемая энергетика в России и мире. Основные показатели работы электростанций ВИЭ на территории России. Стр. 34.

<https://rosenergo.gov.ru/upload/iblock/e04/3xtm87iv99x76b23c6wjul3as5pzz8zj.pdf>

⁷⁰ Статистика ВИЭ. <https://reda.ru/industry/statistics/>

⁷¹ Возобновляемая энергетика России: рекорды 2024 года и планы на будущее. <https://nia.eco/2024/12/03/94559/>

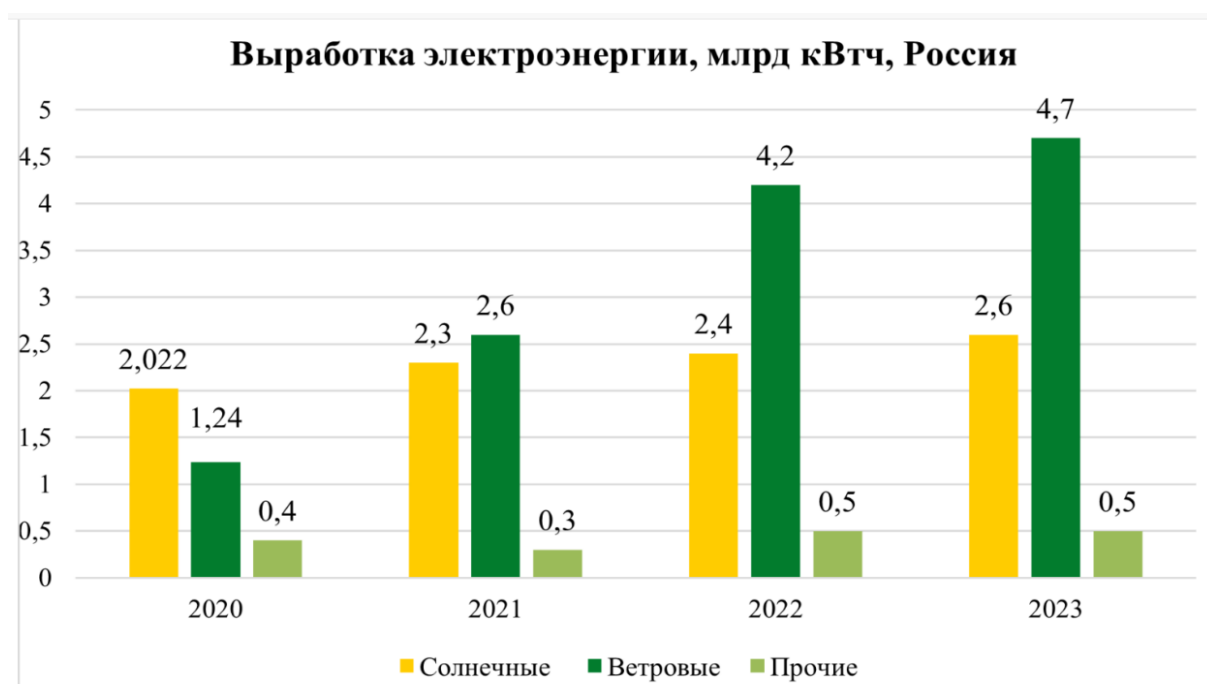


Рисунок 7. – Выработка электроэнергии по видам источников за 2020-2023 годы.

Источник: Возобновляемая энергетика России: рекорды 2024 года и планы на будущее.

<https://nia.eco/2024/12/03/94559/>

Для развития экономики важна стоимость единицы производимой электроэнергии. По мнению директора Российской ассоциации ветроиндустрии И. Брызгунова: "ветроэнергетические технологии сегодня могут давать электроэнергию по цене от 3,5 рубля за киловатт-час и фиксировать ее на срок жизни этого оборудования, ориентировочно на 20 лет. Такая возможность имеется, потому что здесь нет топливной составляющей".⁷²

Проведенные российскими учеными исследования показали зависимость: для того чтобы ВЭС могли вносить существенный вклад в энергетическую систему страны, строительство новых станций должно планироваться на территориях со среднегодовой скоростью ветра не ниже 8 м/с, а мощность ветроэнергоустановок должна быть не менее 1000 кВт.⁷³

⁷² Россия наряду с традиционной генерацией активно развивает возобновляемые источники энергии.
<https://rg.ru/2023/12/22/kilovatt-stanovitsia-chishche.html>

⁷³ Шевченко М.В. Состояние и перспективы развития зарубежной ветроэнергетики. КамчатГТУ, №4, декабрь 2005.
<https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-zarubezhnoy-vetroenergetiki/viewer>

Технический потенциал российской ветроэнергетики оценивается более чем 50 000 кВт·ч /год, а экономический потенциал оценивается в 260 млрд кВт·ч /год, что составляет треть от производства электроэнергии в России в целом.⁷⁴ Ветро - и солнечные электростанции становятся лидерами в выработке «зеленой» энергии.

Лидером развития российского рынка ветроэнергетики выступает госкорпорация «Росатом», в частности, ее дочернее предприятие АО «Новавинд», которое объединяет все активы ветроэнергетики корпорации, а также проводит экспертизу в передовых сегментах и технологических платформах в сфере электроэнергетики. За первое полугодие 2023 года ВЭС, принадлежащие АО «Новавинд», произвели 1,1 млрд кВт·ч электроэнергии. В 2023 году показатель выработки энергии увеличился на 110 млн кВт·ч, по сравнению с первым полугодием 2022 г., когда выработка составила более 987 млн кВт·ч.⁷⁵

АО «Новавинд» внедрил прогрессивную в России технологию - ветроэнегоустановки на постоянных магнитах, в то время как все отечественные ВЭС работают на редукторных машинах.⁷⁶ Первый в России завод по производству ключевых узлов ветроэнергетических установок был открыт на базе компании «Атоммаш» (рис.8).

Возобновляемые источники энергии развиваются быстрее, чем какой-либо другой источник первичной энергии. Особенно это касается ветровой и солнечной энергии, рост которых предполагается более чем в 10 раз с 2022 по 2050 годы.⁷⁷

⁷⁴ Перспективы развития ветроэнергетики в России. <https://magazine.neftegaz.ru/articles/vozobnovlyaemye-istochniki-energii/663245-perspektivy-razvitiya-vetroenergetiki-v-rossii/>

⁷⁵ Мокшин М.Ю., Путилов А.В. Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования. Энергетическая политика №12(191) / 2023. Стр. 80-91. DOI 10.46920/2409-5516_2023_12191_80

⁷⁶ В России наладили производство ключевых компонентов ветроустановок. <https://strana-rosatom.ru/2021/07/21/v-rossii-naladili-proizvodstvo-kljuche/>

⁷⁷ Сценарии развития мировой энергетики до 2050 г. Отчет Минэнерго России. Москва, 2024. <https://rosenergo.gov.ru/press-center/news/rea-minenergo-rossii-opublikovalo-rasshirennyuyu-versiyu-stsenarijev-razvitiya-mirovoy-energetiki-do-2/>



Рисунок 8. – Завод по производству ключевых узлов ветроэнергетических установок.

Источник: Первый зеленый гигаватт. <https://www.kommersant.ru/doc/6350608>

По состоянию на 2022 год на территории РФ действовали 37 ветроэлектростанций и 7 замкнутых изолированных энергосистем, на стадии проектирования и строительства находилось более 10 крупных проектов ветропарков. Для отрасли ветроэнергетики характерны вертикально интегрированные компании с максимальным уровнем локализации оборудования, которые эксплуатируют объект, занимаются инжинирингом и производством оборудования. Крупными компаниями направления ветроэнергетики являются компания «Роснано» и Госкорпорация «Росатом».

Целесообразность внедрения ветроэнергетики в общую энергосистему России очевидна, поскольку запасы ископаемого органического топлива не бесконечны. Наряду с неоспоримыми плюсами по сравнению с традиционной энергетикой: дешевизна получаемой электроэнергии и ее быстрая окупаемость; незначительный выброс в атмосферу углекислого газа, оксидов серы и азота; ветростанции не используют водные ресурсы в процессе выработки

электроэнергии; сохранение природного баланса планеты, ветроэнергетика имеет ряд недостатков. Так, использование ветрогенераторов имеет фактор неравномерности выдачи электроэнергии вследствие нестабильности источника энергии - ветра; необходимость устанавливать дорогостоящий инвертор тока для преобразования переменного или постоянного тока в постоянный ток 220 В, 50 Гц; глобальное климатическое влияние (ветроэнергетика способствует снижению скорости движения воздушных масс и изменению влажностного режима территории), а также исходящий шум от работы ветрогенераторов, чувствительный для человека.

Единая энергетическая система России (ЕЭС России) по данным 2021 года состоит из 71 региональных энергосистем, которые, в свою очередь, образуют 7 объединенных энергетических систем: Востока, Сибири, Урала, Средней Волги, Юга, Центра и Северо-Запада. Все энергосистемы соединены межсистемными высоковольтными линиями электропередачи напряжением 220-500 кВ и выше и работают в синхронном режиме.⁷⁸ В электроэнергетический комплекс ЕЭС России входит 911 электростанций мощностью свыше 5 МВт каждая. На 1 января 2022 года общая установленная мощность электростанций ЕЭС России составила 246 590,9 МВт.

Основными участниками сектора ветрогенерации в России выступают четыре компании:

1. АО «НоваяВинд» (ГК «Росатом») (1 000 МВт);
2. ПАО «Энел Россия» (361 МВт);
3. Фонд развития ветроэнергетики (совместный фонд АО «РОСНАНО», ПАО «Фортум») (1 823 МВт);
4. ПАО «Фортум» (35 МВт).

Отличительной особенностью ЕЭС России является связь с энергосистемами зарубежных стран, которую обеспечивает Системный оператор ЕЭС РФ. Энергосистема России одновременно осуществляет работу с энергосистемами Казахстана, Белоруссии, Балтии, Грузии и Азербайджана. Страны Балтии в феврале

⁷⁸ ЕЭС 2022. <https://www.so-ups.ru/functioning/ups/ups2022/>

2025 года по политическим причинам вышли из энергетического кольца БРЭЛЛ (электрическое кольцо Белоруссии, России, Эстонии, Латвии и Литвы, предполагающее синхронный режим работы энергосистем).

В результате, энергетическая инфраструктура Калининградской области РФ перешла на автономный режим. Через энергосистему Казахстана параллельно с ЕЭС России работают энергосистемы Центральной Азии – Киргизии и Узбекистана. По сетям электропередачи ЕЭС России осуществляется передача электроэнергии в энергосистему Южной Осетии и энергосистему Абхазии, ЕЭС Востока обеспечивает работу энергосистемы Китая.⁷⁹

Согласованная работа ЕЭС РФ с энергосистемами соседних стран даёт очевидные преимущества для России, связанные с совмещением графиков электрической нагрузки и резервов мощности, и позволяет осуществлять взаимный обмен электроэнергией между этими энергосистемами, а также усиливает политическую и экономическую роль России.

В программе развития электроэнергетики с 2024 по 2029 год в России будет введено в эксплуатацию 15 734,3 мегаватта генерирующих мощностей. Прогноз содержится в Схеме и программе развития электроэнергетических систем России⁸⁰ на 2025-2030 годы, утвержденной Минэнерго РФ. Две трети новых мощностей обеспечат электростанции, работающие на газе и на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). Этот прогноз отражает задачи, стоящие перед отечественной энергетической отраслью, а именно - сохранить высокий уровень газовой генерации с одновременным развитием новых технологий. На рис.9 показан сценарий развития ВИЭ в России⁸¹, из которого видна преобладающая роль ветрогенерации.

⁷⁹ Единая энергетическая система России. <https://bigenc.ru/c/edinaia-energeticheskaja-sistema-rossii-ees-rossii-bc18fc>

⁸⁰ Приказ Минэнерго России от 29.11.2024 № 2328 от «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2025 – 2030 годы». <https://www.so-ups.ru/future-planning/sipr-ees/>

⁸¹ Альтернативная энергетика: перспективы развития рынка ВИЭ в России. <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/alternativnaya-energetika-perspektivy-razvitiya-rynka-vie-v-rossii/%20свободный.%20-%203агл.%20с%20экрана>



Рисунок 9. – Инерционный сценарий развития ВИЭ в России на период до 2035 г.

Источники: Угольная генерация: новые вызовы и возможности. URL: <https://energy.skolkovo.ru>;

Прогноз развития ВИЭ в России до 2035 г. URL: <https://www.iep.ru>

Взаимодействие с недружественными странами в условиях санкционного давления стало поводом для выстраивания цепочек в рамках национального энергомашиностроительного кластера. В настоящее время ведётся разработка отечественных технологий для производства электроэнергии из ветра, благодаря чему до 2030 года в России планируется ввести 3 ГВт ветряных мощностей.

Таким образом, новая энергетическая модель России предусматривает более широкое использование возобновляемых источников энергии, в том числе и ветроэнергетические установки (ВЭУ), так как традиционные топливно-энергетические ресурсы исчерпаемы, а их дальнейшее использование связано с ростом затрат.

1.3. Анализ методик мониторинга экономических показателей промышленного предприятия

Проблема эффективности деятельности отдельного предприятия в системе функционирования экономики страны занимает ключевое место среди совокупности проблем, стоящих перед современным обществом. Эффективная деятельность предприятия приводит к росту рентабельности, конкурентных

преимуществ, является залогом стабильного развития и экономического роста, обеспечивает устойчивое положение предприятия на рынке в долгосрочной перспективе. Поэтому оценка и постоянный мониторинг эффективности деятельности промышленных предприятий является объективной необходимостью, особенно в условиях геополитической нестабильности.

Основой анализа должна стать модель постоянного мониторинга, позволяющего своевременно получать информацию о финансово-экономическом состоянии хозяйствующих субъектов для оперативного осуществления при необходимости комплекса мер финансового оздоровления.⁸²

Роль системы оценки и мониторинга эффективности состоит в том, чтобы позволить пользователям экономической информации получать независимые оценки эффективности деятельности предприятия, проводить раннюю диагностику и профилактику кризисов, эффективно регулировать основные параметры производственно-хозяйственной деятельности, оперативно реагировать на негативные изменения ключевых показателей эффективности.

Аналитические данные об оценке эффективности производственно-хозяйственной деятельности необходимы для следующих групп пользователей информации⁸³:

- первая группа – внутренние пользователи (управляющие компании холдингов, промышленных комплексов, принимающие стратегические решения; собственники предприятий);
- вторая группа – внешние пользователи (органы исполнительной власти в лице ФНС, Департаментов промышленности, префектур; консалтинговые и рейтинговые агентства; аудиторские компании и др.).

В настоящее время разработано довольно много различных методик анализа и мониторинга экономических показателей деятельности предприятий и организаций (рис.10), которые отличаются по своему предназначению. Рассмотрим наиболее употребляемые методики анализа для промышленных предприятий.

⁸² Экономика и анализ деятельности промышленного предприятия : учеб. пособие / Н.Е. Калинина, Н.А. Кузнецова, О.С. Норкина, М.А. Прилуцкая, Л.М. Типнер, Е.В. Черепанова. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 124 с.

⁸³ Там же.

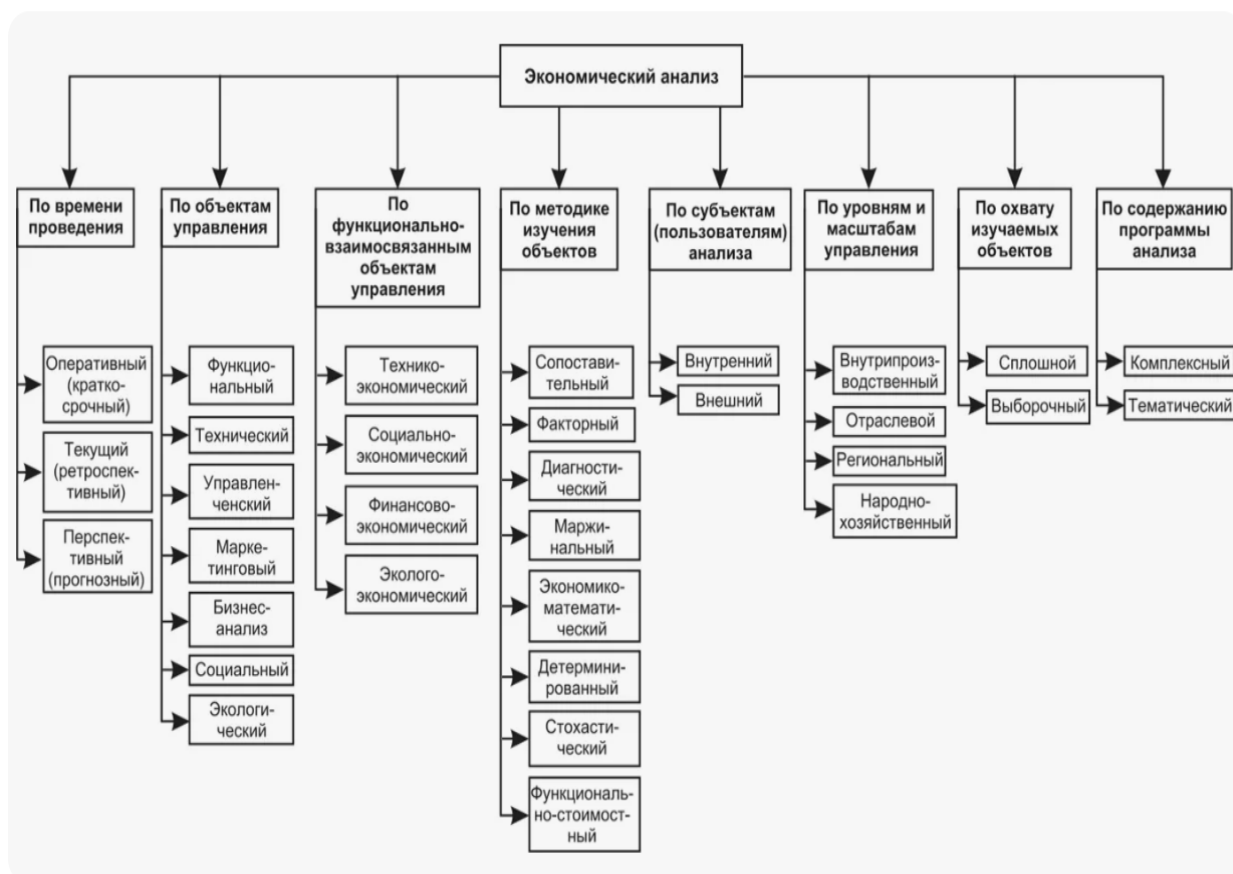


Рисунок 10. – Классификация видов экономического анализа.

Источник: Управления хозяйственных субъектов.

<https://immunocap.ru/photo/upravleniya-xozyaystvenniyx-subektov/>

Комплексный экономический анализ⁸⁴ представляет собой средство получения системного знания о хозяйственной деятельности, знаний о бизнесе, понимания деятельности экономического субъекта.

Методологическую основу комплексного анализа составляют принципы современного системного анализа, который получил широкое применение и в экономическом анализе⁸⁵.

Базой анализа является промышленное предприятие.

По охвату исследуемых задач экономический анализ подразделяют на полный и тематический. Метод экономического анализа должен отвечать следующим требованиям (табл. 6).

⁸⁴ Комплексный экономический анализ. [Электронный ресурс]: учебное пособие / М. М. Микушина [и др.]. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2018. 152 с. Режим доступа: <http://elar.rsvpu.ru/978-5-8050-0659-4>. ISBN 978-5-8050-0659-4

⁸⁵ Шеремет А. Д. Теория экономического анализа / А. Д. Шеремет. Москва: Инфра-М, 2013. 365 с.

Таблица 6 – Основные требования к экономическому анализу

1. Рассматривать и изучать каждый отдельно взятый показатель во взаимосвязи и единстве с другими показателями, участвующими в едином процессе.	2. Рассматривать все показатели в динамике.
Например, обособленный анализ показателя прибыли нельзя проанализировать. Можно только определить степень выполнения плана по получению прибыли, констатировать сам факт получения прибыли. Если рассматривать показатель прибыли в совокупности с объемом реализации, уровнем себестоимости продукции, ассортиментом и другими показателями, то можно выявить все факторы и причины, повлиявшие на размер полученной прибыли и разработать соответствующие мероприятия. Аналогичный подход относится к любому показателю деятельности предприятия.	Например, если изучать размер полученной прибыли только за отчетный период, то нельзя определить, повысилась или понизилась эффективность работы предприятия. Сопоставление размера прибыли за отчетный период с размером прибыли за предшествующие периоды позволит выявить изменения эффективности работы предприятия, определить причины этих изменений и наметить проведение соответствующих мероприятий. Следовательно, деятельность предприятия при таком подходе рассматривается в прошлом, настоящем и будущем.

Источник: составлено автором.

Комплексно-экономический анализ по методике изучения объектов может быть сравнительным, диагностическим, факторным, маржинальным, экономико-математическим, экономико-статистическим, функционально-стоимостным и т. д.

1. При сравнительном анализе ограничиваются сравнением отчетных показателей о результатах хозяйственной деятельности предприятия с плановыми показателями текущего года, данными прошлых лет, показателями работы передовых предприятий.

2. Факторный анализ направлен на выявление факторов, влияющих на прирост результативных показателей. По сути, это поиск оптимального пути по увеличению прибыли и снижению издержек предприятия.

3. Диагностический анализ (экспресс-анализ) представляет собой способ установления характера нарушений нормального хода бизнес- процессов на основе типичных признаков, характерных только для данного нарушения. К примеру, если темпы роста валовой продукции опережают темпы роста товарной продукции, то это свидетельствует о росте остатков незавершенного производства. Знание

признака позволяет быстро и установить характер нарушений, не производя непосредственных измерений, т. е. не затрачивая дополнительного времени и средств.

4. Маржинальный анализ – это метод оценки и обоснования эффективности управленческих решений на основании причинно-следственной взаимосвязи объема продаж, себестоимости и прибыли, деления затрат на постоянные и переменные. С помощью экономико-математического анализа выбирается наиболее оптимальный вариант решения экономической задачи, выявляются резервы повышения эффективности производства за счет полного использования имеющихся ресурсов.

5. Стохастический анализ (дисперсионный, корреляционный, компонентный и др.) используется для изучения стохастических зависимостей между исследуемыми явлениями и текущими процессами хозяйственной деятельности предприятия.

6. Функционально-стоимостный анализ представляет собой метод выявления резервов повышения эффективности производства. Он базируется на функциях, которые выполняет объект, и сориентирован на оптимальные методы их реализации на всех стадиях жизненного цикла изделия (научно-исследовательские работы, конструирование, производство, эксплуатация и утилизация). Его основное назначение в том, чтобы выявить и предупредить лишние затраты за счет ликвидации ненужных узлов, деталей, упрощения конструкции изделия, замены материалов и т. д.

Каждая из рассмотренных форм комплексно-экономического анализа своеобразна по содержанию, организации и методике его проведения и поставленным целям. Например, многофакторный анализ при формировании затрат на производство электроэнергии из разных источников может включать следующие показатели:

- Экономические показатели: инвестиционные затраты и операционные затраты (постоянные и переменные). Например, для ВИЭ-станций характерны практически нулевые переменные затраты благодаря бесплатным источникам, а для

тепловых электростанций (ТЭС) затраты на топливо составляют до 80% и выше от общей суммы операционных затрат.⁸⁶

- Утилизация оборудования. Для объектов генерации на основе ВИЭ процесс утилизации оборудования технически отработан и возможен в короткий срок.⁸⁷

- Показатель загрузки мощностей (КИУМ). Для ТЭС этот показатель составляет 80–90%, что в 4 раза больше, чем для станций на основе ВИЭ (КИУМ для ветроэнергетических и солнечных станций может изменяться в широком диапазоне в зависимости от географии и природных условий размещения)

- Расчетный срок эксплуатации.

- Затраты на строительство и ввод в эксплуатацию.

- Территория размещения и выбор конкретного типа электростанции и др.

Таким образом, у каждого вида электростанции есть свои особенности, которые необходимо учитывать при планировании энергосистемы страны.⁸⁸

Система исследований экономического состояния промышленного предприятия выполняет одновременно несколько функций.⁸⁹ От правильного выбора, полноты и качества перечня показателей, по которым мониторинг будет осуществляется, зависят управленческие решения, осуществляемые руководством промышленного предприятия.

Применяемые до настоящего времени системы исследования экономических процессов позволяли осуществлять анализ и прогноз производства и распределения валового внутреннего продукта, финансов домашних хозяйств и реального сектора экономики в целом и основных отраслей, инфляции,

⁸⁶ Дегтярёв К.С., Залиханов А.М., Соловьёв А.А., Соловьёв А. К вопросу об экономике возобновляемых источников энергии. энергия: экономика, техника, экология. № 10, 2016. стр.10-20.

⁸⁷ Дзедик В., Усачева И., Моткова А. Анализ эффективности применения накопителей энергии в различных типах электроэнергетических систем. <https://energypolicy.ru/analiz-effektivnosti-primeneniya-nakopitelej-energii-v-razlichnyh-tipah-elektroenergeticheskikh-sistem/energoperehod/2023/10/03/>.

⁸⁸ Мокшин М.Ю., Жабицкий М.Г., Римская О.Н. Состояние топливно-энергетического комплекса России и пути развития в условиях четвертого энергетического перехода. Стратегические решения и риск-менеджмент. 2025, 15(1): стр.338-347 <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2025-1-55-68>

⁸⁹ Болквадзе И.Р. Концепция системы мониторинга экономического состояния промышленного предприятия. <https://www.cfin.ru/bandurin/article/sbrn05/03.shtml>

номинальных и реальных курсов национальной валюты, инвестиционной деятельности в стране.

Вместе с тем в период нестабильной экономики, находящейся в фазе стагнации и осложненной геополитическими событиями, этого недостаточно. Необходима исчерпывающая и точная оценка степени влияния и эффективности применяемых инструментов денежно-кредитной политики и механизмов их воздействия во взаимосвязи с инструментами и мерами других составляющих экономической политики государства на процессы микроуровня, происходящие на промышленном предприятии.

В связи с этим особую актуальность приобретает совершенствование системы исследований путем дополнения ее системой мониторинга промышленного предприятия. Мониторинг предприятий представляет информационно-аналитический инструмент, связывающий между собой реальный сектор экономики и банковскую систему и предназначенный для выработки рациональных решений, мер воздействия на деятельность предприятия в соответствии с денежно-кредитной политикой государства и в условиях совершенствования экономической политики в целом.

Система мониторинга промышленного предприятия позволяет практически в режиме реального времени производить независимые оценки тенденций развития его экономического состояния, получать информацию о состоянии экономической конъюнктуры в реальном секторе экономики и ее возможных изменениях, оперативно проводить анализ финансового состояния предприятия и важнейших факторов, определяющих его инвестиционную активность во взаимосвязи с инструментами денежно-кредитной политики. С этой целью используются три уровня мониторинга промышленного предприятия:⁹⁰

1. Экономический уровень: конъюнктурные опросы, опросы по финансовым и инвестиционным анкетам.

⁹⁰ Болквдзе И.Р. Концепция системы мониторинга экономического состояния промышленного предприятия. <https://www.cfin.ru/bandurin/article/sbrn05/03.shtml>

2. Уровень предприятия: фиксация параметров экономической состояния, деятельности, маркетинга.

3. Уровень подразделений: сбор данных о закупках, запасах, производительности, потреблении ресурсов и т. д.

В процессе оценки эффективности должны быть задействованы четыре метода анализа данных: трендовый, структурный, сравнительный и факторный.⁹¹

Трендовый анализ — это сравнение показателей за определенный период и установление тренда их движения. Метод помогает спрогнозировать, как будет вести себя показатель через конкретные промежутки времени. Чтобы оценить эффективность предприятия с помощью тренда, используют:

- сравнение фактических результатов отчетного периода с плановыми показателями отчетного периода;
- сравнение фактических результатов отчетного периода с показателями прошлого периода;
- сравнение показателей за разные периоды.

Трендовый анализ помогает предсказать динамику изменений тех или иных показателей бизнеса, а также оценить эффективность некоторых производственных процессов.

Структурный метод представляет подход к исследованиям, при котором систему сначала рассматривают в общем смысле, а потом разбивают на более мелкие компоненты. Каждый элемент структуры при использовании методики подвергается отдельному анализу:

- направлений деятельности компании, которые образуют прибыль;
- прибыли по отдельным видам товаров и услуг;
- динамики активов компании;
- использования прибыли организации.

⁹¹ Оценка эффективности предприятия: критерии и методики. <https://bitcop.ru/blog/ocenka-jeffektivnosti-predpriyatija-kriterii-i-metodiki#ocenka-ehffektivnosti-predpriyatija-osnovnye-metody>

Сравнительный анализ— это метод, при которой сопоставляют и сравнивают разные объекты, выделяют их сходства и различия. Метод используют, чтобы сравнить следующие показатели:

- уровень доходности;
- выручку;
- операционную прибыль.

При данном виде анализа могут сравнивать два или множество компонентов по релевантным критериям.

Факторный анализ — это метод исследования, который изучает взаимосвязь между значениями переменных. Инструмент основан на предположении, что известные переменные зависят от меньшего числа неизвестных переменных. Для анализа эффективности предприятия используют показатели:

- выручки компании;
- прибыли компании;
- использования трудовых ресурсов;
- использования производственных фондов.

При факторном анализе все связанные между собой переменные объединяют в один фактор.

Один из вариантов содержания функционала модели мониторинга⁹² экономических показателей предприятия представлен на рис.11.

⁹² Витушкина М.Г. Развитие механизма мониторинга устойчивости предприятий с длительным производственным циклом (на примере судостроительной промышленности) Специальность 08.00.05 Экономика и управление народным хозяйством (экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами: промышленность), Москва, 2020

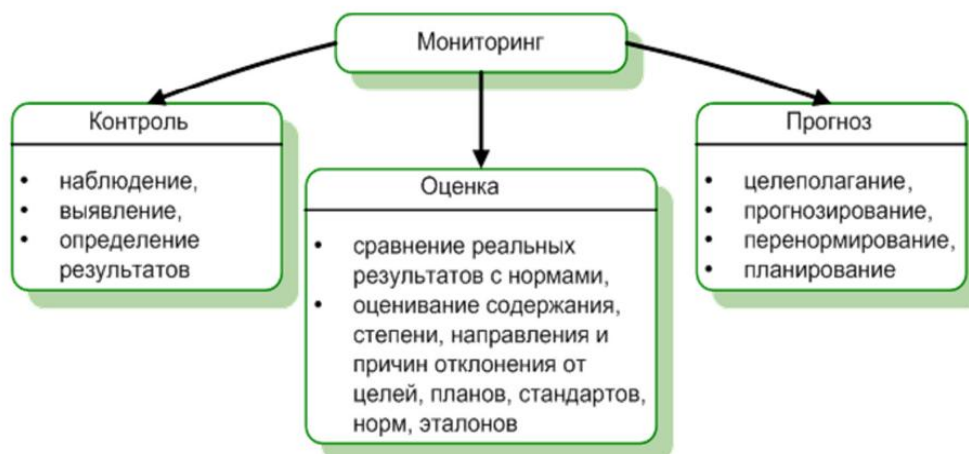


Рисунок 11. – Цели и содержание мониторинга.

Источник: Витушкина М.Г. Развитие механизма мониторинга устойчивости предприятий с длительным производственным циклом.

Для функционирования системы мониторинга промышленного предприятия необходимо разработать основные требования к программному обеспечению системы мониторинга промышленного предприятия. Архитектура системы мониторинга представлена на рис.12.



Рисунок 12. – Принципиальная схема системы мониторинга промышленного предприятия.

Источник: Болквадзе И.Р. Концепция системы мониторинга экономического состояния промышленного предприятия.

В условиях реализации хозяйственных и производственных процессов предприятий в цифровой экономике, необходима цифровизация процесса мониторинга. С этой целью создаются цифровые модели, включающие систему мониторинга экономических показателей, состоящей из:

- инструментального комплекса для создания динамических интеллектуальных систем в управлении и моделировании деятельности предприятия;

- блока создания на базе интеллектуальной системы инструментального многофункционального комплекса для проведения реинжиниринга.

Программные системы анализа эффективности предприятия (САЭП) помогают руководителям принимать обоснованные решения на основании проанализированных фактических данных.

Программные продукты должны обладать следующими функциональными возможностями:⁹³

1. Поддержка различных методов анализа: системы должны предоставлять инструменты для проведения финансового, операционного, стратегического и других видов анализа эффективности предприятия, используя различные методы и подходы.

2. Сбор и обработка данных: программные продукты должны обеспечивать возможность сбора данных из различных источников, включая бухгалтерские системы, CRM, ERP и другие, а также их обработку и подготовку к анализу.

3. Создание отчётов и дашбордов: системы должны включать инструменты для создания отчётов и дашбордов, позволяющих наглядно представлять результаты анализа эффективности предприятия, включая ключевые показатели эффективности (KPI), тренды и сравнения.

4. Прогнозирование и планирование: программные продукты должны предоставлять инструменты для прогнозирования будущих показателей

⁹³ Бесплатные Системы анализа эффективности предприятия. <https://soware.ru/categories/enterprise-performance-analysis-systems/free-charge>

эффективности предприятия и планирования мероприятий по их улучшению, включая оптимизацию ресурсов и процессов.

5. Поддержка принятия решений: системы должны обеспечивать поддержку принятия обоснованных управленческих решений на основе анализа данных об эффективности предприятия, включая оценку рисков и возможностей.

Одной из распространенных на практике моделей цифрового проектирования на промышленных предприятиях, в частности на предприятиях российской Единой энергетической системы (ЕЭС), является вейвлет анализ.⁹⁴ Вейвлет-анализ представляет собой специальный тип линейного преобразования сигналов и представляемых ими физических данных о процессах и физических свойствах природных сред и объектов.⁹⁵

Некоторые специализированные программные решения в энергетической отрасли различного предназначения, в том числе сугубо для ВЭС, перечислены в табл.7.

Таблица 7. Программные продукты для энергетической отрасли

Программный продукт	Функционал	Назначение
1	2	3
Программное обеспечение для ветроэлектростанций		
Siterra	В программах ветроэнергетики большое количество участников, сотрудничающих для развертывания ветроэнергетической инфраструктуры. Большой объем документации, управление арендой, отслеживание активов и управление гарантиями - некоторые из ключевых элементов эффективного выполнения программы и управления ею.	Управление программой использования энергии ветра

⁹⁴ Чубарова О. В., Чубаров А. В., Ликсонова Д. И. Применение метода вейвлетанализа данных для построения прогнозной модели // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 3. С. 82–89. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-3-9>.

⁹⁵ Болдырев С.В. Использование вейвлет-преобразования в системах обработки и анализа сигналов // Современные проблемы науки и образования. 2008. № 7. ; <https://science-education.ru/ru/article/view?id=3529>

Продолжение таблицы 7.

Vestas PowerPlus; General Electric; Siemens Gamesa;	Конкурирующие компании. Компания GE заявила, что коэффициент мощности для её крупнейшей электростанции Haliade-X составляет от 60% до 64%, а компания Vestas заявила, что коэффициент мощности превышает 60% «в зависимости от конкретных условий». В мире установлено свыше 132 ГВт ветрогенераторов с компонентами производства Siemens Gamesa, что эквивалентно работе 132 атомных электростанций.	Производство ветротурбин для суши и моря.
Комплекс от NovaWind (дивизион Росатома)	Разработка является одним из кейсов успешного импортозамещения и представляет отечественный контроллер, управляемый самостоятельно в автоматическом режиме.	Программный комплекс для контроля за станциями ветрогенерации.
GH Bladed	Приложением пользуются в основном производителями ветряных турбин и консультирующими их консультантами. GH Bladed является отраслевым стандартом для производителей ветряных турбин и компонентов по всему миру.	Конструкция ветряной турбины. GH Bladed был одобрен Germanischer Lloyd для расчета нагрузок ветряных турбин при проектировании и сертификации.
Windographer; WindRose	Программное обеспечение для анализа данных о ветре помогает пользователю устранять ошибки измерений в наборах данных о ветре и выполнять специализированный статистический анализ.	Анализ данных о мощности ветра
WAsP	Программное обеспечение для моделирования ветровых потоков предназначено для прогнозирования важных характеристик ветрового ресурса в местах, где измерения недоступны. Приложение WAsP, разработанное в Национальной лаборатории Рисо в Дании. WAsP использует модель потенциального потока, чтобы предсказать, как ветер распространяется по местности на участке.	Моделирование ветрового потока

Продолжение таблицы 7.

1	2	3
WindSim	WindSim - аналогичное WAsP приложение, которое вместо этого использует расчеты CFD, которые потенциально более точны.	Моделирование ветрового потока
OpenWind; WindPRO; WindFarmer; WindFarm	Решения предназначены для имитации поведения предлагаемой или существующей ветряной электростанции, в первую очередь для расчёта выработки электроэнергии. Обычно пользователь может вводить данные о ветре, высоте и шероховатости, характеристики ветряных турбин, фоновые карты и определять объекты, представляющие экологические ограничения. Затем эта информация используется для проектирования ветряной электростанции, которая будет вырабатывать максимальное количество энергии с учётом ограничений и проблем, связанных со строительством.	Моделирование ветряных электростанций
WP	Решение для существующих ветряных электростанций существует несколько программных систем, которые составляют краткосрочные и среднесрочные прогнозы выработки электроэнергии (для отдельных электростанций или для целых регионов) на основе существующих данных численного прогнозирования погоды (Примерами моделей численного прогнозирования погоды, используемых для этой цели, являются европейская HiRLAM (модель ограниченной области высокого разрешения) и GFS (система глобального прогнозирования) от NOAA.	Программное обеспечение для прогнозирования погоды
Программное обеспечение для электростанций всех типов		
SCADA	Система диспетчеризации оперативных данных работы электростанций. SCADA предназначена для сбора данных и управления (диспетчеризации) исполнительными механизмами, обработки и отображения (визуализации), архивирования и передачи информации об объекте мониторинга и управления реальном времени.	Программное обеспечение для прогнозирования работы электростанций.

Продолжение таблицы 7.

1	2	3
SDM; Управление электростанцией; Global-Energy	Ряд решений которые позволяют создавать различные конфигурации сети и задавать входные параметры, выбирать различные варианты проведения оптимизации, оптимизация положения источников энергии (актуально при планировании новых сетей в случаях освоения новых территорий), оптимизация положения и емкости накопительных батарей (актуально как при планировании новых, так и при оптимизации существующих сетей), просматривать и сравнивать результаты работы выбранного алгоритма и выбирать наилучший результат.	Программа оптимизации конфигурации электросети с целью снижения потерь
1С:ERP Энергетика 2	1С:ERP Энергетика 2 – это ERP-решение, разработанное для оптимизации и автоматизации бизнес-процессов в сфере энергетики. Программа позволяет фиксировать нормы отпуска электроэнергии, планировать энергосбережение, контролировать расход ресурсов, а также управлять финансовыми, бюджетными и кадровыми аспектами, закупками и ремонтом оборудования	
EMAS.ТЭП	Программа от АО "НБИ" определяет действительные нагрузки и параметры режима работы оборудования, автоматизирует ведение отчетности внутри производственного блока генерирующих компаний. В модуле имеется возможность реализации мнемосхем для визуального выявления "узких мест" при производстве тепловой и электрической энергии.	Модуль расчета технико-экономических показателей ТЭЦ, (ТЭП) ТЭС
IndorPower	Геоинформационная система электроэнергетических систем предназначена для оперативного ведения технической и эксплуатационной информации по электрическим сетям классов напряжений от 1150 кВ до 0,4 кВ.	Объединяет технические и эксплуатационные данные по электрическим сетям.

Продолжение таблицы 7.

1	2	3
База аварийности в электроэнергетике	Решение создаёт акты расследования причин аварий и повреждений электросетевых объектов напряжением 0,4-35 кВ включает в себя их корректировку при необходимости и последующую передачу в АО «СО ЕЭС». Также осуществляется фильтрация актов и контекстный поиск, что позволяет эффективно управлять информацией. Важным аспектом работы является формирование аналитической отчетности и составление отчетов установленной формы.	Решение позволяет оформлять, сохранять и передавать в единую базу данных Системы акты расследования причин аварий в электроэнергетике.
1С: АРМ ОРЭМ и РРЭ	Программное обеспечение разработано АО «Атомэнергопромбыт» (входит в АО «НоваВинд» - ветроэнергетический дивизион Росатома) и представляет собой биллинговую систему, предназначенную для ведения взаиморасчетов с потребителями на оптовом и розничных рынках электрической энергии и мощности, как отраслевыми, так и внешними.	Программа клиентского обслуживания потребителей электроэнергетики.

Источник: составлено автором по данным:

Industryinsights. <https://www.industryinsights.eu/tt/>

Vestas and Siemens Gamesa partner on standard solutions.

<https://energywatch.com/EnergyNews/Renewables/article16682630.ece>

Siemens Energy. <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/press-releases/strategic-development-and-personnel-change-at-siemens-gamesa.html>

General Electric's Renewable Energy Rival Just Stepped Up Competition.

<https://www.fool.com/investing/2021/02/12/ges-rival-vestas-launches/>

Wind Energy programs involves a multitude of people from vendor companies, service providers collaborating to execute the deployment of wind energy infrastructure.

https://windenergy.fandom.com/wiki/Wind_energy_software;

Программы для электроэнергетики. <https://picktech.ru/catalog/power-industry-software/>

С целью систематизации методов мониторинга для выбора платформы внедрения анализа данных, автор выбрал следующие модели (табл.8).

Таблица 8. Специализированные цифровые решения для анализа больших данных в энергетике

Решение	Поставщик	Ключевые возможности
Vestas PowerPlus	Vestas	Мониторинг энергопроизводительности, анализ отказов
Gamesa EM	Siemens Gamesa	Аналитика KPI, предиктивная диагностика
SCADA-телеметрия	Различные	Сбор реальных данных в режиме реального времени

Источник: составлено автором.

В результате сравнения моделей был сделан вывод: анализ больших данных для формирования экономических показателей целесообразно проводить с использованием готовых цифровых решений.

В качестве рекомендации автором предложено внедрить Vestas PowerPlus или Siemens Gamesa EM для комплексного анализа и оптимизации работы ветроэлектростанций.

Автор провел обзор зарубежных методик оценки эффективности работы ветроэлектростанций и используемых в них показателей (табл.8, 9).

Таблица 9. Специализированные показатели для оценки эффективности работы электростанций

Методика	Россия	ЕС	США
КИУМ	Основной KPI	Не используется	Не используется
LCOE	Редко применяется	Включает стоимость CO ₂	Учитывает интеграцию в сеть
Срок окупаемости	Обязательный расчёт	Второстепенный показатель	Интегрирован в LCOE
Устойчивость	Не входит	ESG и экологические эффекты	Grid reliability и интеграция

Источник: составлено автором.

Были выявлены отличия подходов: в России доминирует расчет КИУМ и срока окупаемости, за рубежом - дополнительно учитываются экологические эффекты и устойчивость. В России доминирует методика расчет КИУМ и срока окупаемости В ЕС: LCOE учитывает стоимость выбросов CO₂. В США: LCOE включает затраты на интеграцию ВИЭ в энергосистему. В целом за рубежом: оцениваются экологические эффекты и устойчивость энергетической системы.

В качестве рекомендации автор предлагает интегрировать в практику российских показателей расчет LCOE учётом CO₂ и оценки устойчивости, что будет отвечать в том числе «зеленой повестке» по сохранению климата на планете.

Программные продукты мониторинга показателей экономической эффективности работы ветроэлектростанций описаны в главе 2.

В заключение, можно констатировать факт, что оценка эффективности работы предприятия не предусматривает единого сценария и не имеет универсального программного решения и может включать в себя различный набор показателей, подстроенных под оперативные задачи предприятия.

Выводы по главе 1

Человечество в своей истории развития стало свидетелем нескольких энергетических переходов и в настоящее время стоит на пороге четвертого энергоперехода. На заре развития единственным энергоносителем были дрова, затем их сменил уголь, с развитием техники и технологий началась эпоха жидкого топлива - нефти. Новый энергопереход связан как с осознанием человечеством вреда для климата планеты от ископаемых источников топлива, так и с ограниченностью и дороговизной этих источников, а также с развитием новых технологий генерации электроэнергии из возобновляемых и чистых источников энергии. К основным и перспективным ВИЭ – источникам относят энергию солнца, ветра и воды.

Энергия ветра имеет большой потенциал для выработки электроэнергии как в мире, так и в России. Ожидается, что до 2035 года будет введено 15 ГВт новых мощностей ВИЭ в рамках решения глобальных климатических задач зеленой энергетики. Становится актуальным вопрос об эффективности производства электроэнергии с использованием мощности ветра, снижения себестоимости единицы генерируемой энергии, обеспечения устойчивости получаемого потока энергии на ветроэлектростанциях, для чего необходим постоянный мониторинг физических свойств ветра и показателей эффективности деятельности электростанций, как крупных промышленных предприятий.

Эффективность производства относится к числу ключевых категорий рыночной экономики. В процессе изучения зарубежной и отечественной экономической литературы выяснена взаимосвязь и взаимодополнение понятий «экономическая эффективность», «эффект» и «результативность».

Понятие «экономическая эффективность» характеризует результативность хозяйственной деятельности предприятия, которая определяется путем сопоставления полученных результатов и затрат, израсходованных для достижения результатов. Это понятие интегральное и включает в себя изменяющийся набор ключевых показателей эффективности, подбираемых в соответствии с актуальными задачами предприятия. Кроме того, оно находится во взаимосвязи с

понятиями «экономическая эффективность», «эффект» и «результативность» и является динамическим показателем и измеряется в абсолютных величинах.

На мировое состояние электроэнергетики влияет ускоренный энергетический переход в конечном потреблении энергоресурсов для решения задач «зеленой повестки», дефицита ископаемых ресурсов и дороговизну электроэнергии в странах мира. Возник мировой тренд в сфере электроэнергетики в сторону генерации электроэнергии на ВИЭ – источниках, среди которых энергия ветра имеет приоритет в применении.

Пятьдесят четыре страны мира на планете используют ветровую генерацию для обеспечения населения и промышленности электроэнергией. Благодаря этому рост генерации электроэнергии произошел по всему миру, за исключением Европы и Северной Америки. В связи с этим, проблема энергетической эффективности является одной из важнейших задач, первоочередное решение которой особенно актуально для развивающихся стран мира.

Внедрения ветроэнергетики в энергосистему России обусловлена дешевизной получаемой электроэнергии, быстрой окупаемостью; климатической безопасностью. В сценарии развития электроэнергетики РФ до 2050 года предусмотрен стабильный тренд в сторону развития ветроэнергетики. Проведенные в России исследования показали взаимосвязь: строительство новых станций должно разворачиваться на территориях со среднегодовой скоростью ветра не ниже 8 м/с, а мощность ветроэнергоустановок должна быть не менее 1000 кВт.⁹⁶

Обосновывая экономическую эффективность сооружения ветроэнергоустановок, необходимо учитывать режимные особенности работы энергосистемы.

Тренд на развитие производства энергии на ВИЭ-источниках предполагает разработку и применение модели постоянного мониторинга набора показателей

⁹⁶ Шевченко М.В. Состояние и перспективы развития зарубежной ветроэнергетики. КамчатГТУ, №4, декабрь 2005. <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-zarubezhnoy-vetroenergetiki/viewer>

эффективности и осуществления комплекса мер контроля, и в случае необходимости, принятия оперативных управленческих решений.

Одной из распространенных на практике моделей цифрового проектирования на промышленных предприятиях, в частности на предприятиях российской Единой энергетической системы (ЕЭС), является вейвлет анализ, представляющий собой специальный тип линейного преобразования сигналов и данных о процессах и физических свойствах объектов. В отечественной промышленности повсеместно применяются цифровые двойники, которые как части умной энергетической системы, могут смоделировать аварийную ситуацию и предотвратить ее. Применение цифрового моделирования в промышленности имеет тренд к росту и совершенствованию готовых цифровых решений, а моделирование экономических процессов строится на формировании моделируемого объекта во взаимосвязи с внешними и внутренними факторами.

Обеспечение экономической эффективности энергетического предприятия, постоянный мониторинг набора экономических показателей его хозяйственной деятельности являются актуальными процессами для современного предприятия, требующими автоматизированных программных решений. Успешное функционирование системы мониторинга промышленного предприятия зависит от оптимального набора показателей и требований к архитектуре программного обеспечения системы мониторинга.

Подводя итоги, можно с уверенностью утверждать, что мировая энергетика в перспективе до 2030 года и далее, продолжит в наибольшей степени зависеть от геополитики, которая определит возможности в экспорте технологий, наличие ограничений в торговых сделках, способность вырабатывать совместные подходы к регулированию внешнеэкономической деятельности, преодолению торговых барьеров и ограничений.

ГЛАВА 2. ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

2.1. Основные показатели эффективности работы ВЭС

Энергетика является основой национальной экономики любой страны мира. Без энергетики невозможно функционирование промышленности и инфраструктуры городов, развитие технического прогресса, а значит и будущего страны. Не случайно, что первоочередной задачей советской России после революции 1917 года был объявлен План всеобщей электрификации страны - ГОЭЛРО (Государственная комиссия по электрификации России). Реализация плана ГОЭЛРО обеспечила территорию страны электроэнергией, а выработка электроэнергии за 10 расчетных лет Плана была перекрыта почти вдвое. Советская Россия вступила на путь индустриализации, попутно восстанавливая разрушенную в период Гражданской войны экономику.

В настоящее время Россия обладает огромным топливно-энергетическим потенциалом, который позволяет стране занимать лидирующие позиции в мире по объемам добычи и производства энергетических ресурсов. Российская Федерация полностью обеспечивает себя топливно-энергетическими ресурсами и считается крупным экспортером топлива и энергии среди стран мира. Сложившаяся структура использования энергоресурсов поддерживает высокую потребность в энергии для промышленного производства и нужд населения⁹⁷ (рис.13), коррелируется с прогнозом роста ВВП страны (рис.14) и предъявляет новые требования к развитию Единой энергетической системы (ЕЭС) России.

⁹⁷ Киндратышин Р. Энергетическая система России: прогноз на 2023-2028 годы. <https://conomy.ru/analysis/articles/1020> дата обращения 17.07.2020



Рисунок 13. – Прогноз динамики потребления электроэнергии по ЕЭС России на 2023-2028 гг.

Источник: Киндратышин Р. Энергетическая система России: прогноз на 2023-2028 годы.
<https://conomy.ru/analysis/articles/1020>

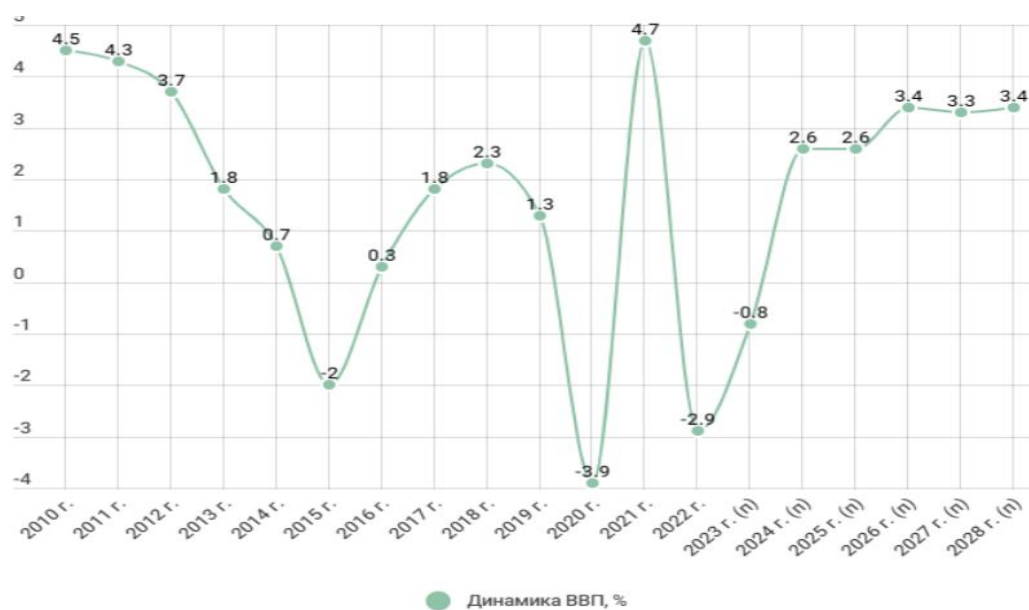


Рисунок 14. – Прогноз динамики ВВП согласно социально-экономическому развитию РФ на 2010-2028 гг.

Источник: Киндратышин Р. Энергетическая система России: прогноз на 2023-2028 годы.
<https://conomy.ru/analysis/articles/1020>

Из графиков на рисунках 13 и 14 видна прямая зависимость потребления энергии от макроэкономической ситуации в стране: роста производства и увеличения ВВП, а также потребление реагирует на геополитические изменения – резкое падение потребления энергии в 2022 году в связи с военным конфликтом между Россией и Украиной.

Главной стратегической задачей, стоящей перед современной ЕЭС РФ, является инновационное развитие топливно-энергетического комплекса, обеспечивающих его устойчивое развитие; повышение экономической эффективности производства энергии; снижение заданного значения энергоемкости⁹⁸ ВВП на 40% и более⁹⁹. Одновременно с этим, перспективным направлением является выполнение задач энергетической стратегии России на основе приоритетного использования альтернативной энергетики, цифровизации энергетического производства и серьезным инвестированием в энергетическую отрасль государства и крупного бизнеса. Прорабатывается на правительственном уровне вопрос корпоративных отношений с зарубежными держателями акций холдинга «Россети», открывая новый путь к зарубежным инвестициям.

В условиях прогнозируемого в мире дефицита ископаемых видов топлива, продвижения «зеленой» климатической повестки, повсеместно планируемого четвертого энергетического перехода, повышения технологической независимости, проблема энергетической эффективности является одной из важнейших задач для развивающихся стран. Потребности в электрической энергии в современном обществе практически неограниченны и обусловлены в первую очередь развитием технологий.

В России технологии использования ВИЭ в настоящее время характеризуются высокими удельными капиталовложениями и высокой себестоимостью электроэнергии, которая в дальнейшем может возрасти еще на 3–

⁹⁸ Цыбатов В. А. Экономический рост как важнейший фактор снижения энергоемкости валового регионального продукта // Экономика региона. 2020. Т. 16, вып. 3. С. 739-753. https://doi.org/10.17059/ekon. reg.2020-3-x. https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/92106/1/2020_16_3_005.pdf

⁹⁹ Энергетическая стратегия России на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 года №1523-р. <http://government.ru/docs/all/128340/>

4%¹⁰⁰. Вместе с этим, оценка эффективности и высокие темпы развития возобновляемых источников энергии в других странах свидетельствуют о пользе освоения и внедрения новых технологий энергопроизводства в промышленное использование.

В РФ развитие и внедрение энергосберегающих технологий приведет к экономии значительных ресурсов, что позволит перенаправить их на развитие других отраслей. Альтернативная энергетика располагает мощным потенциалом для развития и, кроме экологического преимущества, обладает и экономическим преимуществом перед другими видами энергетики, оставаясь относительно дешевой.

Структура динамики роста потребления электроэнергии по видам энергии в РФ представлена на рис. 15. Из графика на рис.15 видно, что среди возобновляемых источников генерации энергии лидирует использование энергий ветра и солнца.

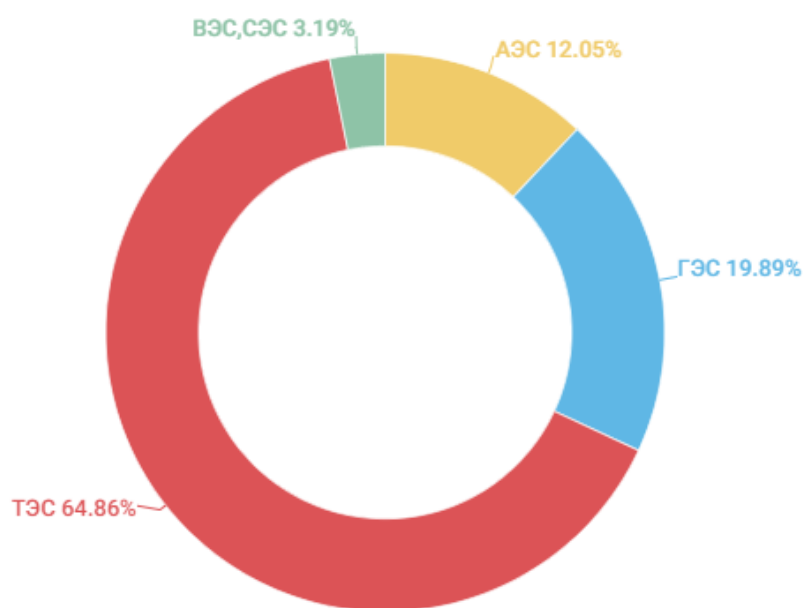


Рисунок 15. – Структура установленной мощности ЕЭС по видам энергии на конец 2028 г.

Источник: Киндратышин Р. Энергетическая система России: прогноз на 2023-2028 годы.
<https://conomy.ru/analysis/articles/1020>

¹⁰⁰ Лапаева О.Ф., Иневатова О.А., Дедеева С.А. Современные проблемы и перспективы развития топливно-энергетического комплекса // Экономические отношения. – 2019. – Том 9. – № 3. – С. 2129- 2142. doi: 10.18334/eo.9.3.40815

Таким образом, в экономике России ветроэнергетика пока рассматривается как альтернатива традиционной энергетике и ее применяют в дополнение к основным видам генерации электроэнергии¹⁰¹. В структуре установленной мощности ЕЭС России к 2028 году предполагается увеличение доли ВИЭ, в частности, на энергиях ветра и солнца с 1,78% до 3,19% и снижение доли ТЭС с 66,05% до 64,86%¹⁰².

С целью выявления оптимального набора показателей оценки экономической эффективности работы ВЭС, автор провел сравнительный анализ методик расчета экономической эффективности работы ВЭС, сложившихся в РФ, ЕС и США. Выявлены отличия подходов (табл.10):

- В России доминирует расчет КИУМ и срока окупаемости, за рубежом — дополнительно учитываются экологические эффекты и устойчивость.
- В Евросоюзе: LCOE учитывает стоимость выбросов CO₂.
- В США: LCOE включает затраты на интеграцию ВИЭ в энергосистему.

Общее в зарубежных подходах: оцениваются экологические эффекты и устойчивость.

Таблица 10

Методики расчета зарубежных и отечественных показателей экономической эффективности работы ВЭС

Методика	Россия	ЕС	США
КИУМ	Основной KPI	Не используется	Не используется
LCOE	Редко применяется	Включает стоимость CO ₂	Учитывает интеграцию в сеть
Срок Окупаемости	Обязательный расчёт	Второстепенный показатель	Интегрирован в LCOE
Устойчивость	Не входит	ESG и экологические эффекты	Grid reliability и интеграция

Источник: составлено автором.

¹⁰¹ Мокшин М.Ю., Путилов А.В., Римская О.Н. (2024). Рынок ветроэнергетики в России и за рубежом: проблемы и перспективы развития. Стратегические решения и риск-менеджмент, 15(4): 338–347. DOI: 10.17747/2618-947X-2024-4-338-347. https://elibrary.ru/download/elibrary_80396238_14320046.pdf

¹⁰² Киндратышин Р. Энергетическая система России: прогноз на 2023-2028 годы. <https://conomy.ru/analysis/articles/1020>

Важнейшей характеристикой, определяющей энергетическую ценность ветра, является его скорость. Для определения скорости ветра в России создан ветровой кадастр, представляющий собой систематизированный свод данных, характеризующий ветровые условия местности, составляемый периодически или путем непрерывных наблюдений и дающий возможность количественной оценки силы ветра и расчета ожидаемой выработки мощности ветроэнергетическими установками.¹⁰³ Согласно ГОСТ Р 51237–98, ветроэнергетические установки классифицируются на четыре класса мощности: от 5 кВт до более 1000 кВт.

Исследования российских ученых и инженеров показали, что использование ВЭУ является экономически выгодным на российских территориях, где среднегодовая скорость ветра не ниже 8 м/с. Экономическая эффективность использования ветровой энергетики в РФ и мире обусловлена сокращением экологических рисков, надвигающимся дефицитом м вследствие чего, дороговизной твердого и жидкого топлива, а также повышением энергетической безопасности и энергосбережения на промышленных предприятиях национальной экономики.

Стоимость единицы энергии (1 кВт·ч) — основной и структурный показатель (наряду с годовыми затратами на 1 кВт установленной мощности), используемый в дискуссиях об экономической эффективности ВИЭ, в том числе ветроэлектростанций в российской практике. В последние годы получение энергии на базе ВИЭ широко практикуется в мире не только в качестве самого быстрорастущего и быстрокупаемого, но и в качестве основного сектора энергетики.

По некоторым данным, стоимость электроэнергии в РФ, которую генерирует ВЭС, составляет 3,5 рубля за кВт·ч. Указанная цена может быть зафиксирована на

¹⁰³ Государственный стандарт Российской Федерации. нетрадиционная энергетика. ветроэнергетика. Термины и определения. ГОСТ Р 51237-98. <https://docs.cntd.ru/document/1200026449>

период 15 лет, что позволит владельцам ВЭС планировать инвестиции и их возврат в долгосрочной перспективе¹⁰⁴.

Структурно, стоимость единицы электроэнергии или тарифа, складывается из следующих составляющих:

1. стоимости производства электроэнергии (мощности) - до 40%;
2. стоимости передачи электроэнергии (мощности) или котловой тариф - до 55%;
3. сбытовой надбавки гарантирующего поставщика, которая составляет 4,9%;
4. инфраструктурных платежей в размере 0,1%.

На рис.16 представлены составляющие тарифов по регионам России по состоянию на 2022 год.

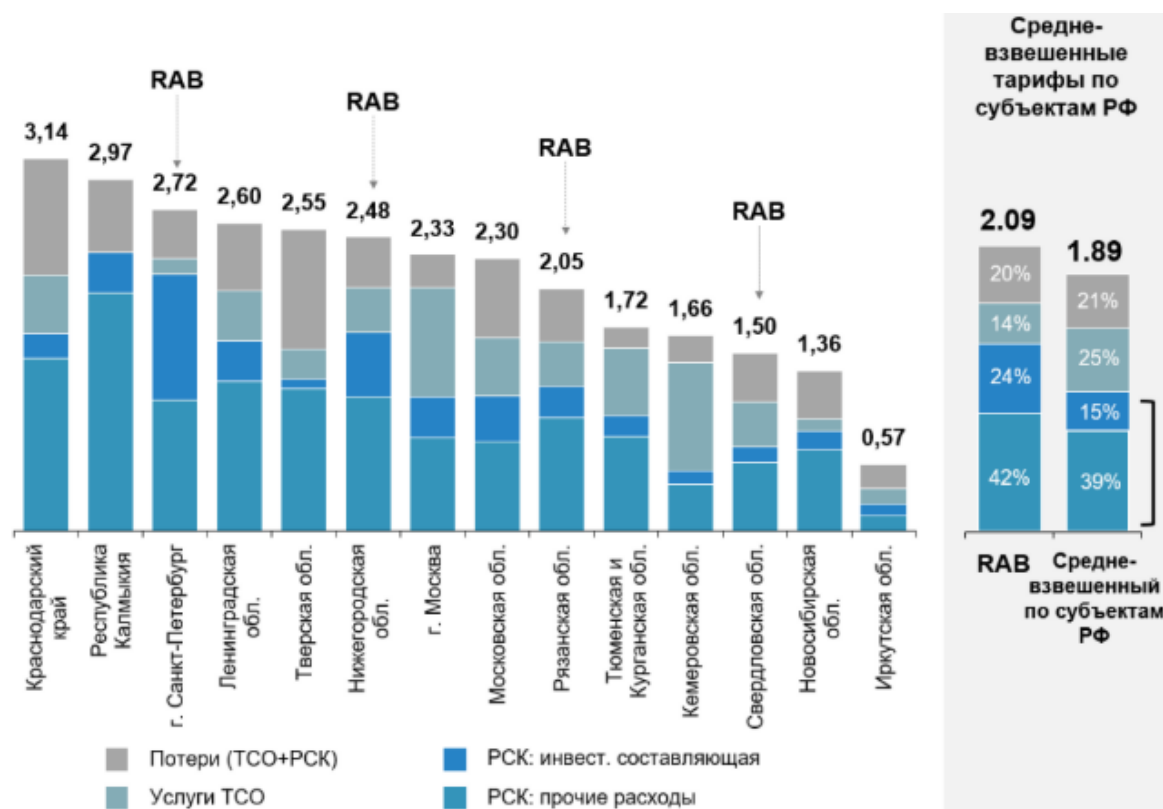


Рис.16. – Структура тарифа на услуги по передаче электрической энергии, 2022 г., руб./кВтч.

Источник: Российская электроэнергетика: 20 лет реформ. Аналитический отчет. Аналитический центр ТЭК. https://actek.group/russian_electric_power_industry/

¹⁰⁴ Энергия ветра: дешевле ли она в сравнении с традиционными киловаттами? Об этом сообщает "Рамблер". https://finance.rambler.ru/economics/50434678/?utm_content=finance_media&utm_medium=read_more&utm_source=copylink

Регулируемые цены на электроэнергию устанавливают уполномоченные органы исполнительной власти субъектов федерации, основываясь на документах верхнего уровня. Основными законодательными документами, регулирующими тарифы на передачу электрической энергии служат:

- Приказ ФАС России от 31.10.2024 №816/24 «Об утверждении цен (тарифов) на услуги по передаче электрической энергии по единой национальной (общероссийской) электрической сети, оказываемые ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети» с применением метода доходности инвестированного капитала на 2025 – 2029 годы»;
- Предложение ПАО «Россети» о размере тарифов на услуги по передаче электрической энергии по ЕНЭС, долгосрочных параметров регулирования на 2025-2029 годы».
- Постановление Правительства № 239 от 07.03.95 г. «О мерах по упорядочению государственного регулирования цен (тарифов);
- Федеральный закон "Об электроэнергетике" от 26.03.2003 N 35-ФЗ;
- Постановление Правительства Российской Федерации от 18 декабря 2021 г. № 2352 государственная программа «Развитие энергетики» приведена в соответствие с постановлением Правительства Российской Федерации от 26 мая 2021 г. № 786 «О системе управления государственными программами Российской Федерации» и другими нормативными актами.

На территории РФ стоимость электроэнергии различается для физических и юридических лиц, по зонам, видам тарифов, видам цен (регулируемые и нерегулируемые), ценовым категориям и представляет собой многовариантную систему реализации энергии. Мосэнергосбыт также предлагает клиентам к покупке «зеленую энергию», стоимость которой выше традиционной и подтверждается потребителю выдачей электронного сертификата о происхождении энергии. Акция направлена на воспитание у граждан сознательного отношения к сохранению климата на планете.

К примеру, Московский Департамент экономической политики и развития установил тарифы на электрическую энергию для физических лиц на 2025 год в следующих размерах.¹⁰⁵

Для жителей домов, расположенных в границах города, оборудованных газовыми плитами, и для потребителей, приравненных к населению, действуют следующие тарифы:

- одноставочный тариф с 1 января – 6,99 рубля/кВт*час, с 1 июля – 7,87 рубля/кВт*час;
- одноставочный тариф, дифференцированный по двум зонам суток:
 - в дневное время с 1 января – 8,47 рубля/кВт*час, с 1 июля – 9,45 рубля/кВт*час,
 - в ночное время с 1 января – 3,43 рубля/кВт*час, с 1 июля – 4,08 рубля/кВт*час;
- одноставочный тариф, дифференцированный по трём зонам суток:
 - в пиковой зоне с 1 января – 10,16 рубля/кВт*час, с 1 июля – 11,24 рубля/кВт*час,
 - в полупиковой зоне с 1 января – 6,99 рубля/кВт*час, с 1 июля – 7,87 рубля/кВт*час,
 - в ночной зоне с 1 января – 3,43 рубля/кВт*час, с 1 июля – 4,08 рубля/кВт*час.

В соответствии с Основными положениями функционирования розничных рынков электрической энергии, утвержденными Постановлением Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 (далее – Правила), электрическая энергия (мощность) продается юридическим лицам по нерегулируемым ценам с заключением договора купли - продажи, за исключением продажи электрической энергии (мощности) населению и приравненным к нему категориям потребителей. Выбор или изменение варианта тарифа на услуги по передаче электрической энергии (мощности) производится в соответствии с п. 97 Правил. Стоимость единицы электроэнергии для юридических лиц выше, чем для населения.

¹⁰⁵ В Москве в 2025 году будут действовать новые тарифы на электрическую энергию 20.12.2024.
[В Москве в 2025 году будут действовать новые тарифы на электрическую энергию 20.12.2024](#)

В России с 2008 года был введен «котловой принцип» тарифообразования для всех потребителей, расположенных на территории соответствующего субъекта Российской Федерации и принадлежащие к одной группе, должны оплачивать услуги по передаче электрической энергии по одинаковым тарифам. В 2022 году одноставочный котловой тариф на услуги по передаче электрической энергии на территории Российской Федерации составил 1,89 руб./кВт*ч, из которых 54% приходятся на оплату услуг крупнейших (котлодержателей) ТСО и ЕНЭС, а 25% - на услуги прочих ТСО¹⁰⁶.

Самая дорогая электроэнергия в Чукотском автономном округе РФ. Во всех населённых пунктах округа тариф составляет 11,08 рублей за киловатт-час. Также высокие тарифы на электричество установлены в Магаданской области, Камчатском крае, Республике Саха и Сахалинская области. Упомянутые регионы изолированы от единой энергетической системы и практически не газифицированы. Самая дешёвая электроэнергия в Иркутской области. В Иркутске тариф составляет 1,58 рубля за киловатт-час, в сельской местности — 1,106 рубля. Дешевизна энергии обусловлена наличием в регионе каскада гидроэлектростанций, которые производят дешёвую энергию¹⁰⁷.

В экономической науке классический показатель эффективности рассчитывается как соотношение итогового показателя к понесённым для его получения затраченным ресурсам.

Общая формула расчёта эффективности:

$$\mathcal{E} = \text{РД} / \mathcal{З}, \quad (4)$$

где РД — результат деятельности, а $\mathcal{З}$ — затраты.

Прибыльный проект показывает результат расчёта не менее 1.

Ещё один показатель эффективности — валовая прибыль, которая вычисляется как разница между доходом и затратами.

¹⁰⁶ Российская электроэнергетика: 20 лет реформ. Аналитический отчет. Аналитический центр ТЭК. https://actek.group/russian_electric_power_industry/

¹⁰⁷ Эксперты рассказали, где в России самая дешёвая и самая дорогая электроэнергия. https://rg.ru/2025/01/11/reg-dfo/eksperty-rasskazali-gde-v-rossii-samaia-deshevaia-i-samaia-dorogaia-elektroenergiia.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F

$$\text{ВП} = \text{РД} - \text{З}, \quad (5)$$

где ВП — валовая прибыль, РД — результат деятельности, полученный доход, З — затраты, себестоимость.

С целью конкретизации полученного результата используют коэффициент рентабельности, позволяющий оценить доход на каждый вложенный рубль. Формула расчёта:

$$\text{КЭ} = \text{ВП} / \text{З} \times 100\%, \quad (6)$$

где КЭ — коэффициент эффективности (рентабельности), ВП — валовая прибыль, З — затраты.

Эффективность работы ВЭС обусловлена рядом показателей: технических (конструктивных), экономических (результативных), эксплуатационных и экологических и зависит от способности ВЭС выбрать оптимальный режим работы, то есть уметь подстроиться под направление ветра¹⁰⁸.

Следуя общему подходу к определению показателей экономической эффективности промышленного предприятия с ориентиром на ветроэнергетику, среди основных показателей эффективности работы ветроэлектростанций можно выделить следующие.

1. Показатель загрузки мощностей (КИУМ) рассчитывается как доля фактической выработки к потенциальной, определённой через условный максимум генерации при 100% загрузке. Математически КИУМ представляет отношение среднеарифметического значения мощности к установленной мощности электроустановки за определённый интервал времени.¹⁰⁹

2. Удельная мощность ветрового потока. Это мощность, которую снимает ветроколесо с 1 м² «ометаемой» площади.

3. Среднегодовая удельная выработка электроэнергии на 1 м² ометаемой площади.

4. Годовая экономия условного топлива.

¹⁰⁸ Калашников, А. Е. Определение базовых свойств умной ветроэлектростанции малой мощности с наиболее эффективными характеристиками / А. Е. Калашников, Н. А. Устинов. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2018. — № 6 (192). — С. 36-39. — URL: <https://moluch.ru/archive/192/48337/> (дата обращения: 04.04.2025).

¹⁰⁹ М. Мокшин, А. Путилов. Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования. Энергетическая политика.

5. Объём предотвращённой эмиссии углекислого газа в атмосферу.
6. Срок окупаемости капитальных вложений в устройство ВЭС.
7. Удельные капитальные вложения в 1 кВт установленной мощности ВЭС.
8. Нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений.
9. Инвестиционные затраты.
10. Операционные затраты.
11. Приведённая себестоимость электроэнергии (ПСЭ).
12. Простой срок окупаемости.

13. LCOE (levelized cost of electricity) в энергетике — это показатель нормируемой стоимости электроэнергии, средняя расчётная себестоимость производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла электростанции (включая все возможные инвестиции, затраты и доходы). Нормированная стоимость электроэнергии рассчитывается на 20–40 лет жизненного цикла и даётся в единицах стоимости на кВт·ч.

Показатель экономической эффективности работы электростанций разного типа для расчёта нормированной (средней) расчётной себестоимости производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла генерирующего объекта определяется по формуле:¹¹⁰

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{CAPEX_t + OPEX_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (7),$$

где I_t — инвестиционные затраты в год t ; M_t — операционные затраты и затраты на содержание в год t ; F_t — затраты на топливо в год t ; E_t — производство электроэнергии в год t ; r — ставка дисконтирования; t — жизненный цикл системы.

¹¹⁰ Зубакин В.А. Экономическая эффективность электростанций на возобновляемых источниках энергии на примере показателя LCOE. [СОК №10 | 2024](https://www.c-o-k.ru/articles/ekonomicheskaya-effektivnost-elektrostanciy-na-vozobnovlyaemyh-istochnikah-energii-na-primere-pokazatelya-lcoe) (стр. 72-75).
<https://www.c-o-k.ru/articles/ekonomicheskaya-effektivnost-elektrostanciy-na-vozobnovlyaemyh-istochnikah-energii-na-primere-pokazatelya-lcoe>

Величина LCOE представляет собой среднюю минимальную цену продажи электрической энергии, которая обеспечивает безубыточность генерирующего объекта в течение всего срока эксплуатации.

Стоит отметить наличие иного подхода к расчету LCOE:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{A + B + C}{(1 + r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1 + r)^t}} \quad (8),$$

где E_t — выработка электроэнергии объектом генерации в году t ;

$A = HBV \text{ ДПМ}_t$ — необходимая валовая выручка по договорам о предоставлении мощности (ДПМ) в году t ;

$B = HBV \text{ РСВ}_t$ — необходимая валовая выручка на «рынке на сутки вперёд» (РСВ) в году t ;

$C = HBV \text{ КОМ}_t$ — необходимая валовая выручка на рынке конкурентного отбора мощности (КОМ) в году t .

Формула расчета LCOE официально применяется отраслевым российским регулятором — Ассоциацией НП «Совет рынка», объединяющей участников оптового энергорынка. В настоящей работе автор опирался именно на российский подход в расчете показателя LCOE.

По мнению автора, зарубежные критерии KPI, свойственные для оценки эффективности работы ветроэлектростанций могут быть следующими: производительность (КИУМ), себестоимость производства энергии, рентабельность активов (табл.11).

Таблица 11. Зарубежные критерии для оценки эффективности работы ВЭС

KPI	Значение	Примечание
КИУМ	32 %	Типичное для современных ВЭС
LCOE	50 USD/МВт*ч (или 3950 Р/МВт*ч)	45–55 USD/МВт*ч (или 3555 – 4345 Р/МВт*ч)
ROA	8 %	Рыночный ориентир для инвесторов

Источник: составлено автором.

Перевод значений в рубли по курсу Банка России на 13.06.2025 = 79,0 руб за 1 USD.

По мнению автора, указанные значения KPI служат ориентиром при экономическом моделировании и оценке проектов создания ВЭС.

Группа российских исследователей Дегтярев К.С., Залиханов А.М., Соловьев А.А., Соловьев Д. А. изучили технические особенности жизненного цикла электростанций, работающих на различных видах источниках и рассчитали себестоимость единицы производимой ими энергии¹¹¹ (табл.12). Ученые сделали следующие выводы в результате исследования.

1. ВИЭ-электростанциям присущ низкий коэффициент использования мощности. Преимуществом является отсутствие переменных затрат, но существуют высокие затраты на этапе инвестирования проекта. Следовательно, электростанции на ВИЭ-источниках будут экономически выгоднее при длительных сроках эксплуатации.

2. Инвестиционные вложения в газовые ТЭС (даже в экологически усовершенствованном варианте) позволяют оставаться самыми низкими.

Данные таблицы 12 позволяют сделать следующие предположения:

1. В периоде от 5 до 15 лет с момента ввода станции в эксплуатацию из-за высоких переменных операционных затрат общие накопленные затраты становятся выше затрат ГЭС, геотермальных, атомных и ВЭС на суше.

¹¹¹ Дегтярёв К.С., Залиханов А.М., Соловьёв А.А., Соловьёв Д.А. К вопросу об экономике возобновляемых источников энергии. энергия: экономика, техника, экология. № 10, 2016. Стр.10-20.

2. Конкурентоспособными, с точки зрения инвестиционных и общих затрат в периоде от 5 до 25 лет, оказались гидравлические, геотермальные, атомные электростанции и ВЭС на суше.

3. Модернизированные угольные станции характеризуются средней величиной инвестиционных затрат, но уступают большинству других типов станций при сроке эксплуатации более 15 лет.

4. Электростанции на биомассе, солнечные PV, ветровые на море и солнечные тепловые будут дорогими в эксплуатации на 25-летнем и более длительных интервалах.

Таблица 12. Затраты на строительство и обеспечение работы электростанций, необходимые для выработки заданного количества электроэнергии (17613 ГВт · ч/год).

Тип ЭС	Инвестиционные затраты, млн. долл.	Накопленные затраты (инвестиционные и операционные) за данный промежуток времени					Доли инвестиционных затрат в общей структуре за 25 лет, %
		5 лет	10 лет	15 лет	20 лет	25 лет	
Угольная обычная	3246	10767	12856	16945	20034	23123	15
Угольная комбинированная схема с газификацией угля, улавливанием и удержанием углерода	15609	19993	24377	28760	33144	37527	42
ТЭС на газе обычная	2119	6675	11231	15786	20342	24898	9
ТЭС на газе усовершенствованная с улавливанием и удержанием углерода	4842	10493	16144	21795	27446	33098	15
Атомные	12354	14435	16516	18597	20678	22754	54
ГеоТЭС	9533	10626	11718	12811	13904	14996	64
На биомассе	19815	27650	35486	43321	51157	58992	34
ВЭС на суше	12713	13849	14985	16121	17257	18388	69
ВЭС на море	34017	36028	38038	40049	42060	44070	77
Солнечные тепловые	50893	54319	57700	61081	64462	67843	75
Солнечные PV	31148	32141	33134	34127	35120	36112	86
ГЭС	11138	11407	11675	11944	12212	12481	89

Источник: Дегтярёв К.С., Залиханов А.М., Соловьёв А.А., Соловьёв Д.А. К вопросу об экономике возобновляемых источников энергии. энергия: экономика, техника, экология. № 10, 2016. Стр.10-20.

5. Ветровые станции на суше оказались более дешёвыми по сравнению с АЭС и усовершенствованными ТЭС при сроке эксплуатации от 5 до 10 лет.

Таким образом, электростанции на основе ВИЭ выходят на уровень ценовой конкурентоспособности с технологически и экологически усовершенствованными станциями, работающими на ископаемом топливе.

Расширение использования ВИЭ с нестабильной выработкой в электроэнергетике приведет к росту волатильности цен на газ и уголь и повышению потребности в системах резервирования и накопления электроэнергии.

Расчеты по себестоимости единицы энергии, полученные исследователями из ИНЭИ РАН А.А. Макаровым, В.А. Кулагиным, Д.А. Грушевенко и А.А. Галкиной показали следующие результаты¹¹².

1. Средневзвешенная себестоимость производства электроэнергии за 2010–2022 гг. на солнечных станциях сократилась с 0,43 до 0,08 долл. 2023/кВт·ч, и к 2050 году прогнозируется возможность снижения затрат еще на 30%.

2. На береговых ветровых станциях после сокращения затрат с 0,11 до 0,07 долл. 2023/кВт·ч за период 2010–2022 гг. ожидается снижение еще на 10% к 2050 г.; на шельфовых ветровых станциях удешевление произошло с 0,20 до 0,11 долл. 2023/кВт·ч, и прогнозируется снижение еще на 30%.

3. Стоимость производства электроэнергии на крупных ГЭС является одной из самых низких среди альтернативных источников энергии и начинается от 0,01 долл. 2023/кВт·ч. Нужно принимать во внимание факт, что природный потенциал использования гидроэнергии в мире достаточно ограничен, а затраты на малые, средние и микро - гидроэлектростанции довольно высоки.

4. Потенциал сокращения производственных затрат есть также у атомной энергетики. АЭС в большинстве стран мира оказываются дороже газа и угля при

¹¹² Кулагин В.А., Грушевенко Д.А., Галкина А.А. Прогноз развития энергетики мира и России до 2050 года // Современная мировая экономика. Том 2. 2024. №1(5). <https://cwejournal.hse.ru/index.php/cwejournal/vkulagin-dgrushevenko-agalkina-1-2024>

генерации электроэнергии. Однако атомные станции, в отличие от ВИЭ, обеспечивают устойчивую и равномерную выработку электроэнергии.

5. Затраты на угольных и газовых электростанциях имеют тенденцию к сокращению за счет повышения КПД станций, но будут зависеть от цен на поставку угля и газа, которые имеют тенденцию к росту. В результате объемы производства электроэнергии из газа и угля будут повышаться, а во второй половине прогнозного периода сокращаются и абсолютные объемы генерации на этих электростанциях, все более распространяется их использование в режиме резервирования ввиду неравномерности выработки на ВИЭ-электростанциях.

В 2023 году, по сведениям агентства Renewable Energy Agency (IRENA) 81% добавленных мощностей на основе ВИЭ был дешевле альтернатив на основе ископаемых видов топлива, обеспечивая убедительное экономическое и инвестиционное обоснование для трёхкратного наращивания мощностей на основе ВИЭ к 2030 году.

Энергетики мира наблюдают тенденцию к снижению средневзвешенной стоимости электроэнергии, вырабатываемой введенными в эксплуатацию станциями на основе ВИЭ для следующих типов станций:

- солнечной фотоэлектрической энергетики на 12%;
- наземной ветроэнергетики на 3%;
- морской ветроэнергетики на 7%;
- концентрированной солнечной энергии на 4%;
- гидроэнергетики на 7%.¹¹³

Наибольший рост экономической эффективности и увеличение КИУМ в настоящее время имеет солнечная и ветряная генерация, а АЭС в перспективе будет оставаться самой дорогой по показателю LCOE (рис.17).

Особенность использования показателя LCOE для анализа экономической эффективности работы электростанций разного типа заключается в том, что не

¹¹³ Рекордный рост обеспечивает ценовое преимущество возобновляемой электроэнергии. [Рекордный рост обеспечивает ценовое преимущество возобновляемой электроэнергии](#)

существует единой методики, содержащей перечень нормативов, входящих в расчёт LCOE.

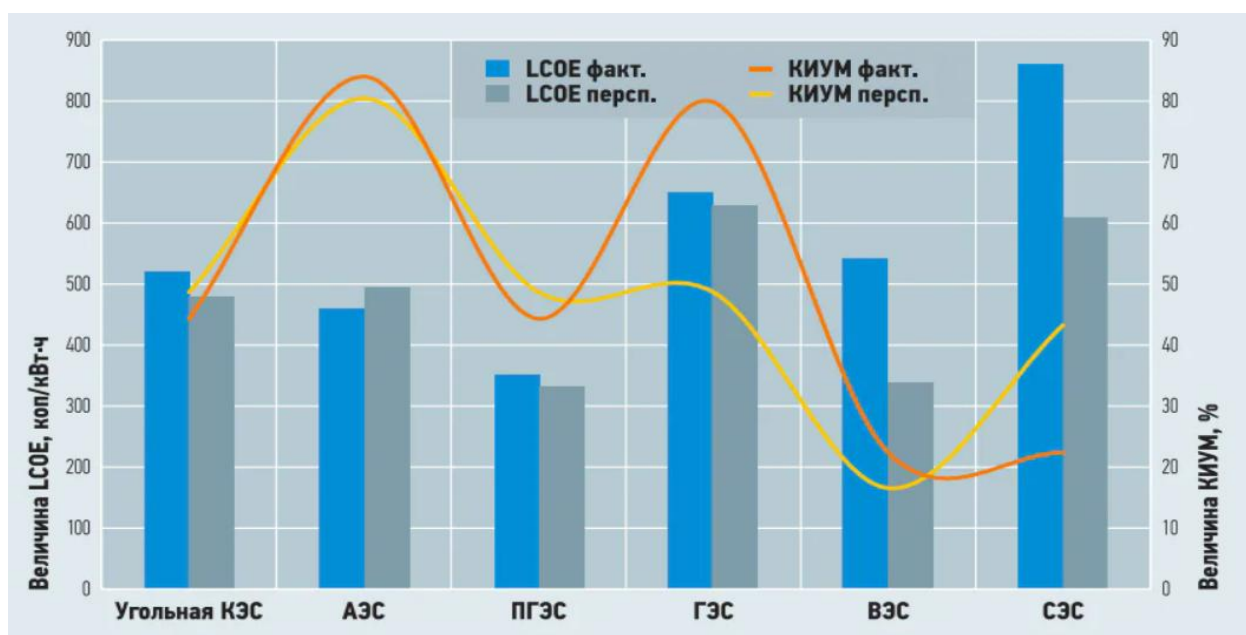


Рисунок 17. – Сравнение величин LCOE по технологиям генерации по данным АО «СО ЕЭС».

Источник: Зубакин В.А. Экономическая эффективность электростанций на возобновляемых источниках энергии на примере показателя LCOE.

На эффективность работы ВЭС оказывает влияние «эффект сокращения (curtailment)»¹¹⁴, который заключается в ограничении выработки электроэнергии в периоды, когда она превышает потребление. Также на рынке возникает эффект «ценового каннибализма»: ВЭС снижают равновесную цену, тем самым уменьшая собственную выручку и выручку других станций¹¹⁵.

Министерство энергетики РФ доработало законопроект о поддержке «зеленой энергетики», а Постановлением Правительства РФ от 21 сентября 2021 года №1587 были утверждены критерии поддержки «зеленых проектов» и инициативных решений в контексте целей устойчивого развития.¹¹⁶ В России

¹¹⁴ Ланьшина Т. Прогноз развития ВИЭ в России до 2035 года. Научный вестник ИЭП имени Гайдара. 2019;9:40–47.

¹¹⁵ Трегубова Е.А., Городилов М.А., Люшнин Л.С. Экономическая эффективность накопителей электроэнергии при интеграции электростанций на возобновляемых источниках энергии в энергосистеме//Вестник университета. 2024. № 10. С. 150–160.

¹¹⁶ Постановление Правительства РФ от 21 сентября 2021 года №1587 Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации. <http://static.government.ru/media/files/3hAvrl8rMjp19BApLG2cchmt35YBPH8z.pdf>

критерии определения экопроектов, в том числе по ветроэнергетике, заложены в «Национальной методологии социальных финансов»¹¹⁷ (Таксономия зелёных проектов)».

Автором исследования проведена оценка интенсивности использования мощности ВЭС различных типов через анализ следующих показателей:

1. Коэффициента использования установленной мощности (КУИМ).
2. Структурного коэффициента использования мощности.

Расчет значения индикатора интенсивности использования мощности (КИУМ) ВЭС является долей от возможного выпуска электроэнергии¹¹⁸. Результаты исследования показали зависимость прироста экономической эффективности мощности ВЭС от периода года и соответственно, силы ветра в конкретный период года (табл.13).

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.

Принимая во внимание существующие знания в области экономической эффективности ветроэлектростанций, и в целях раскрытия темы настоящей работы,

¹¹⁷ Как получить государственное финансирование на «зеленый» проект. <https://journal.ecostandard.ru/esg/ustoychivoe-razvitiye/kak-poluchit-gosudarstvennoe-finansirovanie-na-zelenyy-proekt/>

¹¹⁸ Мокшин М.Ю., Путилов А.В. Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования. DOI: 10.46920/2409-5516_2023_12191_80. <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-vetroenergetiki-pri-proektirovanii-s-ispolzovaniem-algoritmicheskogo-modelirovaniya>

автор выбрал 4 показателя для проведения исследования и построения модели мониторинга экономических показателей ВЭС:

1. Коэффициент использования установленной мощности (КУИМ).¹¹⁹ Расчет значения индикатора интенсивности использования мощности (КИУМ) ВЭС является долей от возможного выпуска электроэнергии:

$$\text{КИУМ}_i = \text{Э}_i / 8760M \quad (9),$$

где Э_i - годовая фактическая выработка электростанции i -го типа, млн кВт·ч; M – установленная мощность электростанции i -го типа, ГВт.

2. NPV: показывает, сколько «чистых денег» проект даст сегодня, учитывая все будущие доходы и расходы. Если $\text{NPV} > 0$, проект прибыльный с учётом стоимости денег; если < 0 , убыточный.

3. IRR: процентная доходность проекта. IRR — это «ставка», при которой сумма дисконтированных денежных потоков = 0. Если $\text{IRR} >$ стоимость капитала, проект выгоден.

4. LCOE (Себестоимость): сколько стоит выработка 1 МВт*ч энергии за весь срок работы. Включает все затраты (строительство, эксплуатацию) и сравнивается с тарифом. Чем ниже LCOE, тем дешевле проект

Выбранные показатели эффективности работы ветроэнергетического предприятия не являются исчерпывающими и не могут в совокупности представлять окончательную оценку работы конкретной ВЭС, однако их системный мониторинг позволяет видеть ежедневную работу станции и дает возможность принять оперативное управленческое решение в случае нештатной ситуации.

¹¹⁹ Мокшин М.Ю., Путилов А.В. Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования. DOI: 10.46920/2409-5516_2023_12191_80. <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-vetroenergetiki-pri-proektirovanii-s-ispolzovaniem-algoritmicheskogo-modelirovaniya>

2.2. Подходы к цифровому моделированию в ветроэнергетике. Модель цифрового моделирования экономических показателей ВЭС

В Стратегии развития информационного общества России до 2030 года представлено определение цифровой экономики¹²⁰: «Цифровая экономика – это хозяйственная деятельность, в которой ключевым фактором производства являются данные в цифровом виде, обработка больших объемов и использование результатов анализа которых по сравнению с традиционными формами хозяйствования позволяют существенно повысить эффективность различных видов производства, технологий, оборудования, хранения, продажи, доставки товаров и услуг», то есть цифровизация имеет микро и макроэкономический характер.¹²¹

В высокотехнологичных отраслях цифровой экономики России повсеместно используются технологии цифровых двойников. Технология является интегратором различных цифровых решений и в целом способствует повышению уровня устойчивого развития высокотехнологичных компаний. Цифровые двойники, как части умной энергетической системы, помогают смоделировать аварийную ситуацию и предотвратить ее, например, при аварийном отключении электроэнергии.

Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель процесса, продукта или услуги. Он обеспечивает возможность анализа данных и мониторинга систем через численное моделирование. Национальные стандарты определяют цифровой двойник изделия как систему, включающую цифровую модель и информационные связи с изделием. Более того, цифровой двойник рассматривается как программно-аппаратный комплекс, предоставляющий модель для анализа и управления деятельностью социотехнической системы.¹²²

Применение цифрового моделирования в российской промышленности имеет тренд к росту и совершенствованию готовых цифровых решений. Для

¹²⁰ Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы». URL: [http:// kremlin.ru/acts/bank/41919](http://kremlin.ru/acts/bank/41919)

¹²¹ Римская О.Н., Анохов И.В. (2021). Цифровые двойники и их применение в экономике транспорта. Стратегические решения и риск-менеджмент, 12(2): 127–137. DOI: 10.17747/2618-947X-2021-2-127-137.

¹²² Цифровые двойники в промышленности: обзор технологий и проблемы внедрения. <https://www.c-o-k.ru/articles/cifrovye-dvoyniki-v-promyshlennosti-obzor-tehnologiy-i-problemy-vnedreniya>

создания любой цифровой модели необходимо предварительно создать 3D -объект с учетом его внешних и внутренних конструктивных составляющих. Далее виртуальный объект разбивается на элементы, где для каждого узла просчитываются выбранные физические характеристики: напряжение, температура, скорость потока и множество других¹²³. В модели используются численные методы конечно-элементного анализа, вычислительной гидродинамики, моделирования дискретных элементов, и т.д. Создается виртуальная модель, обладающая физическими свойствами реального объекта.

Моделирование экономических процессов строится на формировании моделируемого объекта во взаимосвязи с внешними и внутренними факторами. В такой виртуальной модели могут быть заданы и просчитаны любые режимы работы, в широком диапазоне изменяя внешние параметры и внутреннее состояние системы для изучения её свойств, производительности, критических нагрузок и вероятности выхода из строя. Эти возможности особенно важны именно для энергетической системы, так как в ней высока доля сложного оборудования, простои которого могут стоить предприятию и обществу больших убытков и штрафов.

Моделирование экономических процессов в цифровой экономике имеет следующий специфические черты:¹²⁴

1. Учет композитного индикатора (индикатор, который показывает уровень цифровизации региона или территории, определяет коэффициент веса цифровых технологий и возможности их использования).
2. Расчет эффекта от внедрения цифровых технологий в отрасль экономики или производственную деятельность организации.
3. Построение имитационной модели экономических процессов с использованием цифровых сервисов.

¹²³ Богданец С. Цифровые двойники и виртуальные мельницы: как моделирование меняет горнодобывающую и металлургическую промышленность. <https://www.comnews.ru/content/231388/2024-02-05/2024-w06/1013/cifrovye-dvoyniki-i-virtualnye-melnicy-kak-modelirovanie-menyaet-gornodobyvayuschuyu-i-metallurgicheskuyu-promyshlennost>

¹²⁴ Хемраев М. Специфика моделирования экономических процессов в условиях цифровизации. DOI:10.24412/2411-0450-2022-8-234-236. <https://cyberleninka.ru/article/n/spetsifika-modelirovaniya-ekonomicheskikh-protsessov-v-usloviyah-tsifrovizatsii>

4. Выбор пути цифровизации: собственными силами или привлечение сторонних организаций.

Цифровой двойник для энергетической системы должен отвечать следующим требованиям:¹²⁵

1. Учитывать процессы старения реального объекта, используя совокупность физического моделирования и анализа эксплуатационных данных, в том числе данных об отключениях, нагрузке, состоянии окружающей среды на площадке цифровой подстанции.

2. Уметь выполнять динамические оценки и настройку модели.

3. Использовать энергетические характеристики оборудования ВЭС. Использование характеристик необходимо для многих процессов производственно-сбытовой деятельности ВЭС, но данные характеристики необходимо поддерживать в актуальном состоянии для того, чтобы они описывали фактическое состояние и ограничения режимов работы оборудования.¹²⁶

Алгоритм процесса создания математической модели можно представить следующим образом:¹²⁷

1. создание математической модели объекта через построение графа объекта;
2. создание модели объекта путем параметризации математической модели объекта;

3. определение режима работы объекта за счет ввод параметров режима и проведение расчетов моделирующей программой.

В сложившейся практике, одним из наиболее эффективных методов анализа производства является имитационное моделирование. Проведение имитационных экспериментов позволяет оценить влияние изменения различных параметров системы и принять правильное решение. Имитационное моделирование достаточно давно применяется в практике многих технологических предприятий России.

¹²⁵Савина Н.В., Покровский Д.С., Применение технологии цифровых двойников на цифровых подстанциях. DOI: 10.22250/20730268_2023_101_83

¹²⁶ Аникина И.Д. От статических нормативов к динамическому цифровому моделированию характеристик. <https://www.eprussia.ru/epr/503-504/145371.htm>

¹²⁷ Там же.

Задача имитационного моделирования - поддержка при принятии решений, снижение затрат и выявление резервов для повышения эффективности производства. В случае модернизации или изменения структуры предприятия, модель позволяет оперативно оценить различные варианты развития производства, выбрав оптимальное решение.

Имитационное моделирование производственного предприятия позволяет получить такие показатели работы производственного подразделения, как длительность циклов выпускаемой продукции, уровень и динамику изменения незавершенного производства и другие параметры производственного процесса. Важно понимать, что имитационное моделирование производственных и технологических процессов в используемой системе моделирования является дискретно-событийным, то есть работа производственного подразделения представляется как хронологическая последовательность событий от расчета производственного плана до выпуска продукции.

Имитационное моделирование производственной системы на практике внедрено в производственную деятельность крупных отечественных компаний:¹²⁸

- АО «Объединенная двигателестроительная корпорация»;
- Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»;
- Челябинский металлургический комбинат;
- АО «Первоуральский новотрубный завод»;
- Завод по производству ячеистого пенобетона;
- Крупнейший производитель и поставщик в сталелитейной промышленности Tata Steel;
- Судостроительная компания Fincantieri;
- Группа компаний Airbus и др.

Ключевым направлением современной промышленности является цифровая трансформация и создание киберфизических систем, интегрирующих цифровые и

¹²⁸ Соколов И.Л. Гид по цифровому производству: цифровое имитационное моделирование производственных систем. https://up-pro.ru/library/information_systems/automation_project/cifrovoe-imitacionnoe-modelirovanie/

физические компоненты, с целью повышения скорости проектирования, разработки и производства высокотехнологичной продукции.

Концептуальная модель «цифрового завода»¹²⁹ это передовой подход к разработке «цифрового двойника» производственного предприятия (рис.18). Концепция предусматривает создание комплексных технологических решений, позволяющих разрабатывать и использовать в виде единого объекта все организационные, технологические, логистические процессы и процессы управления производственной средой за счет интеграции виртуальных моделей и киберфизических систем.



Рисунок 18. – Архитектура цифрового двойника энергетической системы.

Источник: Подходы к разработке и применению цифровых двойников энергетических систем.
<https://a-platform.ru/articles/podkhody-k-razrabotke-i-primeneniyu-tsifrovyykh-dvoynikov-energeticheskikh-sistem/>

Рассмотрим некоторые специализированные цифровые решения в области ветроэнергетики.

1. Для цифровых двойников многокомпонентных объектов, таких как энергосистемы, проблема состоит в сложности соединения цифровых двойников

¹²⁹ Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 2. С. 7–20. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.2.7.20

составляющих компонентов в единое слаженное целое. Фактически соединение требует виртуально воспроизвести процесс строительства энергосистемы на информационных и математических моделях, с проставлением корректных взаимосвязей между ними. Для сопровождения информационных моделей и других базовых компонентов цифрового двойника энергетической системы разработан отечественный программный комплекс Ntjrasck.

2. Программный комплекс разработки ветроэнергетических установок (ВЭУ) малой мощности, создан исследователями Тихоновой О.Б., Русяковым Д.В., Лариной Л.В., Давыдовым Я.С. Компьютерное моделирование ветроэнергетической установки поможет заменить физические эксперименты на виртуальные, при допустимой достоверности результатов¹³⁰, а расчеты проведены в программном комплексе ANSYS Fluent.

3. Совместная разработка международного коллектива исследователей цифровой модели двойников морских ветряных электростанций по сокращению эксплуатационных расходов (OPEX) и повышению надёжности турбин¹³¹ за счёт профилактического обслуживания, которое использует данные в реальном времени для прогнозирования и предотвращения возможных сбоев системы.

4. Цифровой двойник для аэродинамического мониторинга лопастей ротора ветряной турбины Aerosense¹³² международного коллектива инженеров Марыковского Ю., Кларка Т., Депарлье Ж., Хази Э. и Барбера С. Система Aerosense использует простые в установке микроэлектромеханические (MEMS) датчики, собирает аэродинамические и акустические данные с лопастей ротора и анализирует их с помощью облачной системы, которая проводит аналитику в режиме реального времени и осуществляет прогнозное моделирование.

¹³⁰ Тихонова О.Б., Русяков Д.В., Ларина Л.В., Давыдов Я.С. Применение компьютерного моделирования ветроэнергетической установки. <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-kompyuternogo-modelirovaniya-vetroenergeticheskoy-ustanovki>.

¹³¹ Farid Khazaeli Moghadam, ARVIND KEPRATE, Zhen Gao. Online monitoring of wind power plants using digital twin models. https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.89bd61fe-67d98906-aeb0933c-74722d776562/https/www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2024.1531689/full

¹³² Марыковский Ю., Кларк Т., Депарлье Ж., Хази Э., Барбер С. Разработка цифрового двойника для аэродинамического мониторинга лопастей ротора ветряной турбины. https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.89bd61fe-67d98906-aeb0933c-74722d776562/https/www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2024.1428387/full

5. Цифровой комплекс моделирования энергосистем в реальном времени (КМРВ)¹³³ представляет собой программно-аппаратный комплекс, вычисления в котором в режиме реального времени распределяются между несколькими процессорными модулями, количество которых подбирается под тип модели энергосистемы. Основное достоинство КМРВ – это возможность включать реальные устройства в модель энергосистемы в условиях замкнутой петли взаимодействия по входным и выходным электрическим сигналам.

6. В системе SCADA регистрируются многие рабочие параметры ветровых турбин, такие как: скорость ветра, скорость вращения ротора ветра, мощность преобразователя со стороны генератора и мощность преобразователя со стороны сети¹³⁴. Система соединяет отдельные турбины, подстанции, метеорологические станции и другие системы с центральной станцией управления, чтобы операторы могли наблюдать за работой всех ветровых электростанций как единого целого. Фактически предлагается новое решение для получения фактической кривой мощности ветряных турбин, принимается ряд эффективных мер для работы с нулевыми и нулевыми значениями в исходных данных SCADA, рассматривается комплексный результат влияния ветра на мощность ветряной турбины и корректируется отклонение между измеренной скоростью ветра и реальной скоростью ветра. Важно отметить, в соответствии с характеристиками кривой мощности и фактическими условиями обслуживания ветровых электростанций можно дополнительно изучить стратегию эксплуатации и стратегию обслуживания ветровых турбин.

7. Перспективная разработка платформы управления электроэнергетическими объектами «цифровая подстанция», разработанная АО «Росатом Автоматизированные системы управления» (АО «РАСУ») будет внедрена в систему управления Кармалиновской ветроэлектростанции¹³⁵

¹³³ Мочалов Д.О., Законьшек Я.В., Шамис Н.А. Применение комплексов моделирования в реальном времени для современных энергосистем нефтегазовых предприятий. <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-kompleksov-modelirovaniya-v-realnom-vremeni-dlya-sovremennyh-energосistem-neftegazovyh-predpriyatiy>

¹³⁴ Dai Jushuan and others. Study on Obtaining Real Power Curve of Wind Turbines Using SCADA Data. <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2022.916355/full>

¹³⁵ Росатом» внедрит уникальную систему управления электроэнергией на Кармалиновской ВЭС. <https://ru-bezh.ru/press-releases/rosatom-vnedrit-unikalnuyu-sistemu-upravleniya-elektroenergiyey-n>

Ветроэнергетический дивизион «Росатома»). Таким образом, в ветроэнергетике впервые будет применена цифровая платформа, которая заменит большой массив оборудования. Решение обеспечит высокий уровень надежности и устойчивости системы, сократит эксплуатационные расходы и позволит перейти к концепции «безлюдного» обслуживания вторичных систем за счет управляемой деградации оборудования, обеспеченной безопасной технологией. После завершения опытно-промышленной эксплуатации предполагается тиражирование предложенного решения на всех строящихся ветроэлектростанциях, следуя стратегии внедрения передовых цифровых технологий.

8. Умная электросеть с цифровыми двойниками — это интеллектуальная цифровая подстанция и технологии семейства Smart Grid. Такие электросети являются главными компонентами энергетических комплексов будущего. Они надежнее и безопаснее обычных электросетей, более устойчивы к стрессам, реже отказывают. Технологии Smart Grid – сети электроснабжения с повышенной эффективностью, цифровые двойники части умной энергосети.

Все предложенные цифровые решения и многие другие, безусловно полезны для развития и совершенствования систем ветроэнергетики, однако, они более направлены на решение технических производственных проблем. Отраслевая экономика в таких моделях не рассматривается и не оценивается экономическая эффективность предприятия. Поэтому нужны иные цифровые сервисы для получения экономической составляющей деятельности предприятия. Пример таких цифровых решение приведен ниже.

С 2021 года в рамках модернизации энергетической инфраструктуры был реализован проект внедрения интегрированной системы хранения и обработки показателей, что упростило сбор и анализ информации.

В 2021 году реализован проект внедрения интегрированной системы хранения и обработки показателей верхнего уровня (ЦСОД АИИС КУЭ АО «Атомэнергопромсбыт»), что позволило потребителям перейти на централизованную унифицированную схему автоматического сбора, обработки, хранения, передачи и отображения в удобном для анализа виде данных

коммерческого и технического учета электрической энергии, а также обеспечивает техническую возможность развития и реализации проектов, направленных на снижение стоимости электрической энергии и мощности. Вышеописанную модель рекомендуется использовать совместно с комплексом инструментов DG/DM («Data Governance»/ «Data Management»), которые позволят сформировать механизм эффективного управления развитием энергетического предприятия.

Вышеописанную модель рекомендуется использовать совместно с комплексом инструментов DG/DM («Data Governance»/ «Data Management»), которые позволят сформировать механизм эффективного управления развитием энергетического предприятия.

Исследователи Мокшин М.Ю. и Путилов А.В. разработали универсальную комплексную модель информационного и алгоритмического мониторинга экономических показателей ветрогенерации для АО «Новавинд».

Оценка интенсивности использования мощности ВЭС и экономической эффективности ветрогенерации проводится в зависимости от климатических условий в регионах с использованием цифрового двойника (рис. 19), что позволяет ее широко применять в различных климатических зонах, а также с учетом эксплуатационных характеристик оборудования.

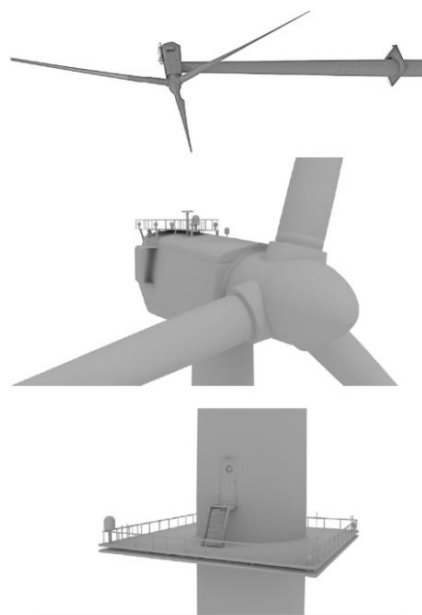


Рисунок 19. – Элементы «цифрового двойника»: 3D-модель ВЭС.

Источник: подготовлено автором.

Оценка интенсивности использования мощности ВЭС различных типов,¹³⁶ создаваемых АО «НоваВинд», проведена путем анализа 4 показателей:

1) коэффициента использования установленной мощности (КИУМ). КИУМ это процент от того, как часто и насколько полно ветровая установка (в МВт) реально работает по сравнению с её «максимумом» мощности. Чем выше этот процент, тем более эффективно вы используете установленную мощность. КИУМ рассчитывается как отношение фактической годовой выработки (Е) к произведению установленной мощности (М) и количества часов в году (8760), что отражает максимально возможный объём генерации при непрерывной работе оборудования на полной нагрузке:

$$\text{КИУМ} = E / (M \times 8760) \quad (10)$$

где:

Е — годовая фактическая выработка электроэнергии, кВт·ч;

М — установленная мощность генератора, кВт;

8760 — общее число часов в календарном году.

Таким образом, КИУМ позволяет количественно оценить степень загрузки ветроустановки и выявить факторы, влияющие на неполную реализацию установленной мощности.

2) LCOE - себестоимость выработки 1 МВт*ч энергии за весь срок работы электростанции. Включает в себя все затраты (строительство, эксплуатацию) и сравнивается с тарифом. Чем ниже LCOE, тем дешевле проект строительства электростанции.

3) процентная доходность проекта IRR — это «ставка», при которой сумма дисконтированных денежных потоков = 0. Если IRR > стоимость капитала, проект выгоден.

4) показатель NPV: сколько «чистых денег» проект даст сегодня, учитывая все будущие доходы и расходы. Если NPV > 0, проект прибыльный с учётом стоимости денег; если < 0, убыточный.

¹³⁶ Мокшин М.Ю., Путилов А.В. Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования. Энергетическая политика. [12 \(191\)](#) 2023, стр. 80-91. DOI: [10.46920/2409-5516_2023_12191_80](#)

Расчет значения индикатора интенсивности использования мощности (КИУМ) ВЭС является долей от возможного выпуска электроэнергии:

$$\text{КИУМ}_i = \mathcal{E}_i / 8760 N_{yi} \quad (11).$$

В выражении (1): $\mathcal{E}_i$ – годовая фактическая выработка электростанции i -го типа, млн кВт×ч; N_{yi} – установленная мощность электростанции i -го типа, ГВт.

Практические наблюдения динамики средних значений КИУМ по разным видам ВИЭ приведены табл.14.

Таблица 14. Значения КИУМ по разным видам ВИЭ-генерации

Источники энергии Годы	2019 ¹³⁷	2021 ¹³⁸	2022 ¹³⁹	2023 ¹⁴⁰	2024 ¹⁴¹
Гидроэнергетика	-	39	42,2	49,8	42,3
Атомная энергетика	-	90	-	-	-
Биомасса	-	60	-	-	-
Газ	-	67	-	-	-
Солнечная энергетика	22	21	14,7	14,4	15,8
Ветроэнергетика	35	35	31,1	31,1	31

Источник: Составлено автором.

Принимая во внимание значения КУИМ, наиболее эффективны ВЭС, расположенные в Ростовской области, Республике Калмыкия, Ставропольском крае, Ульяновской и Волгоградской областях РФ (рис.20).

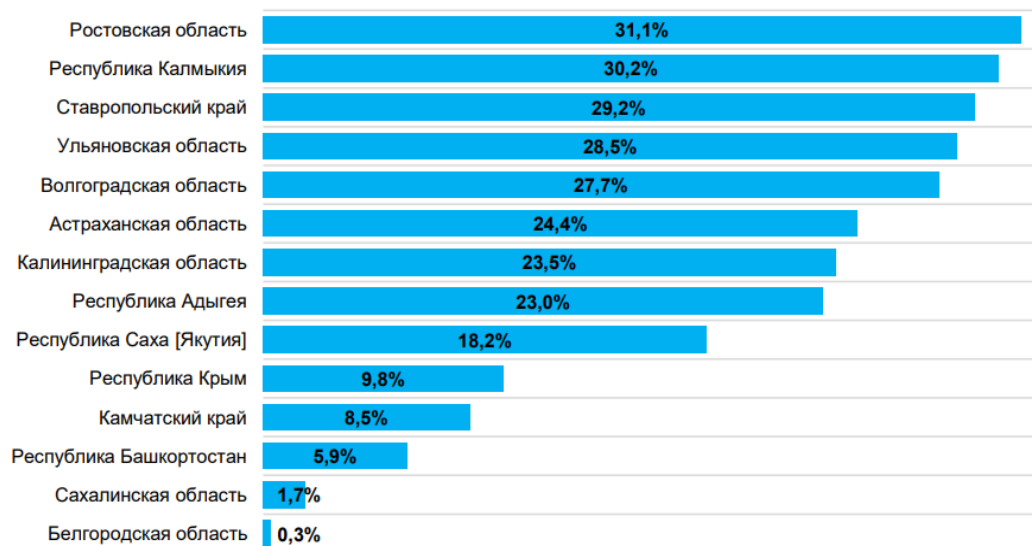
¹³⁷ Бушукина В. И. Особенности развития возобновляемой энергетики в мире и в России // Финансовый журнал. 2021. Т. 13. № 5. С. 93–107. <https://doi.org/10.31107/2075-1990-2021-5-93-107>

¹³⁸ Там же.

¹³⁹ Общая мощность объектов ВИЭ в России на 1 декабря 2022 г. составила 5,68 ГВт. <https://energyland.info/analytic-show-237562>

¹⁴⁰ РЫНОК ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ. Информационный бюллетень. Июль 2024. https://rreda.ru/upload/iblock/c86/ck53fh9u065blilscovlumxq02gqvkcx/202408_RREDA_annual_RES_report.pdf

¹⁴¹ Там же.



Источник: ФГБУ «РЭА» Минэнерго России

Рис.20. Рейтинг субъектов России по эффективности использования установленной мощности (КИУМ) ВЭС.

Источник: Возобновляемая энергетика в России и мире. Основные показатели работы электростанций ВИЭ на территории России. Минэнерго России.

<https://rosenergo.gov.ru/upload/iblock/e04/3xtm87iv99x76b23c6wjul3as5pzz8zj.pdf>

Структурный коэффициент использования мощности по типам электростанций определим в соответствии с формулой:

$$KC_{Ti} = \Delta \mathcal{E}_i / \Delta N_{yi} \quad (12).$$

В выражении (12): $\Delta \mathcal{E}_i$ – доля электростанции i -го типа в структуре выработки электроэнергии, %; ΔN_{yi} – доля электростанции i -го типа в структуре установленной мощности.

Расчёт доступной энергии ветра для ВЭС выполняется на основе зависимости, учитывающей плотность воздуха, скорость потока и диаметр турбинного колеса:

$$P = \eta \pi \rho V^3 D^2 / 8 \quad (13).$$

В формуле (3) введены следующие обозначения: ρ – плотность потока воздушных масс; η – коэффициент эффективности ветровой турбины; V – скорость воздушного потока, D – диаметр рабочего колеса турбины ВЭС. Примечательно, что роза ветров воздушного потока глобальным образом зависит от климатических условий и регионов при эксплуатации ВЭС.

В последние годы в мире и в России произошло значительное развитие ветроэнергетики: по состоянию на конец 2024 года на территории России установлено около 1200 ветроэлектростанций, в том числе шесть ветропарков в Ростовской области – лидере по развитию возобновляемых источников энергии. В Иссык - Кульской области Кыргызстана делаются первые попытки развития возобновляемых источников энергии, в том числе энергии ветра¹⁴².

В настоящее время ветроэнергетика России развивается, в стране есть регионы, которые особенно привлекательны для строительства ветропарков, благодаря высокой скорости ветра и иным климатическим условиям. Среди которых можно назвать Краснодарский край, Республику Калмыкия, Республику Адыгея, Кольский полуостров и остров Русский в Приморском крае. А некоторые регионы России, где высокие скорости ветра, в том числе на береговых линиях, имеют хороший потенциал для использования энергии ветра¹⁴³: Краснодарский край и Ростовскую область на юге России; Ленинградскую и Калининградскую области; Якутию на Дальнем Востоке России; Архангельскую область; Камчатский край на Дальнем Востоке России.

Ветроэнергетика Кыргызстана делает пока еще первые шаги в использовании мощности ветра для выработки электроэнергии. В стране используется всего 3 небольших ветроэнергостанции, но в содружестве с российским правительством и компанией «Росатом. Возобновляемая энергия» планируется строительство ветроэнергостанции мощностью 100 МВт в районе озера Иссык-Куль.

Объектами исследования послужили географические, климатические и социально-экономические условия Ростовской и Иссык-Кульской областей с целью определения целесообразности и эффективности размещения ВЭС.

Гипотеза заключается в предположении более благоприятного комплекса условий, сложившихся в Ростовской области для развития ветрогенерации и строительства ветропарков.

¹⁴² Мокшин М.Ю., Путилов А.В., Римская О.Н. Исследование методов и моделей прогнозирования мощности ветроэлектростанций.

¹⁴³ Ветроэнергетика в возобновляемой энергетике. <https://www.renwex.ru/ru/ii/vetroehnergetika/>

В целях исследования сравним социально экономические показатели Ростовской области и Исык-Кульской областей для перспективного развития ветроэнергетики. Расчеты показателей экономической эффективности проектов ВЭС для обоих регионов представлены в Приложении 2.

Ростовская область Российской Федерации

Донской регион в числе первых в России начал реализовывать проекты «зеленой энергетики». В рамках комплексного инвестиционного регионального рейтинга 2023 года в отрасли возобновляемых источников энергии (далее - ВИЭ) Ростовская область в третий раз стала лидером. Кроме того, первое место Ростовская область получила и в отдельной номинации «Самый индустриальный ВИЭ-регион».

В Ростовской области распространены 3 типа природных ландшафтов: степной, сухостепной и полупустынный, которые сменяют друг друга с запада на восток. Ростовская область – один из самых ветреных регионов России. Слабые ветры (4,0 м/сек) характерны для северной, центральной частей области и Манычской низменности, высокие (5 м/сек) – для юго-востока региона. Скорость ветра уменьшается от февраля к июню августу от 5,6 до 3,5 м/сек и увеличивается от сентября к февралю (5,6 м/сек).

В Стратегии социально-экономического развития Ростовской области на период до 2030 года¹⁴⁴ отмечен высокий потенциал для развития возобновляемых источников энергии: солнечной и ветровой энергии. Стартует реализация регионального плана адаптации к изменениям климата в Ростовской области¹⁴⁵ по основным направлениям, включающим топливно-энергетический комплекс, разрабатывается паспорт климатической безопасности региона. В рамках реализации Указа Президента Российской Федерации от 04.11.2020 № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» и Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до

¹⁴⁴ Стратегия социально-экономического развития Ростовской области на период до 2030 года Утверждена постановлением Правительства Ростовской области от 26.12.2018 № 864 в редакции постановления от 19.12.2022 № 1100 СПС «Консультант+»

¹⁴⁵ Распоряжение Правительства Ростовской области от 11.05.2022 № 285 «Об утверждении регионального плана адаптации к изменениям климата в Ростовской области». СПС «Консультант+»

2050 года¹⁴⁶ в области в полном объеме будет осуществлена работа по формированию нормативных, организационных и ресурсных условий для развития низкоуглеродной экономики. Запланировано обеспечение перехода крупнейших предприятий региона на наилучшие доступные экологические технологии, а также увеличение инвестиций в проекты устойчивого развития, в том числе в проекты «зеленой» экономики.

В разделе 4.3.2. «Инженерно-энергетическая инфраструктура Стратегии развития Ростовской области до 2030 года» приведены следующие данные (табл.15):

Таблица 15. Динамика состояния энергетической системы Ростовской области в 2014-2021 годы

Потребление электроэнергии в энергосистеме (млрд киловатт-часов)								
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Ростовская область	17,8	17,9	18,5	18,6	19,4	18,9	18,5	19,9
Доля энергии на базе возобновляемых источников энергии и распределенной электроэнергии от общей мощности потребленной энергии в Ростовской области, %								
Ростовская область	—	—	—	—	—	—	5,2	6,8

Энергосистема Ростовской области характеризуется профицитным электробалансом. В среднем суммарная выработка в регионе более чем в 2 раза превышает суммарное потребление, и этот разрыв продолжает увеличиваться в последние годы.

С 2018 года в Ростовской области реализованы крупные инвестиционные проекты от компаний ООО «УК «Ветроэнергетика», ООО «Энел Рус Винд Азов», АО «НоваВинд» по строительству ветряных электростанций.

За счет реализации энергосберегающих мероприятий обеспечивается планомерное снижение объемов тепловой энергии, потребленной государственными и муниципальными учреждениями Ростовской области,

¹⁴⁶ Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года (распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 № 3052-р) СПС «Консультант+»

выполняя федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности»¹⁴⁷.

Среди ключевых трендов Стратегии -2030¹⁴⁸ Ростовской области обозначены следующие мероприятия.

1. Расширение производства энергии на базе возобновляемых источников энергии. Наиболее распространенными технологиями на основе возобновляемых источников энергии к 2040 году окажутся: гидро- (1 731 ГВт), ветровая (1 130 ГВт) и солнечная энергетика, основанная на фотоэлектрическом преобразовании.

2. Ужесточение экологических требований к энергетике и проблемы, связанные с изменением климата.

В Стратегии Ростовской области до 2030 года обозначены индикаторы развития электроэнергетической отрасли (табл.16), где задан рост производства электроэнергии вместе с ее экономией потребителями.

Таблица 16. Динамика состояния электроэнергетической отрасли Ростовской области и прогноз развития до 2030 года

Раздел 4.2.3. Индикатор 2.			
Перспективная потребность в электроэнергии, млрд киловатт-часов			
Годы	2021	2024	2030
Показатели	19,85	20,71	20,91
Раздел 4.2.3. Индикатор 3.			
Объем тепловой энергии, потребленный учреждениями, тыс. гигакалорий			
Показатели	860 511,9	822 366,1	751 073,8

Источник: составлено автором.

В настоящее время в Ростовской области действует шесть ветропарков с суммарной мощностью 610 МВт. Инвестиционными компаниями рассматривается возможность продолжить реализацию проектов по строительству ветропарков. На территории области планируется строительство ветроэлектростанций мощностью

¹⁴⁷ Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 N 261-ФЗ (последняя редакция) 23 ноября 2009 года N 261-ФЗ

¹⁴⁸ Стратегия социально-экономического развития Ростовской области на период до 2030 года Утверждена постановлением Правительства Ростовской области от 26.12.2018 № 864 в редакции постановления от 19.12.2022 № 1100

до 750 МВт, уже работают заводы по производству башен для ветроэнергетических установок, модульных стальных башен и компонентов для ветропарков (гондолы, генераторы, ступицы)¹⁴⁹.

Таким образом, в Ростовской области задан сильный вектор развития ВИЭ, в том числе ветропарков, а все перечисленные документы и факты свидетельствуют о довольно большом потенциале для развития ветроэнергетики в регионе.

Иссык-Кульская область

Кыргызская республика расположена в северо-восточной части Центральной Азии, в самом центре материка Евразия. В Кыргызстане находится уникальное бессточное озеро Иссык-Куль, занимающее седьмое место в списке самых глубоких озёр мира. В Иссык-Кульской области бывает до 300 солнечных дней в году. Ландшафты Кыргызстана, как горной страны, чрезвычайно разнообразны. Горные системы Тянь-Шаня и Памира занимают три четверти территории государства, а также сдерживают ветра, что неблагоприятно для строительства ВЭС.

Таким образом, географические условия расположения страны не позволяет широко использовать энергию ветра для получения электроэнергии. Поэтому проекты ветроэнергетики широко не востребованы из-за низкой средней скорости воздушных потоков и высокой стоимости строительства ветроэнергоустановок.

В статистическом сборнике Иссык-Кульской области Кыргызстана¹⁵⁰ отдельно дана расшифровка по обеспечению региона электроэнергией, газом, паром и водой (табл.17).

¹⁴⁹ Ростовская область в третий раз стала лидером среди регионов по ветрогенерации. <https://www.donland.ru/news/24263/> дата обращения 12 октября 2023

¹⁵⁰ Национальный статистический комитет Кыргызской Республики. Иссык-Кульское областное управление статистики, 2022. Социально-экономическое положение Иссык-Кульской области за январь-декабрь 2022. Каракол, 2022. Стр.8 <https://stat.gov.kg/ru/statistika-issyk-kulskoj-oblasti/>

Таблица 17. Обеспечение Иссык-Кульской области электроэнергией, газом, паром и водой

	Произведено - всего		В процентах к соответствующему периоду предыдущего года	
	2021	2022	2021	2022
Тепловая энергия, тыс.Гкал	65,1	61,8	100,8	94,9
Услуги по распределению электроэнергии (без стоимости покупной электроэнергии), млн. сомов	1354,8	1467,6	104,2	108,3
Услуги по передаче электроэнергии, млн. сомов	275,3	157,7	106,8	57,3
Природная вода, тыс. м ³	12118,3	12497,3	109,1	103,1

Источник: Национальный статистический комитет Кыргызской Республики.

Иссык-Кульское областное управление статистики, 2022. Социально-экономическое положение Иссык-Кульской области за январь-декабрь 2022. Каракол, 2022.

Анализируя данные табл.3 видим, что показатели по распределению и передаче электроэнергии в 2022 году существенно упали по сравнению с 2021 годом, что отразилось на промышленности: в течение декабря 2022 года в промышленности полностью простаивало 23,4 % промышленных предприятий.¹⁵¹ Таким образом, обеспеченность электроэнергией в Иссык-Кульской области неравномерна, а в некоторые периоды даже наблюдается ее дефицит, что побуждает правительство республики и администрацию области к решению проблемы дефицита электроэнергии.

Использование ветровой энергии в республике предполагается путем строительства небольших ветроэнергетических установок малой мощности от 1 до 10 кВт для выработки электроэнергии и электроснабжения индивидуальных потребителей, расположенных в децентрализованных предгорных и отдаленных горных районах, там, где есть ветровой потенциал 10-12 м/сек (горные перевалы и ущелья). Наибольшее число дней с сильными ветрами - до 120 дней наблюдается лишь в районе города Балыкчы, а по другим местам колеблется до 40 дней. Средний

¹⁵¹ Там же.

срок окупаемости установки с мощностью 2 кВт, с потреблением 26 кВт в сутки, составляет 19 лет при существующих базовых тарифах за электроэнергию 2,16 сом¹⁵² (или 2,60 рублей по курсу на 25.11.2024). Для сравнения: в России тариф на традиционную электрическую энергию для населения во 2 полугодии 2024 года, проживающего в домах с газовой плитой, вырос на 8,9% или 60 копеек и равняется 7,33 руб. за кВт*ч.

Экономическая эффективность использования ветровой энергетики, помимо основной цели – снабжение электроэнергией, также обусловлена сокращением экологических рисков и повышением энергетической безопасности. В Таблице 18 представлены выборочные официальные статистические данные Ростовской и Исык-Кульской областей с целью выявления благоприятных факторов для развития ветроэнергетики.

Таблица 18. Выборочные социально - экономические показатели за 2022 год Ростовской и Исык-Кульской областей

Название региона	S Территории, тыс. км	Численность населения на 1 января 2023 г., тыс. человек	Валовой региональный продукт в 2022 г. млрд руб.	Средняя заработная плата от заработной платы в регионе, тыс. руб.	Средняя заработная плата в сфере обеспечения электроэнергией, газом, паром и кондиционированным воздухом, тыс. руб.	Индекс производства по виду деятельности «Обеспечение электроэнергией газом и паром; кондиционирование воздуха» по итогам 2022 по сравнению с 2021 ¹⁵³ , %	Инфляция за год, %
1	2	3	4	5	6	7	8
Ростовская	101,0	4 164,5	2325,8	44,8	54,5	107,9	7,4

¹⁵² Анализ и оценка технологий использования возобновляемых источников энергии в Кыргызстане и их вклад в смягчение последствий изменения климата. Июнь 2022. Аналитический документ. Бишкек, 2022 г., 47 стр.

¹⁵³ Итоги социально-экономического развития Ростовской области за 2022 год. <https://www.donland.ru/result-report/1699/>

область 154							
----------------	--	--	--	--	--	--	--

¹⁵⁴ Регионы России. Социально-экономические показатели 2023 статистический сборник под ред. С.Н. Егоренко .Росстат. Москва 2023 https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2023.pdf

Продолжение таблицы 18.

1	2	3	4	5	6	7	8
Иссык-Кульская область ¹⁵⁵	43,7*	0,54	0,8	18,1	27,0	57,3	15
Отношение	2,3	7712,0	2907,3	2,5	2,0	1,9	0,5

Источник: составлено автором.

Перерасчет данных по Иссык-Кульской области выполнен по курсу валют на 25 ноября 2024, когда 1 киргизский сом = 1,20 рубля.

Анализ географических условий и ландшафта анализируемых областей позволяет сделать вывод что наиболее благоприятные условия для развития ветроэнергетики существуют в Ростовской области: мощность и постоянство ветра, равнинность территории, размер территории и количество населения.

Социально-экономические характеристики Ростовской области по некоторым позициям кратно, превышают показатели Иссык-Кульской области. Замечена интересная деталь в размере средней заработной платы в регионах, в том числе в размере оплаты труда в области электроэнергетики – она в обоих случаях в 2 раза выше средней в исследуемых регионах, что демонстрирует важность отрасли для региональной промышленности. Стоит обратить внимание на тревожащий размер годовой инфляции, которая в Иссык-Кульской области была в 2 раза выше на дату проведения исследования.

Для бесперебойного обеспечения электроэнергией промышленность и население республики, Минэнерго Кыргызстана и Росатом разработали перспективные планы по реализации ветроэнергетических проектов с выработкой электроэнергии до 500 МВт¹⁵⁶. Совместно с компанией «Росатом. Возобновляемая энергия» в 2024 году была построена ветряная электростанция в Иссык-Кульской области Кыргызстана мощностью 100 МВт, с выработкой электроэнергии на уровне 290 млн кВт*ч.

¹⁵⁵ Национальный статистический комитет Кыргызской Республики. Иссык-Кульское областное управление статистики, 2022. Социально-экономическое положение Иссык-Кульской области за январь-декабрь 2022. Каракол, 2022. <https://stat.gov.kg/ru/statistika-issyk-kulskoj-oblasti/>

¹⁵⁶ В Киргизии началось строительство ветряной электростанции Росатома мощностью 100 МВт. <https://neftegaz.ru/news/Alternative-energy/854850-v-kirgizii-nachalos-stroitelstvo-vetryanoy-elektrostantsii-rosatoma-moshchnostyu-100-mvt/>

В таблице 19 представлены усредненные скорости ветра по регионам, влияющие на генерацию электроэнергии.

Выполненный автором анализ показал, что Ростовская область обладает более благоприятными ветровыми условиями, что повышает потенциал выработки электроэнергии. Результаты спектрального анализа позволяют экономически адаптировать режим работы ВЭС к сезонным пикам нагрузки.

Таблица 19. Усредненные скорости ветра по сезонам по Ростовской и Иссык-Кульской области

Параметр	Ростовская область	Иссык-Кульская область
Средняя скорость ветра, м/с	7,5	6,3
Зимний пик, м/с	8,5	7,2
Сезонное колебание, %	+ _20%	+ _15%
Основное направление	SSE	WNW

Источник: составлено автором.

Спектральный состав скоростей ветра (м/с) реальных воздушных потоков для ВЭС «НоваВинд» на территории Ростовской и Иссык-Кульской областей выполнен с помощью вейвлет-анализа. Вейвлет – коэффициенты разложения поля скоростей воздушного потока по базисным функциям определены интегральной сверткой:

$$W(a, b) = \frac{1}{a^k} \int_{-\infty}^{+\infty} V(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (14).$$

На рис. 21 отражены применение вейвлет-преобразования для выявления скрытых закономерностей изменений скорости ветра и их влияния на КИУМ ВЭС.

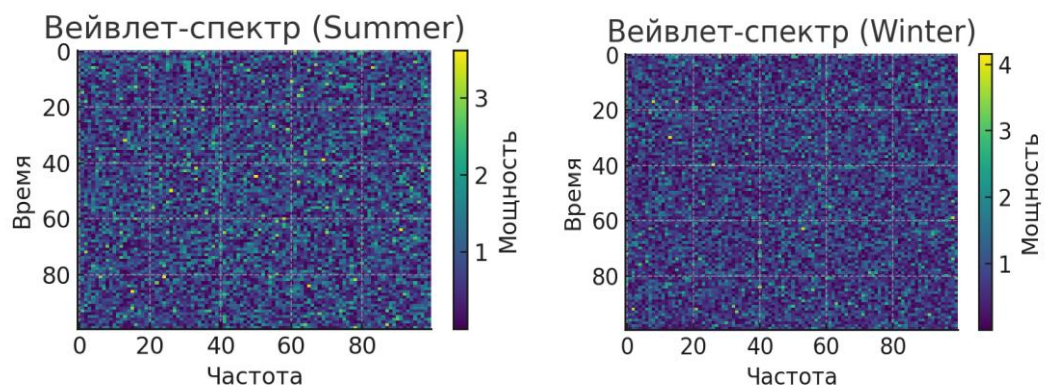


Рисунок 21. – Вейвлет – спектры лето-зима для выявления закономерностей скорости ветра.

Источник: составлено автором.

С помощью вейвлет-анализа выявлены скрытые закономерности ветровой активности: определены периоды высокой ветровой нагрузки (январь-март) и снижения скорости ветра (июль-сентябрь). Показано, что зимние пики скорости ветра обеспечивают до 30% годовой выработки электроэнергии. Результаты спектрального анализа позволяют экономически адаптировать режим работы ВЭС к сезонным пикам нагрузки.

В интегральной свёртке (4): $a, b, k, t, \psi, V(t)$ – масштаб, сдвиг, степень масштаба, время, материнский вейвлет, флуктуации поля скорости воздушного потока, соответственно (табл. 20, 21).

Таблица 20. Роза ветров в Ростовской области в декабре 2022 года

Направление		Частота
↓	Северный	1.2%
↙	Северо-восточный	2.4%
←	Восточный	46.6%
↖	Юго-восточный	15.8%
↑	Южный	14.6%
↗	Юго-западный	7.7%
→	Западный	6.5%
↘	Северо-западный	5.3%

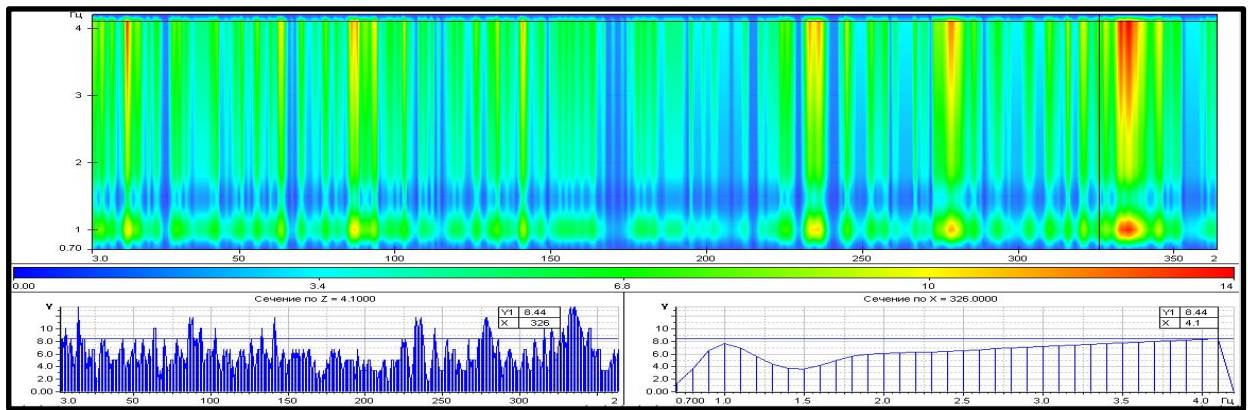
Таблица 21. Роза ветров в Иссык-Кульской области в декабре 2022 года

↓	Северный	11.6%
↙	Северо-восточный	21.8%
←	Восточный	17.8%
↖	Юго-восточный	10.2%
↑	Южный	8%
↗	Юго-западный	14.2%
→	Западный	11.6%
↘	Северо-западный	4.9%

Источник: составлено автором.

Розы ветров для Ростовской и Иссык-Кульской областей за период 2022 года приведены в таблицах 5 и 6, вейвлет-спектры поля скорости воздушных потоков – на рис.22.А и рис.22.Б, соответственно.

А.



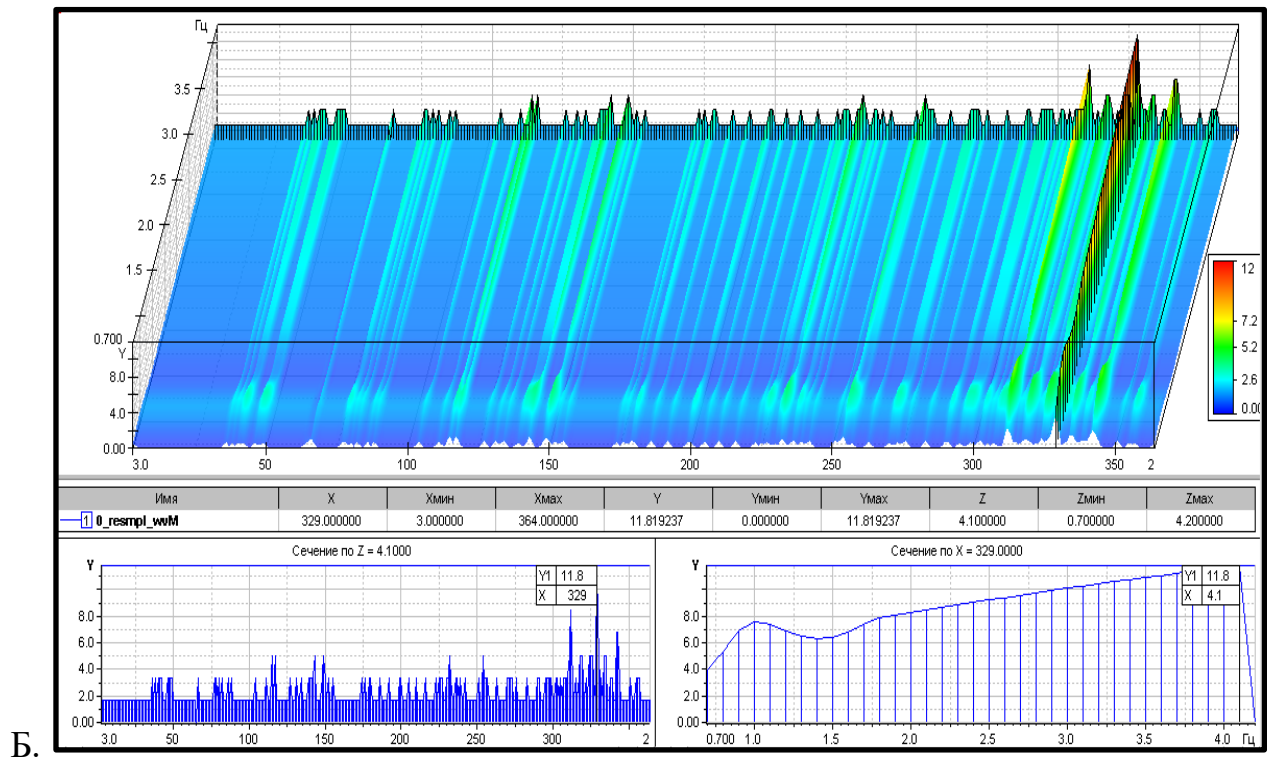


Рисунок 22. – Вейвлет-спектр поля скорости воздушных потоков за 2022 год: А. Ростовская область; Б. Иссык-Кульская область

Источник: составлено автором.

В таблице 22 представлены данные сезонных колебаний скорости ветра в зависимости от сезонов.

Таблица 22. Зависимость скорости ветра от сезона

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

Источник: составлено автором.

Полученные результаты имитационного моделирования показали:

- в зимние месяцы при средней скорости ветра 7,5 м/с КИУМ достигает 35%, а годовая выработка энергии составляет около 3100 МВт·ч.

- летние скорости ветра в среднем 5,2 м/с обеспечивают КИУМ около 25%, что приводит к снижению выработки до 2200 кВт·ч.

Представленные данные скоростей ветра по каждому сезону позволяют оптимизировать показатели работы ВЭС (КИУМ, выработка электроэнергии) и оценить влияние ветрового режима на экономическую эффективность ВИЭ.

Посредством имитационного моделирования влияния климатических условий на работу ВЭС была установлена зависимость (табл.23):

- при температуре ниже -10°C производительность ВЭС снижается на 8%;
- при влажности выше 80% — на 5%;
- при пониженном давлении (менее 720 мм рт.ст.) — на 3%.

Таблица 23. Зависимость силы ветра от температуры

Климатический фактор	Условие	Корректирующий коэффициент
Температура	$T < -10^{\circ}\text{C}$	-8 %
Влажность	$H > 80 \%$	-5 %
Давление	$P < 720 \text{ мм рт. ст.}$	-3 %

Источник: составлено автором.

Был получен вывод и рассчитаны корректирующие коэффициенты, которые необходимо включать в экономическую модель оценки эффективности ВЭС.

С целью оптимизации режимы работы ВЭС с учётом сезонных изменений для максимизации экономических показателей ВИЭ необходимо оптимизировать режимы работы ВЭС с учётом сезонных изменений.

Был получен вывод и рассчитаны корректирующие коэффициенты, которые необходимо включать в экономическую модель оценки эффективности ВЭС.

Автором был просчитан алгоритм оптимизации работы ВЭС в зависимости от сезонных изменений скорости ветра и температуры. График зависимости приведен на рис. 23. Метод динамического программирования позволяет добиться значительного прироста выработки электроэнергии и повышения эффективности работы ВЭС.

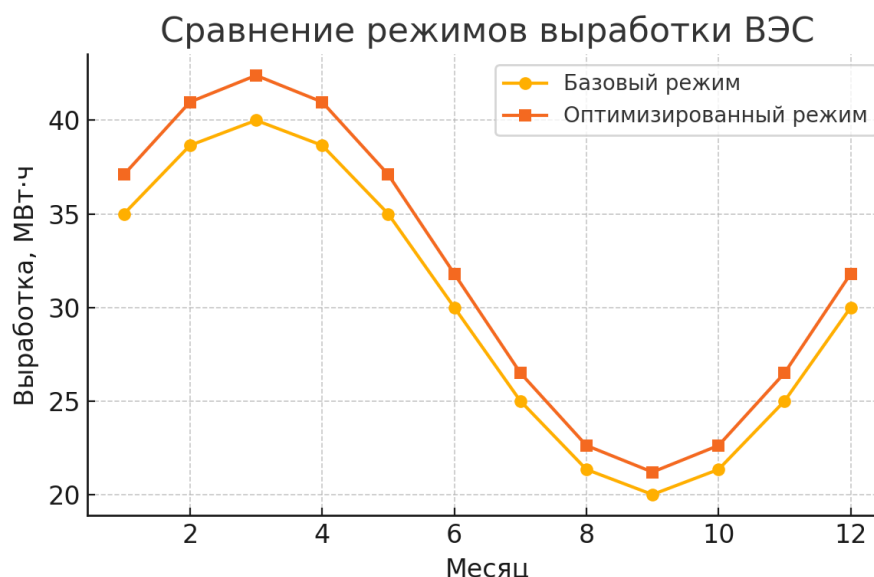


Рисунок 23. – Сравнение режимов выработки по месяцам года.

Источник: составлено автором.

Построение сценариев эксплуатации ВЭС при различных сценариях изменения ветровой активности и расчет их экономического эффекта позволил получить результаты и адаптивного сценариев работы энергоблоков ВЭС:

- в базовом сценарии КИУМ составляет 28% (2600 МВт·ч в год), в адаптивном — 31% (2900 МВт·ч в год), что обеспечивает рост выработки на 11,5%;

На основе сезонного анализа ветровой активности в Ростовской и Иссук-Кульской областях установлено:

1. В зимний период (декабрь–март) скорость ветра увеличивается на 15–20% относительно среднегодового.
2. В летние месяцы скорость ветра снижается на 10–15%.
3. Рекомендуемый режим: Зимой — работа на полной мощности, максимальная загрузка ВЭУ. Летом — частичное ограничение мощности для сохранения оптимального КИУМ и предотвращения перегрузок.
4. Экономический эффект заключается:
 - в применении сезонных режимов, которые увеличивает среднегодовую выработку на 4–6%.

- повышение коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) на 2–3 процентных пункта.

С целью оценки эффективности адаптивного режима работы ВЭС для снижения рисков при нестабильном ветре автором выполнено построение сценариев эксплуатации ВЭС при различных сценариях изменения ветровой активности и расчет их экономического эффекта (табл.24, 25).

Таблица 24. – Сценарии работы энергоблоков ВЭС

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

Источник: составлено автором.

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.

Автор разработал базовый и адаптивный сценарии работы энергоблоков: в базовом сценарии КИУМ составляет 28% (2600 МВт·ч в год), в адаптивном — 31% (2900 МВт·ч в год), что обеспечивает рост выработки на 11,5%.

На основе сезонного анализа ветровой активности в Ростовской и Иссук-Кульской областях установлено:

1. В зимний период (декабрь–март) скорость ветра увеличивается на 15–20% относительно среднегодового.
2. В летние месяцы скорость ветра снижается на 10–15%.
3. Рекомендуемый режим: зимой — работа на полной мощности, максимальная загрузка ВЭУ. Летом — частичное ограничение мощности для сохранения оптимального КИУМ и предотвращения перегрузок.

4. Экономический эффект (приложение 2):

- Применение сезонных режимов увеличивает среднегодовую выработку на 4–6%.
- Повышение коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) на 2–3 процентных пунктов.

Таким образом, увеличение выработки на 11,5 % дает прирост NPV проектов создания ВИЭ на 12 %;

- адаптивный сценарий динамически оптимизирует работу и позволяет получить до 11,5 % дополнительной экономической эффективности проектов создания установок ВИЭ;
- сезонное управление мощностью ВЭУ повышает выработку, КИУМ и рентабельность проектов ВИЭ.

Для количественной оценки выгод от внедрения ВЭУ в локальной энергосистеме автором предложена расчетная модель на основе показателей удельной генерации и замещения дефицита электроэнергии:¹⁵⁷

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

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; $I_{\text{ЭК}}$ – издержки эксплуатации, руб.

Результаты численных расчетов представлены в сводной таблице 26.

¹⁵⁷ Мокшин М.Ю., Путилов А.В. Исследование методов и моделей прогнозирования мощности ветроэлектростанций. DOI 10.46920/2409-5516_2023_12191_80. <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-vetroenergetiki-pri-proektirovanii-s-ispolzovaniem-algoritmicheskogo-modelirovaniya>

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: составлено автором.

Результаты спектрального анализа позволяют адаптировать режим работы ВЭС к сезонным пикам нагрузки.

На основании полученных расчетов, а также результатов спектральной обработки мониторинга поля скорости воздушных потоков для рассмотренных регионов авторами статьи предложены следующие рекомендации:

- в целях достижения максимальной прибыли оптимизировать интенсивности использования мощности ВЭС АО «НоваВинд» в зимний период, когда скорость воздушных потоков максимальна, ввести в эксплуатацию парк ВЭУ на территории Ростовской области с максимальным диаметром рабочего колеса турбины, увеличивая их энергопотенциал, но с учетом характерной теплофикационной электрической мощности, вырабатываемой турбоагрегатами ТЭЦ;

- на территории Иссык-Кульской области необходимо ввести в эксплуатацию ВЭС, которые позволяют развивать номинальную мощность при относительно невысоких скоростях воздушных потоков.

Следовательно, проект создания ВЭС в Ростовской области обеспечивает стабильную базу генерации электроэнергии, а проект в Иссык-Кульской области

нуждается в специальных решениях для уменьшения зимнего дефицита мощности ветра. В целом, ВИЭ-проекты могут покрыть значимую долю экономического спроса на производство электроэнергии, что особенно критично в зимний период для Исык-Куля.

Автором предложена структура универсальной комплексной модели информационного и алгоритмического обеспечений мониторинга ключевых экономических показателей структурного подразделения Росатом АО «Новавинд», которая может быть транслирована на аналогичные предприятия отрасли. В рамках корпоративной платформы управления данными авторами предлагается эффективно использовать описанную модель совместно с комплексом инструментов DG/DM («Data Governance» / «Data Management»).

Необходимо рассмотреть технически и экономически важный момент – интеграцию объемов переменчивых ВИЭ в общую энергетическую сеть. Проведенное исследование показало, что нынешний уровень гибкости энергетических систем технически позволяет интегрировать с годовой долей переменчивой генерации в 25-40%. Следуя выводам исследования, «в очень гибких системах» доля ВИЭ может превысить 50% уровень, если допускается возможность вынужденных остановок «небольших объемов» генерации на основе возобновляемых источников». ¹⁵⁸

Интеграция больших объемов ВИЭ требует трансформации энергосистемы в целом. Данный факт позволяет широко внедрять станции на ВИЭ-источниках и включать их в энергетическую сеть, что способствует развитию зеленой энергетики. Системные издержки, связанные с трансформацией сети, могут зависеть от разных обстоятельств и могут быть высокими (при единовременном включении в сеть новой ВЭС), и с нулевым значением или даже отрицательным ростом расходов при постепенном внедрении в сеть новых энергообъектов. Системные издержки также отражаются на себестоимости производимой единицы электроэнергии.

¹⁵⁸ Сидорович В. Интеграция ВИЭ в энергосистему: практика, мифы и легенды. <https://renen.ru/integration-of-res-into-the-energy-system-practice-myths-and-legends/>

В исследовании был применен вейвлет-преобразование для анализа данных в регионах с целью выявления скрытых закономерностей изменений скорости ветра и их влияния на КИУМ ВЭС. С помощью вейвлет-анализа выявлены скрытые закономерности ветровой активности: определены периоды высокой ветровой нагрузки (январь-март) и снижения скорости ветра (июль-сентябрь). Показано, что зимние пики скорости ветра обеспечивают до 30% годовой выработки электроэнергии.

Применение цифровых инструментов в энергетических компаниях способствует не только устойчивому развитию сектора, но и расширению технологического присутствия России на международной арене

Следовательно, цифровые модели позволяют сократить затраты на оборудование и инфраструктуру, улучшить показатели производительности предприятия и предсказать сценарии работы системы при изменяющихся внешних условиях. Цифровые двойники ускоряют цифровую трансформацию электроэнергетики и дают возможность перевода электроэнергетической системы на новую технологическую платформу интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. При принятии решений об инвестировании, изменений объемов производства, вывода новых продуктов или услуг цифровые технологии будут эффективны благодаря возможности минимизировать риски и принять оптимальное решение в работе предприятия.

2.3. Оптимизация работы ВЭС на основе алгоритмического анализа

Создание эффективных технологий по использованию неисчерпаемых и экологически чистых ресурсов, а также достижению нулевого баланса выбросов в 21 веке служит приоритетом при исследованиях возобновляемой энергетики. Особую важность приобретает и экономическая сторона вопроса, а именно – эффективность работы ВЭС и стоимость производимой единицы энергии. Для национальной хозяйственной системы роль экономики энергетической отрасли одна из важнейших, так как на продуктах этой отрасли базируются все производственные процессы в промышленности.

В настоящее время важнейшую роль в определении перспектив развития энергетики в России играет экономический фактор, а основным показателем эффективности ВЭС служит себестоимость производимой электроэнергии. По последним данным Росстата за 2024 год динамика средних цен 1 МВт электроэнергии¹⁵⁹ без указания источников генерации энергии для производителя и потребителя приведена в табл. 27, 28 и на рис.24.

Таблица 27. Средние цены производителей на отдельные виды промышленных товаров (на конец года; рублей за единицу измерения)

	2020	2021	2022	2023
Электроэнергия, отпущенная различным категориям потребителей, за тыс. кВт·ч	3 924	4 041	4 243	4 572

Источник: Росстат. Цены в России. 2024. Официальное издание.

Таблица 28. Средние цены производителей и приобретения на отдельные виды товаров

	Средние цены производителей				Средние цены приобретения			
	2020	2021	2022	2023	2020	2021	2022	2023
Электроэнергия за 1 МВт ч	1 027	1 154	1 211	1 323	2 661	2 867	3 207	3 232

Источник: Росстат. Цены в России. 2024. Официальное издание.

¹⁵⁹ Росстат. Цены в России. 2024. Официальное издание. http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Cena_2024.pdf. Стр.109-110.

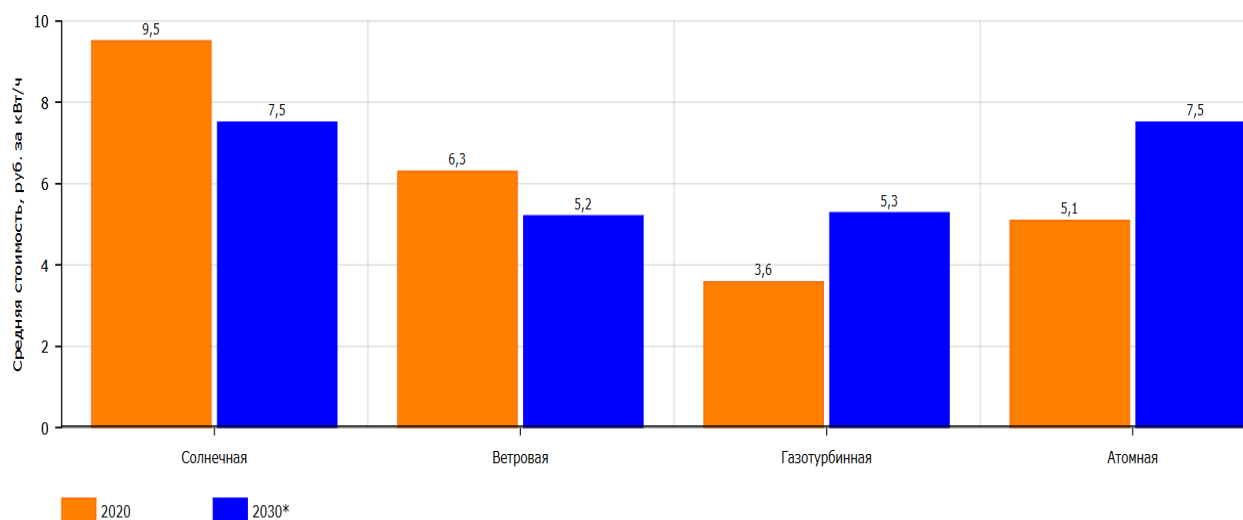


Рисунок 24. – Себестоимость производимой электроэнергии

Источник: Средняя стоимость электроэнергии в России, по типам энергоустановок.
<https://topic.ru/statistics/energy/energy/srednyaya-stoimost-elektroenergii-v-rossii-po-tipam-energoustanovok/>

Основной показатель эффективности работы ВЭС — стоимость единицы произведённой энергии при производстве энергии на основе ископаемых энергоносителей и при использовании ВИЭ. Существуют различные оценки, но в любом случае это интегральный показатель. В каждом конкретном случае он состоит из набора показателей, которыми могут выступать следующие:

1. Инвестиционные затраты (инвестиции, капиталовложения) — на строительство объекта. Основная часть инвестиционных затрат, как правило, приходится на оборудование, строительство зданий и сооружений, приобретение земельного участка, создание инфраструктуры.

2. Операционные затраты (эксплуатационные затраты, текущие затраты) — связанные уже непосредственно с выпуском продукции — в нашем случае, с выработкой электроэнергии на уже построенной электростанции. Это затраты на сырьё, материалы и комплектующие для производства продукции, оплату труда персонала, разного рода сопутствующие затраты и платежи.

В свою очередь, операционные затраты разбиваются на следующие группы:

- 2.1. Постоянные затраты, не зависящие от объёмов производства продукта, которые необходимо нести даже при отсутствии производства продукта.

2.2. Переменные затраты, зависящие от объёмов производства продукта, увеличивающиеся с ростом объёмов производства и уменьшающиеся при их снижении.

В структуру постоянных затрат обычно входит существенная часть затрат на оплату труда управленческого персонала, обслуживание оборудования, охрану и обеспечение безопасности предприятия. В структуру переменных затрат входят, прежде всего, сырьё, материалы и комплектующие для производства продукции, значительная часть затрат на оплату труда основного производственного персонала. Основное и достаточно очевидное различие в структуре затрат между станциями на ископаемом сырьё и на ВИЭ в том, что в первом случае переменные затраты будут высоки, во втором — практически отсутствовать.

Существенную долю затрат при работе станций на ископаемом сырьё составляет исходный энергоноситель — газ, нефть, уголь, ядерное топливо. Его стоимость может составлять до 80 % и выше от всех операционных затрат предприятия, при этом резко меняться в зависимости от конъюнктуры цен на энергоносители. В случае с возобновляемыми источниками энергии (за исключением станций, работающих на биоресурсах) исходное сырьё — воздух (ветер), солнечная энергия, текущая вода или приливные волны, геотермальная энергия и т.д., можно считать бесплатным или «условно бесплатным».

Именно в этом на данный момент состоит главное экономическое преимущество ВИЭ, позволяющее говорить об их большей экономической эффективности в долгосрочном периоде.

В то же время, есть и недостатки, обусловленные прежде всего самой природой энергоносителя — низкопотенциального (с низкой плотностью энергии, приходящейся на единицу площади) и недостаточно стабильного. Режим солнечного освещения резко меняется в течение суток и сезонов, изменения скорости ветра может быть просто непредсказуемой, и даже изменения речного стока могут быть резкими и не всегда прогнозируемыми.

По данным на конец 2022 года на рис.25 приведена средняя стоимость производства электроэнергии из ВИЭ – источников¹⁶⁰, цент/кВт*час.

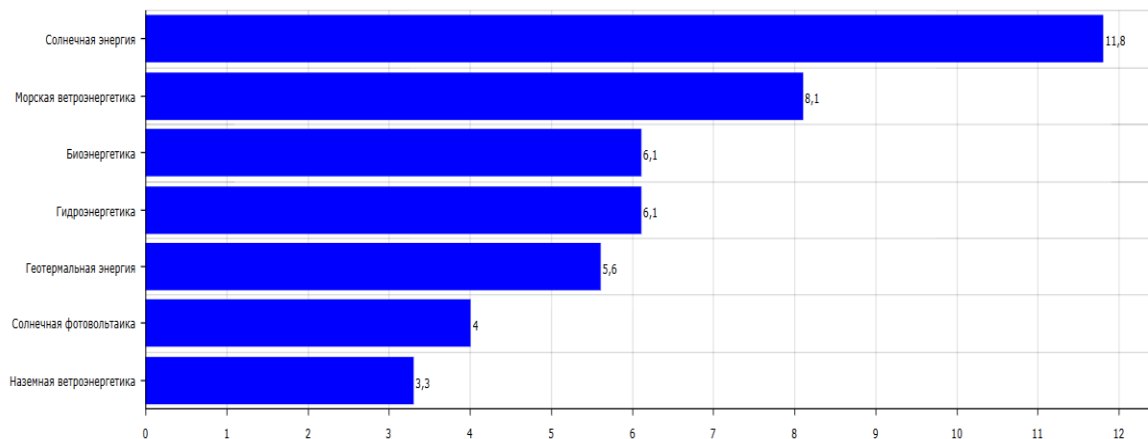


Рисунок 25. – Средняя стоимость производства электроэнергии из возобновляемых источников, по видам.

Источник: <https://topic.ru/statistics/energy/energy/srednyaya-stoimost-proizvodstva-elektroenergii-iz-vozobnovlyaemykh-istochnikov-po-vidam/>

Среди различных источников возобновляемой генерации электроэнергии концентрированная солнечная энергия и морская ветряная энергия были самыми дорогими в 2022 году, их средняя стоимость составляла 11,8 и 8,1 цента за киловатт-час, соответственно. В отличие от них, производство электроэнергии с помощью наземной ветряной энергии обходилось в среднем в 3,3 цента \$ или примерно 3, 0 рубля за киловатт/час в 2022 году.

Прогноз снижения себестоимости энергии, полученной от различных ВИЭ-источников представлен на рис.26.

¹⁶⁰ Дегтярев К.С. Залиханов А.М., Соловьев А.А., Соловьев Д.А. К вопросу об экономике возобновляемых источников энергии. энергия: экономика, техника, экология. № 10, 2016. Стр.10-20.

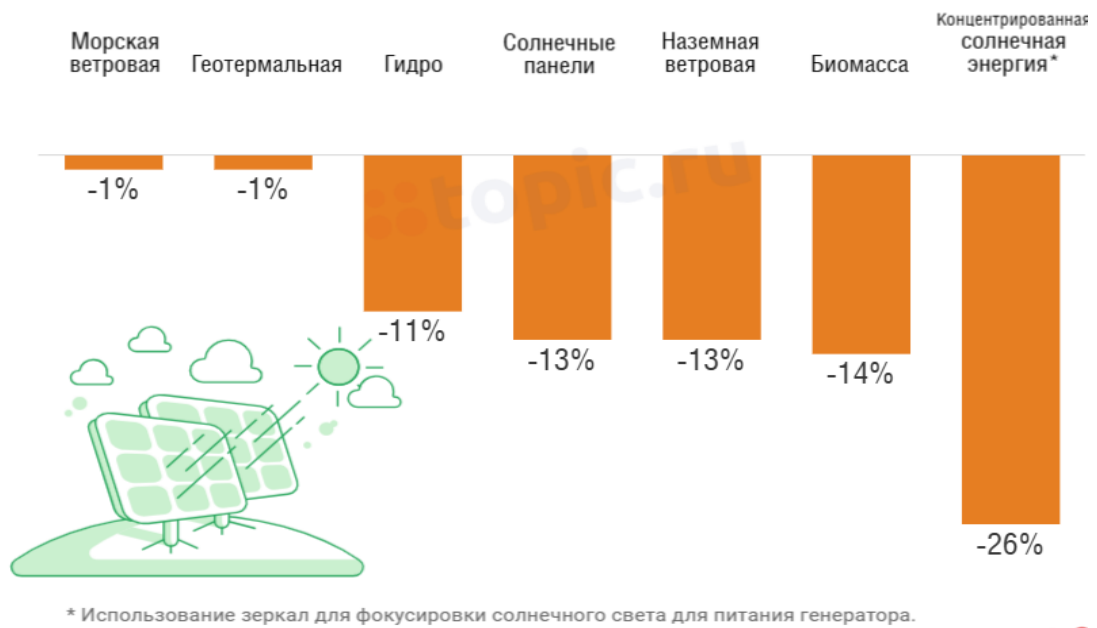


Рисунок 26. – Прогноз снижения себестоимости энергии.

Источник: <https://infographika.ru/technologies/energy/stoimost-vozobnovlyaemoy-energii-bystro-snizhaetsya/>

Согласно выполненным расчётам, себестоимость электроэнергии, получаемой традиционным сжиганием на новых тепловых и атомных электростанциях или реконструируемых существующих, имеет сроки окупаемости, превышающие сроки службы основного их технологического оборудования или вовсе не имеет сроков окупаемости.

Поэтому в последние годы сооружение или реконструкция электростанций с приемлемой окупаемостью оказываются возможными только при наличии поддержки из государственного бюджета, осуществляемого по договорам предоставления мощности (ДПМ).

Следовательно, развитие возобновляемой энергетики ставит ряд задач, связанных с оценкой экономической эффективности работы ВЭС и обоснованием ее оптимальных эксплуатационных параметров.

Очевидно, что расчет и анализ производительности ветроэнергетических установок¹⁶¹ (ВЭУ) являются ключевыми этапами при изучении эффективности и оптимизации работы ВЭС. Эффективность работы ветроэлектростанций оценивается с помощью различных методик и показателей и зависит от многих факторов¹⁶²:

- Скорость и стабильность ветра. Чем быстрее дует ветер, тем больше энергии генерируется. Важно учитывать сезон года, так как скорость ветра на разных территориях различается в зависимости от времени года.
- Плотность и температура воздуха влияют на массовый расход воздуха через турбину и выходную мощность.
- Высота установки - более высокие башни турбин способны улавливать больше энергии ветра, поскольку ветер усиливается с увеличением высоты мачты.
- Диаметр вращающихся лопастей - чем больше диаметр ротора, тем больше энергии ветра захватывают лопасти и тем продуктивнее генерация электроэнергии.
- Схема расположения турбин в ветропарке.
- Надежность турбин и регулярное техническое обслуживание ветропарков.

Среди методов оценки эффективности работы ВЭС перечислим наиболее распространенные на практике:

- Анализ данных о скорости и направлении ветра. В этой методике рассчитывают среднюю скорость ветра и его изменения в течение суток, месяца или года и определяют максимальную и минимальную скорости.¹⁶³

¹⁶¹ Ветроэнергетическая установка (ВЭУ) или ветрогенератор - устройство для преобразования кинетической энергии ветра в электрическую. ВЭУ объединенные в единую сеть представляют собой ветроэлектростанцию (ВЭС). Источник: <https://neftegaz.ru/tech-library/elektrostantsii/141961-vetroenergeticheskaya-ustanovka-veu/>

¹⁶² 7 факторов, влияющих на эффективность ветряных турбин. <https://reads.alibaba.com/ru/7-factors-that-impact-wind-turbine-efficiency/>

¹⁶³ ГОСТР 54418.12.3 2012. Возобновляемая энергетика Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 12-3 Методы испытаний для определения количества вырабатываемой электроэнергии. Москва, 2014. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293775/4293775405.pdf>

– Использование алгоритмов оптимального контроля, которые позволяют адаптировать работу установок к изменяющимся условиям ветра, например, менять угол атаки лопастей или регулировать скорость вращения ротора¹⁶⁴.

– Системы мониторинга и диагностики помогают своевременно выявлять неисправности и оперативно их устранять, повышая, таким образом, надёжность работы ветроустановок.¹⁶⁵

Рассмотрим основные эксплуатационные характеристики, оказывающие приоритетное влияние на производительность работы ВЭС.

1. Одним из основных показателей производительности ВЭС является мощность ветроэнергетической установки¹⁶⁶. Расчет мощности включает анализ скорости ветра, который осуществляется с использованием специальных метеорологических данных и моделей. Зная скорость ветра, можно определить потенциальную энергию, которую может извлечь установка. Согласно ГОСТ Р 51237–98¹⁶⁷ все ВЭУ классифицируются на 4 класса мощности. В реальных условиях производительность ВЭС сильно варьируется из-за таких факторов, как изменение скорости ветра, турбулентность и рельеф местности. Поэтому важно учитывать коэффициент использования, который отражает реальную производительность ветроустановки.

2. Вторым важным показателем эффективности служит фактор наполнения, который указывает на то, насколько эффективно установка использует доступную энергию ветра. Фактор наполнения зависит от конструкции и технических характеристик установки. Чем выше фактор наполнения, тем более эффективно установка работает.

3. Технически важным моментом в эксплуатации ВЭС является сбор актуальных данных о каждом ветрогенераторе. Задача решается при использовании

¹⁶⁴ Способы повышения эффективности работы ветроэнергетических установок. [Способы повышения эффективности работы ветроэнергетических установок](https://electricalschool.info). electricalschool.info

¹⁶⁵ Там же.

¹⁶⁶ Шепелев, А. О. Классификация современных ветроэнергетических установок по мощности / А. О. Шепелев, Е. Ю. Артамонова. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2016. — № 17 (121). — С. 92-96. — URL: <https://moluch.ru/archive/121/33503/> (дата обращения: 09.04.2025).

¹⁶⁷ ГОСТ Р 51237-98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. Статус: Действует Дата введения в действие: 01.07.1999. Заглавие на английском языке Nontraditional power engineering. Wind power engineering. Terms and definitions. Дата введения в действие 01.07.1999. <https://en.gostinfo.ru/catalog>

сетей датчиков, связанных между собой и с центром управления. Ветрогенераторы используют множество датчиков, объединенных в единую сеть ветропарка и являются демонстрацией эффективности использования промышленного Интернета вещей (IoT) и нейронных сетей.

Рассмотрим основные эксплуатационные характеристики, оказывающие приоритетное влияние на производительность работы ВЭС.

1. Одним из основных показателей производительности ВЭС является мощность ветроэнергетической установки¹⁶⁸. Расчет мощности включает анализ скорости ветра, который осуществляется с использованием специальных метеорологических данных и моделей. Зная скорость ветра, можно определить потенциальную энергию, которую может извлечь установка. Согласно ГОСТ Р 51237–98¹⁶⁹ все ВЭУ классифицируются на 4 класса мощности. В реальных условиях производительность ВЭС сильно варьируется из-за таких факторов, как изменение скорости ветра, турбулентность и рельеф местности. Поэтому важно учитывать коэффициент использования, который отражает реальную производительность ветроустановки.

2. Вторым важным показателем эффективности служит фактор наполнения, который указывает на то, насколько эффективно установка использует доступную энергию ветра. Фактор наполнения зависит от конструкции и технических характеристик установки. Чем выше фактор наполнения, тем более эффективно установка работает.

3. Климатические условия. Одним из основных факторов, влияющих на эффективность ВЭС, являются изменения ветровых условий: скорости и направления ветра, что повлияет на возможность генерации электроэнергии. Сильные колебания ветрового потока или уменьшение его скорости могут снизить эффективность ВЭС и уменьшить производство электроэнергии.

¹⁶⁸ Шепелев, А. О. Классификация современных ветроэнергетических установок по мощности / А. О. Шепелев, Е. Ю. Артамонова. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2016. — № 17 (121). — С. 92-96. — URL: <https://moluch.ru/archive/121/33503/> (дата обращения: 09.04.2025).

¹⁶⁹ ГОСТ Р 51237-98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. Статус: Действует Дата введения в действие: 01.07.1999. Заглавие на английском языке Nontraditional power engineering. Wind power engineering. Terms and definitions. Дата введения в действие 01.07.1999. <https://en.gostinfo.ru/catalog>

Среди методов и инструментов оптимизации мощности ветроустановок отмечены следующие.

1. Математическое моделирование. С помощью цифровых инструментов учитывают различные факторы работы ВЭС, такие как скорость ветра, турбулентность, конструкция лопастей и генераторов. Такие модели позволяют прогнозировать работу установок в различных условиях и оптимизировать их производительность.

2. Измерения и мониторинг реальной работы. С помощью специальных датчиков и систем сбора данных получают информацию о работе установки в реальном времени. Это позволяет анализировать её производительность, выявлять проблемы и предпринимать соответствующие меры по улучшению работы установки.

3. Выбор оптимальных материалов. Лёгкие и прочные материалы, такие как композиты, позволяют снизить вес установки и уменьшить нагрузку на подшипники и другие компоненты. Это не только способствует улучшению эффективности работы, но и снижает износ и повышает надёжность системы.

4. Улучшение генераторов и системы передачи энергии. Применение новейших технологий в области генераторов, таких как постоянные магниты или суперпроводящие материалы, позволяет повысить КПД и эффективность преобразования кинетической энергии ветра в электрическую энергию.

5. Оптимизация высоты и формы мачт и башен. Высота установки играет решающую роль в получении более высокой скорости ветра, поскольку на большей высоте скорость ветра обычно выше и более стабильна. Оптимальное соотношение высоты мачты и длины лопастей может значительно улучшить производительность установки.

6. Применение алгоритмов оптимального контроля. Эти алгоритмы позволяют адаптировать работу установок к изменяющимся условиям ветра, чтобы максимизировать получение электроэнергии. Оптимальное управление может включать в себя изменение угла атаки лопастей, регулировку скорости вращения ротора и оптимальное использование режимов работы генератора.

7. Модели прогнозирования в ветроэнергетике.

Современная теория прогнозирования располагает большим арсеналом методов – более 150 методик ориентированных для применения в разных странах и отраслях промышленности, однако ни одна из них не может быть сегодня признана универсальной.

С целью изучения данного вопроса, коллективом исследователей, в числе которых работал автор настоящего диссертационного исследования¹⁷⁰, был проведен подробный анализ существующих зарубежных и отечественных моделей прогнозирования мощности ветра.

Было установлено, что для прогнозирования ветра разработаны различные методы, которые можно классифицировать по временным шкалам и методологии.

Прогнозирование ветра по временному характеру можно разделить на 3 категории:

- прогнозирование на 8 часов вперед (краткосрочное прогнозирование);
- прогнозирование на 24 часа вперед (среднесрочное прогнозирование);
- прогнозирование на несколько дней вперед (долгосрочное прогнозирование).

В качестве основных подходов к прогнозированию ветроэнергетики выделяют модели, которые включают в себя численные прогнозы погоды и измерения в качестве входных данных. Это единственные подходы, способные обеспечить приемлемую точность в течение 24 – 48 часов и рассчитаны на применение в странах Европы.

Исследователи европейских моделей прогнозирования Юсупов К. И. и Тажибоев С. Т. представили описание зарубежных моделей прогнозирования ветра и разбор диапазона ошибок¹⁷¹ (табл.29).

Таблица 29. Модель прогнозирования в ветроэнергетике в странах Европы

¹⁷⁰ Мокшин М.Ю., Путилов А.В., Римская О.Н. Исследование методов и моделей прогнозирования мощности ветроэлектростанций. <https://energypolicy.ru/issledovanie-metodov-i-modelej-prognozirovaniya-moshhnosti-vetroenergostancij/energetika/2025/13/25/>

¹⁷¹ Юсупов К. И., Тажибоев С. Т. Обзор методов прогнозирования в ветроэнергетике. Сантехника, отопление, кондиционирование. Номер: 12 (252) Год: 2022. Страницы: 70-73. <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=beqpvo>

Модели для краткосрочного прогнозирования	Модели для среднесрочного прогнозирования	Модели для долгосрочного прогнозирования	Прогнозирование с помощью гибридных моделей
WPMS (Wind Power Management System)	WPPT (Wind Power Prediction TOOL)	Previento	ANEMOS
	Predictor		WindPro
	Zephyr		
	WPFS 1.0		
	AWPPS		

Источник: составлено автором на основе анализа данных статьи Юсупова К. И., Тажибоева С. Т. Обзор методов прогнозирования в ветроэнергетике.

Для изучения указанной проблемы целесообразно рассмотреть модели прогнозирования для расчета экономических результатов применения ветроэнергетики, используемые в США и разработанных Управлением по энергоэффективности и возобновляемым источникам энергии США (Office of Energy efficiency and renewable energy) и обобщенных в документе «Руководство по экономическому развитию наземной ветроэнергетики». Данное руководство представило модели для расчета экономических последствий и результатов применения ветроэнергетики (таблица 30).

Прежде чем перейти к обзору российских моделей прогнозирования мощности ветра, необходимо уточнить, что ветроэнергетика России в долгосрочной перспективе будет развиваться под влиянием изменений в энергетической политике и развития новых технологий.

В связи с этим, аналитиками Института энергетических исследований РАН подготовлен Прогноз развития энергетики мира и России до 2050 года¹⁷², в котором указано, что в большинстве энергосистем стран мира возобновляемые источники энергии и ископаемые топлива будут скорее дополнять друг друга, чем конкурировать между собой.

¹⁷² Кулагин В.А., Грушевенко Д.А., Галкина А.А. Прогноз развития энергетики мира и России до 2050 года // Современная мировая экономика. Том 2. 2024. №1(5). <https://cwejournal.hse.ru/index.php/cwejournal/vkulagin-dgrushevenko-agalkina-1-2024>

Таблица 30. Модели для расчета экономического эффекта ветроэнергетики

Наименование	Применение	Суть	Результат
1	2	3	4
Модель воздействия на рабочие места и экономическое развитие Jobs and Economic Development Impact (JEDI)	Представляет инструмент, который оценивает экономические последствия энергетических проектов. Модели для ветроэнергетики включают распределенный ветер, ветер коммунального масштаба и морской ветер. На основе введенных пользователем данных о проекте или стандартных вводных данных (выведенных из отраслевых норм) JEDI оценивает количество рабочих мест и экономические последствия для локальной области, которые могут быть обоснованно поддержаны электростанцией или предприятием по производству топлива.	Рабочие места, доходы и объемы производства распределяются по 3 категориям: 1. Разработка проекта и воздействие на рабочую силу на месте: люди, работающие на месте (например, техники) 2. Влияние на местные доходы и цепочку поставок: детали, оборудование и рабочая сила для цепочки создания стоимости (например, производители лезвий, сталевары, бухгалтеры) 3. Индуцированные воздействия: воздействия расходов на местную экономику в связи с реализацией проекта.	Значения по умолчанию для модели JEDI основаны на интервью с отраслевыми экспертами и разработчиками проектов. Экономические мультипликаторы, содержащиеся в модели, получены из бухгалтерского программного обеспечения IMPLAN Minnesota IMPLAN Group и файлов государственных данных.

1	2	3	4
Модель системного советника System Advisor (SAM)	Модель производительности и финансов, разработанная для облегчения принятия решений для людей, вовлеченных в отрасль возобновляемой энергии, от руководителей проектов и инженеров до разработчиков программ стимулирования, разработчиков технологий и исследователей. SAM делает прогнозы производительности для ветровых и других возобновляемых источников энергии, включая подключенные к сети солнечные фотоэлектрические системы, концентрированную солнечную энергию, биомассу и геотермальные системы.	Модели денежных потоков подходят для проектов распределенной энергетики, которые покупают и продают электроэнергию по розничным ценам, и для проектов по производству электроэнергии, которые продают электроэнергию по цене, согласованной в рамках соглашения о покупке электроэнергии. Модель рассчитывает стоимость производства электроэнергии на основе предоставленной информации о местоположении проекта, затратах на установку и эксплуатацию, типе финансирования, применимых налоговых льготах и стимулах, а также технических характеристиках системы.	Результаты SAM включают: Нормированная стоимость энергии Цена покупки электроэнергии, внутренняя норма прибыли и другие финансовые цели для проектов коммунального масштаба Срок окупаемости и чистая приведенная стоимость для жилых и коммерческих проектов Прогнозы средних показателей производительности системы по часам, месяцам и годам, включая чистую выработку электроэнергии и эффективность компонентов Годовая таблица движения денежных средств с подробностями затрат Настраиваемые графики.
Малая ветроэкономическая модель Small Wind Economic Model	Инструмент для работы с электронными таблицами.	Инструмент для оценки производительности и экономичности потенциальных проектов распределенных ветровых турбин, уделяя особое внимание сертифицированным бытовым турбинам.	Модель позволяет проводить экономический анализ лизинга оборудования.

Продолжение таблицы 30.

1	2	3	4
Инструмент для расчета стоимости возобновляемой энергии	Инструмент для расчета стоимости возобновляемой энергии представляет собой экономическую модель денежных потоков.	Инструмент адресован лицам, формирующим политику, регулирующим органам и сообществу, занимающемуся возобновляемой энергетикой.	Инструмент позволяет оценивать экономику проекта, разрабатывать стимулы на основе затрат (например, фиксированные тарифы) и оценивать влияние различных государственных и федеральных структур поддержки.

Источник: составлено автором на основе данных U.S. Department of Energy. 2022. "Land-Based Wind Energy Economic Development Guide."

Исследователи Алиходжина Н. В., Тягунов М. Г., Шестопалова Т. А.¹⁷³ считают, что в настоящее время не уделяется достаточного внимания совершенствованию методов ветроэнергетических расчетов и моделям прогнозирования основных характеристик ветра на площадке расположения ВЭС. Ученые предложили собственную классификацию методов прогноза основных параметров ветра (таблица 31).

Таблица 31. Основные методы для прогнозирования основных параметров ветра

Методы прогнозирования	Примеры	Примечание
Физические	Глобальные системы прогнозирования; MM5; HIRLAM	Используют метеорологические данные, такие как скорость ветра и его направление, давление, температура, влажность, структура местности т.п. Точны для долгосрочного прогнозирования.
Статистические	Временные ряды	Необходимая большая выборка исходных данных. Высокая точность для краткосрочного прогнозирования.
Интеллектуальные	Искусственные нейронные сети;	Тренировка ИНН существенно повышает точность прогноза. НС позволяет использовать большое количество входных параметров. Высокая точность для краткосрочного прогнозирования
Гибридные	ANFIS и др.	ANFIS показывает хорошую точность при краткосрочном прогнозировании. Есть возможность увидеть взаимосвязь между параметрами модели.

Источник: Алиходжина Н. В., Тягунов М. Г., Шестопалова Т. А.

¹⁷³ Алиходжина Н. В., Тягунов М. Г., Шестопалова Т. А. Обзор существующих моделей и методов расчета основных характеристик ветра в определенной точке

Обзор существующих моделей и методов расчета основных характеристик ветра в определенной точке.

Проведенный Алиходжиной Н.В., Тягуновым М.Г., Шестопаловой Т.А. анализ существующих моделей показал:

- модели, предназначенные для ветроэнергетических расчетов среднегодовых и среднемесячных значений скорости ветра, имеют хорошую точность, удобны в применении и пригодны для условий России;
- модели ветроэнергетических расчетов на часовые интервалы не имеют общих методов разработки и построения. Все существующие применимы только в точке расположения конкретной ВЭС для которой они разрабатывались.
- мало внимания уделяется вопросу применимости разработанных моделей. Так, разработанные модели опираются на зарубежных исследователей и их наработки, в попытке адаптировать под условия России.

Особенностью российской ветроэнергетики является использование и в настоящее время зарубежного программного обеспечения для обоснования площадки под размещение ВЭС и для прогнозирования основных характеристик ветра для планирования режима работы ВЭС.

Таким образом, детально изучив проблему, российские исследователи выявили следующие факты:

- модели, разработанные и применяемый в метеорологии и авиации не применяются для нужд ветроэнергетики. Поскольку параметры состояния атмосферы не могут быть получены в местах расположения ВЭУ, в связи с чем, применение этих моделей затруднительно;
- модели вертикального профиля ветра работают только в условиях, для которых они разработаны. При переходе в другую географическую точку модели показывают недостоверные результаты, что влияет на точность моделируемых параметров и итоговое решение по выбору площадки ВЭС и оценки ее эффективности;

- модели, определяющие основные характеристики ветра на краткосрочные интервалы времени, базируются на регрессионных и статистических моделях, которые все чаще реализуются с помощью нейронных сетей;

- в отечественной литературе, посвященной ветроэнергетике, редко упоминаются ветроэнергетические расчеты и их особенности, проблемы и перспективы развития. Также по теме прогнозирования основных характеристик ветра встречается мало научных статей отечественных исследователей, а те что есть ссылаются на большое количество зарубежной литературы. Научная школа российской ветроэнергетики еще окончательно не сформировалась.

Проведенный анализ существующих моделей прогнозирования мощности ветра показал:

- модели, предназначенные для ветроэнергетических расчетов среднегодовых и среднемесячных значений скорости ветра, имеют хорошую точность, удобны в применении и пригодны для условий России;

- модели ветроэнергетических расчетов на часовые интервалы не имеют общих методов разработки и построения. Все существующие модели применимы только в точке расположения конкретной ВЭС, для которой они разрабатывались;

- мало внимания уделяется вопросу применимости разработанных моделей.

Особенностью отрасли российской ветроэнергетики является использование зарубежного программного обеспечения для обоснования площадки под размещение ВЭС и для прогнозирования основных характеристик ветра для планирования режима работы ВЭС. В процессе исследования были установлены следующие факты:

1. Модели, разработанные и применяемые в метеорологии и авиации не применяются для нужд ветроэнергетики.

2. Модели вертикального профиля ветра работают только в условиях, для которых они разработаны;

3. Модели, определяющие основные характеристики ветра на краткосрочные интервалы времени, базируются на регрессионных

и статистических моделях, которые все чаще реализуются с помощью нейронных сетей.

Исследователь Зубакин В. А. расширил классификацию методов прогнозирования, предложил уточненную классификацию методов прогнозирования выработки ВЭС¹⁷⁴:

1. Физические методы.
2. Статистические методы.

Комбинирование статистических моделей, а также моделей машинного обучения вместе с численным прогнозом погоды и анализом местности считается одним из наиболее оптимальных методов.

Ученым-экономистом Зубакиным В. А.¹⁷⁵ в качестве объекта моделирования был выбран ветрогенератор, расположенный в Российской Федерации. В качестве входных данных использовались параметры, полученные из системы SCADA с шагами 10 минут и 60 минут. В качестве входных данных выбирались значения скорости ветра за предыдущее время. Оценка ошибки прогноза была произведена для горизонта планирования от 1 до 6 часов. Результаты прогнозирования представлены в таблицах 32 и 33.

Таблица 32. MAPE прогноза скорости ветра

Метод	Горизонт прогнозирования, часов					
	1 ч.	2ч.	3ч.	4 ч.	5ч.	6ч.
XGboost	13,2	18,9	22,1	24,5	26,1	28,2
Random Forest	13,1	19,2	24,1	25,3	27,1	28,9
MLP	11,1	17,9	21,6	22,2	24,9	26,1
RNN	12,2	18,1	20,1	22,9	23,6	25,6
LSTM	12,4	16,9	18,1	21,2	22,8	24,9
Скольльзящая средняя	6,2	11,1	17,4	20,5	25,2	27,2

Источник: составлено автором.

¹⁷⁵ Зубакин В.А. Экономическая эффективность электростанций на возобновляемых источниках энергии на примере показателя LCOE. СОК №10 2024 (стр. 72-75).

Таблица 33. RMSE (корень квадратный из среднеквадратичной ошибки прогноза) прогноза скорости ветра

Метод	Горизонт прогнозирования, часов					
	1 ч.	2ч.	3ч.	4 ч.	5ч.	6ч.
XGboost	1,01	1,39	1,6	1,77	1,9	2,04
Random Forest	1,1	1,45	1,72	1,9	2,02	2,19
MLP	1,05	1,36	1,63	1,76	1,95	2,01
RNN	1,09	1,32	1,58	1,82	1,91	1,99
LSTM	1,1	1,28	1,41	1,59	1,8	1,94
Скользкая средняя	0,52	1,05	1,36	1,43	1,93	2,05

Источник: составлено автором.

Применение рекуррентной нейросети с архитектурой LSTM позволило достичь самой высокой точности по сравнению с другими моделями для горизонта прогнозирования на 5–6 часов. По мнению исследователя Зубакина В.А., использование только временного ряда скорости ветра не позволяет получить высокую точность прогнозирования скорости ветра.

В последние десятилетия активно внедряются методы искусственного интеллекта, которые сочетают в себе разнофакторные исходные данные и признаки иных моделей прогнозирования и отличаются высокой точностью предсказания: искусственные нейронные сети; групповые методы обработки данных; метод опорных векторов. С большой долей вероятности можно предположить, что будущее за моделями прогнозирования с применением искусственного интеллекта.

Исследователями Мокшиным М. Ю. и стоимость Путиловым А. В. (см. п.2.2.) разработана алгоритмическая модель прогнозирования развития отечественной энергетики в рамках технологии форсайт-проектирования. В модели применены принципы системного, комплексного, междисциплинарного и рискованного подходов. Авторами модели предложена форсайт-методика, которая основывается на системном исследовании и анализе текущего состояния и потенциала ветровой энергетики РФ, выполнена статистическая обработка данных по производству ветровых установок, метеорологических и экономических показателей.

Исследователи выявили зависимость величины экономических показателей российской промышленности и нелинейной динамикой энергетических трендов и предложили эффективный комплексно-сопряженный подход прогнозирования таких трендов. Подход основан на комплексной экономико-технологической модели, которая сопряжена с базой данных климатических изменений.

Системы автоматизированного проектирования (САПР) уже являются неотъемлемой частью процесса проектирования ВЭС. Применение автоматизированного проектирования ВЭС сокращает сроки разработки и снижает риски ошибок, связанных с традиционным вводом параметров. Цифровые копии ветрогенерирующих установок позволяют адаптировать стратегию управления к текущим условиям эксплуатации и повысить точность прогнозов.

Оценку эффективности различных моделей и их выбор на практике следует рассчитывать в зависимости от конкретного проекта, учитывая характер местности, временные интервалы, экономику проекта, а также перспективность проекта с точки зрения «зеленой» энергетики.

В настоящее время в России не существует единых подходов к определению основных характеристик ветра в предполагаемой точке строительства ВЭС и нет единых методик для прогнозирования параметров ветра как на краткосрочный, так и среднесрочные интервалы времени.

Одним из перспективных направлений развития российской ветроэнергетики является создание многомодульных ветроэлектрических станций, состоящих из 100 и более небольших ветроколес диаметром до 2 метров.¹⁷⁶ Мультимодульная ветроэлектростанция (ВЭС) – это ветроэлектростанция, представляющая собой систему однотипных транспортабельных модулей небольшой мощности, конструктивно и функционально совместимых между собой, которыми управляет единая система управления. Модульный принцип построения ВЭС (рис.27) позволяет путем увеличения количества модулей получить заданную мощность, а

¹⁷⁶ Степанов С.Ф., Павленко И.М., Ербаев Е.Т. Обеспечение эффективной работы мультимодульной ветроэлектростанции при изменении скорости ветра и нагрузки // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6.; URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=11407> (дата обращения: 13.04.2025).

2 - электротехнического комплекса, состоящего в свою очередь из:

- синхронного генератора с магнитоэлектрическим возбуждением от постоянных магнитов неодим-железо-бор (NdFeB);
- электромеханической системы перемещения ветроколеса;
- преобразователя частоты, выполненного по схеме инвертора тока;
- блока аккумуляторных батарей.

Ветрогенератор ВЭС представляет собой многополюсный синхронный генератор, в роторе которого установлено ветроколесо.

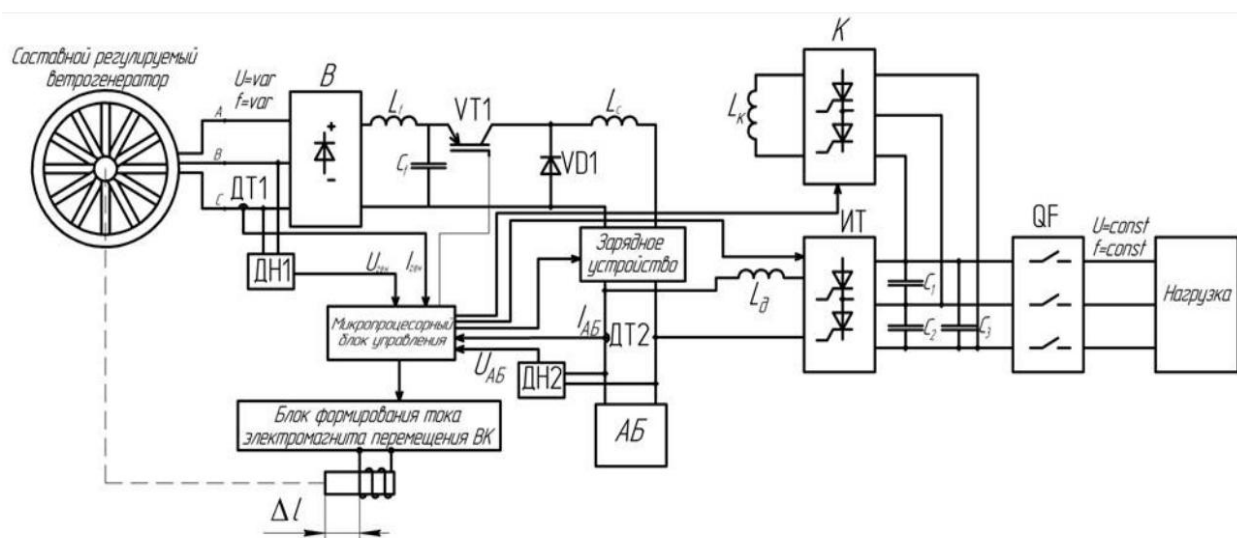


Рисунок 27. – Блок-схема модуля ВЭС с системой поиска максимума при работе на заряд аккумуляторной батареи.

Источник: Степанов С.Ф., Павленко И.М., Ербаев Е.Т. Обеспечение эффективной работы мультимодульной ветроэлектростанции при изменении скорости ветра и нагрузки.

https://science-education.ru/article/view?id=11407&utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru

Модульный принцип построения ветроэлектростанций позволяет получить необходимую мощность мультимодульной ВЭС (МВЭС) за счет набора необходимого количества однотипных модулей. Данный принцип позволяет максимально снизить затраты на производство и техническое обслуживание МВЭС.

Электромеханическая система перемещения ветроколеса позволяет стабилизировать величину генерируемого напряжения в зоне больших скоростей ветра. В зоне малых и средних скоростей ветра стабилизация выходного напряжения обеспечивается за счет преобразователя частоты на основе инвертора тока.

Технически важным моментом в эксплуатации ВЭС является сбор актуальных данных о каждом ветрогенераторе. Задача решается при использовании сетей датчиков, связанных между собой и с центром управления. Ветрогенераторы используют множество датчиков, объединенных в единую сеть ветропарка и являются демонстрацией эффективности использования промышленного Интернета вещей (IoT) и нейронных сетей.

Очевидно, что территория РФ позволяет размещать ВЭС в районах с достаточно высокой скоростью ветра для генерации энергии. В рамках реализации государственной программы поддержки развития возобновляемых источников энергии в России построено эксплуатируется 9 ветропарков АО «Новавинд» Росатома, которые сконцентрированы в объединенной энергосистеме Юга, а именно в Адыгее, Ставропольском крае и Ростовской области. Их суммарная мощность сравнима с одним атомным энергоблоком на реакторе ВВЭР-1000. Необходимо отметить, что выработка ВЭС всегда ниже, чем у атомной станции, поскольку производительность ВЭС зависит от погодных условий. Зимой ветер сильнее, поэтому производительность ВЭС растет. В 2023 году средневзвешенный коэффициент использования мощности (КИУМ, показатель загрузки объекта) составил порядка 29%¹⁷⁷.

¹⁷⁷ Первый зеленый гигаватт. <https://www.kommersant.ru/doc/6350608>

Задача оптимизации мощности ветроустановок, а, следовательно, и количества производимой электроэнергии, может быть решена несколькими способами. Один из которых - математическое моделирование. С помощью цифровых инструментов учитывают различные показатели: скорость ветра, турбулентность, конструкция лопастей и генераторов. Такие модели позволяют прогнозировать работу установок в различных климатических зонах и оптимизировать их производительность.

Другим способом является измерение и мониторинг реальной работы ветроэнергетических установок, который имеет более широкое назначение. С помощью специальных датчиков и систем сбора данных можно получить информацию о работе установки в реальном времени. Это позволяет анализировать ее производительность, выявлять проблемы и предпринимать соответствующие меры по улучшению работы установки. Основной задачей расчета и анализа производительности ВЭС является определение оптимальных режимов работы и технических параметров установки.

С использованием математических моделей и экспериментальных данных можно провести оптимизацию технических параметров ВЭУ, таких как угол наклона лопастей, скорость вращения ротора или настроек системы управления. Это позволит достичь максимальной производительности и эффективности работы установки при различных скоростях и направлениях ветра.

Среди экономических характеристик оценки инвестиций важен анализ экономической целесообразности, в котором используются три финансовых показателя¹⁷⁸:

1. чистая приведенная стоимость (NPV);
2. внутренняя норма прибыли (IRR);
3. период окупаемости (PBP).

NPV равен текущей стоимости будущих денежных потоков. Значение NPV должно быть равно или больше нуля. Чем больше NPV проекта, тем он выгоднее.

¹⁷⁸ Бухтияров А.А. Экономическая целесообразность малых ветряных турбин. Научный журнал «Эпомен», № 27, 2019 | Epomen Scientific Journal, No. 27 (2019). Стр.91-95. <https://epomen.ru/issues/2019/27/11.pdf>

$$NPV = \sum_{i=1}^n B - C(1+r)^n \quad (16),$$

где NPV — чистая приведенная стоимость

где B — выгода, C — стоимость, n — период и r — ставка дисконтирования.

$$\sum_{i=1}^n C(1+r)^n = \sum_{i=1}^n B(1+r)^n IRR. \quad (17).$$

это значение номинальной скидки, для которой значение NPV становится равным нулю

Период окупаемости — это время, необходимое для восстановления общих инвестиций путем получения прибыли. Этот показатель рассчитывается по следующему уравнению:

$$P_i = T - 1 + \left| \sum_{i=1}^{T-1} T - 1i = 1(B - C) \right| (B - C)T, \quad (18),$$

где P_t — период окупаемости ветроэлектростанции, а T — первый год, когда значение совокупной прибыли равно нулю или положительному.

Как показала практика, из-за специфики проведения ветроэнергетических расчетов и их достоверности в точке проведения, применение опыта зарубежных исследований затруднительно и часто не подходит под условия работы российских ветростанций.

В последние десятилетия в энергетическую отрасль активно внедряются методы искусственного интеллекта, которые сочетают в себе многофакторные исходные данные и признаки встроенных моделей прогнозирования, которые отличаются высокой точностью предсказания: искусственные нейронные сети; групповые методы обработки данных; метод опорных векторов. В связи с чем, с большой долей вероятности можно предположить, что будущее за моделями прогнозирования с применением искусственного интеллекта.

Таким образом, использование современных информационных технологий позволит перейти к формированию механизмов управления устойчивым развитием экономики промышленных отраслей и комплексов, в том числе и с использованием ветрогенерации.

Влияние сезонных изменений на оптимизацию работы ВЭС

Глобальное потепление, изменения осадков и уровня воды, силы и направления ветра, приливы и отливы, магнитные бури на солнце, частота и

интенсивность штормов или ураганов, природные катаклизмы влияют на количество производимой энергии.

На этапе процесса обоснования параметров ВЭУ необходимо выделить направления взаимодействия ВЭУ с окружающей средой. На основе анализа эксплуатируемых ВЭС можно выделить основные факторы негативного влияния ВЭС на окружающую среду, среди которых:

- изъятие земель;
- акустическое воздействие;
- электромагнитные помехи телевизионной и радиосвязи;
- влияние на ландшафт и его восприятие;
- влияние на флору и фауну.

На устойчивость работы ВЭС большое влияние оказывает сила и направление ветра, а также ураганы (на суше) и штормы (на воде) которые провоцируют возникновение механических нагрузок на ветроустановки. Высокая скорость ветра оказывает давление на лопасти ветрогенераторов, что может привести к их износу и повреждениям, а также необходимости регулярного обслуживания и замены компонентов, что увеличивает эксплуатационные расходы. Сильные ветровые потоки могут вызывать вибрации ветрогенераторов и их оснований, которые могут привести к разрушению установок и создать проблемы с надежностью и безопасностью работы ВЭС. Особенно это актуально при решении о строительстве ВЭС в регионах на территории РФ, которая отличается огромным разнообразием климатических условий.

Оценку эффективности различных моделей ВЭУ следует рассчитывать в зависимости от конкретного проекта, учитывая характер местности (рис.1), временные интервалы, экономику проекта, а также перспективность проекта с точки зрения «зеленой» энергетики. Целесообразно отметить, что расчет и анализ производительности ветроэнергетических установок являются непрерывным процессом. Из графика на рис.28 видим, что лидерами по генерации ветроэнергетики в России являются следующие регионы: Волгоградская, Астраханская, Ростовская, Оренбургская области и Ставропольский край.

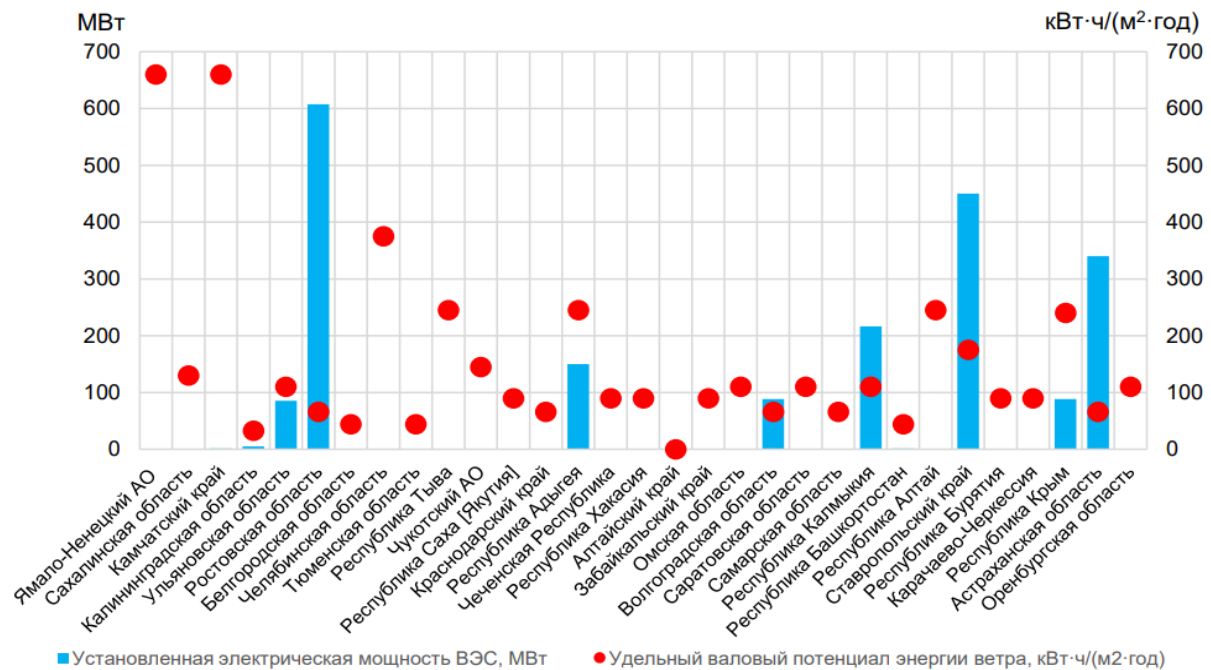


Рисунок 28. – Региональное распределение установленной электрической мощности ВЭС по состоянию на 1 января 2022 г. и удельного валового потенциала энергии ветра.

Источник: Возобновляемая энергетика в России и мире. Основные показатели работы электростанций ВИЭ на территории России. Минэнерго России.

<https://rosenergo.gov.ru/upload/iblock/e04/3xtm87iv99x76b23c6wjul3as5pzz8zj.pdf>

Негативным аспектом сильных ветровых потоков является увеличение риска возникновения аварийных ситуаций, что ожидаемо приведет к снижению производства электроэнергии и возможным финансовым потерям. Интенсивные ветры также могут оказывать влияние на надежность передачи электричества от ВЭС к потребителям. Высокая нагрузка на электрическую сеть, вызванная большим количеством генерируемой энергии, может приводить к возникновению перегрузок и скачков напряжения, что может повредить оборудование и нарушить нормальное функционирование электрической сети.

Причина, по которой в прибрежных районах наблюдается увеличение энергии ветра, заключается в том, что суша в природе нагревается быстрее, чем вода на глубине, и эта разница является источником энергии для ветров. Исключение составляет Арктика, где основной движущей силой ветра является

разница температур между Арктикой и тропиками, причем Арктика нагревается очень быстро, уменьшая эту разницу.¹⁷⁹

На практике при эксплуатации ВЭС часто приходится использовать установки, не являющиеся оптимальными для конкретных условий региона (из-за дискретности ряда параметров выпускаемого промышленностью энергетического оборудования, отклонения условий работы от расчетных и т.п.), следовательно дополнительно потребуются оценка соответствующих потерь при генерации энергии.¹⁸⁰

Подводя итог, можно утверждать, что в настоящее время в России не существует единых подходов к определению основных характеристик ветра в предполагаемой точке строительства ВЭС и нет единых методик для прогнозирования параметров ветра как на краткосрочный, так и среднесрочные интервалы времени.

Таким образом, можно утверждать:

1. проектирование ВЭС является в каждом конкретном случае уникальной задачей, поскольку новый объект встраивается в окружающую среду с ее конкретными климатическими условиями;
2. проектирование любого энергетического объекта в целом, и ВЭС в частности, требует такого подхода, при котором энергетический объект стал бы частью природно-технической системы;
3. сложность проектирования ВЭС на территории РФ связана с необходимостью решения комплекса задач, обусловленных природно-климатическим разнообразием территорий;
4. перспективы использования ветроэнергетики в нашей стране связаны с наличием протяжённых зон побережья морей и океанов, с наличием хорошего ветропотенциала с одной стороны и отсутствием центрального энергоснабжения с другой;

¹⁷⁹ Бусько Н.П., Основина Л.Г. Влияние изменения климата на использование природных ресурсов и энергетику. <https://rep.polessu.by/bitstream/123456789/30206/1/Vliianie.pdf>

¹⁸⁰ Сидоренко Г.И., Алджамил Ахмад. Модель оптимизации параметров ветровой электростанции. Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) # 1(82), 2021, Стр.35-41. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2021.5.82.1228

5. большинство территорий, пригодных для использования в ветроэнергетике в нашей стране лежат в условиях вечной мерзлоты, что требует разработки методики проектирования и возведения ВЭУ в данных условиях.¹⁸¹

В заключение, необходимо упомянуть о ветрогенерации на удаленных территориях России, где отсутствуют рыночные инструменты окупаемости инвестиций, нет ни одного крупного проекта ветрогенерации на основе локализованных ветротурбин. Росатом планирует строительство ветропарка на острове Сахалин до конца 2025 года. Среднегодовая скорость ветра на большей части побережья острова составляет 6–8 м/с, что подходит для запуска проекта ВЭС. Схема окупаемости объекта предполагает привлечение государственно-частного партнерства, включая концессии.

Самым амбициозным проектом Росатома анонсировано масштабное развитие ВЭС в Арктике, пока для энергоснабжения местных компаний. Климатические условия Арктики, где сильные ветра и преобладающий сезон года – зима, подходят. В перспективе вдоль Северного морского пути в Арктике может появиться новый сегмент для развития ВИЭ - «Северный магистральный энергетический путь».

Принятие решений при инвестировании и последующем вводе ВЭС в эксплуатацию усложняется рядом факторов: высоким уровнем неопределенности исходной информации, будущих условий эксплуатации, неопределенности предпочтений потребителя; слабой инфраструктурой, отсутствием специализированных систем поддержки принятия решений, зависимостью от климатических условий.

В этой связи, задача ввода ветроэнергетических мощностей требуют совершенствования методического, математического и программного обеспечений.

¹⁸¹ Панфилов А.А. Обоснование основных параметров ветроэлектрических установок с учётом природно-климатических условий Российской Федерации. Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» № 11 (151) 2014 file:///C:/Users/%D1%81/Desktop/obosnovanie-osnovnyh-parametrov-vetroelektricheskikh-ustanovok-s-uchyotom-prirodno-klimaticheskikh-usloviy-rossiyskoy-federatsii.pdf

Выводы по главе 2

Мировое производство электроэнергии растет с ростом населения планеты, развития технологий и потребностями в электроэнергии населения и промышленности в условиях энергетического кризиса. Ускоренная электрификация стала основным трендом энергетического перехода в конечном потреблении энергоресурсов. Решая климатические задачи «зеленой повестки» мировая энергетика подошла к четвертому энергетическому переходу, ориентируясь на приоритетную генерацию энергии из ВИЭ-источников.

Экономические показатели промышленного производства по регионам РФ напрямую взаимосвязаны с данными производства по отраслям в регионах, и в целом влияет на динамику статистических показателей промышленности.

Себестоимость продукции, в данном случае единицы электроэнергии, является одним из важнейших экономических показателей работы предприятий. Важнейшая особенность энергетического производства состоит в том, что предприятия энергетической отрасли работают непосредственно на потребителя без создания складских запасов и учета незавершенного производства, а произведенные за отчетный период расходы полностью списываются на себестоимость выработанной энергии.

Величины экономических показателей российской промышленности во многом коррелируют с нелинейной динамикой энергетических трендов. Автором разработан эффективный комплексно-сопряженный подход прогнозирования таких трендов, основанный на комплексной экономико-технологической модели, которая сопряжена с базой данных климатических изменений.

В целях раскрытия темы настоящей работы автор выбрал 4 показателя для проведения исследования и построения модели мониторинга моделирования экономических показателей ВЭС: КУИМ, IRR, NVP и LCOE. Популярный в РФ показатель средневзвешенной стоимости единицы электроэнергии в последнее время не применяют в современных методиках оценки эффективности работы электростанций, отдавая предпочтение операционным и переменным затратам.

Выбранные показатели эффективности работы ветроэнергетического предприятия не являются исчерпывающими и не представляют окончательную оценку работы конкретной ВЭС, однако их системный мониторинг позволяет показать ежедневную работу станции и принимать оперативное управленческое решение в случае нештатной ситуации.

В России технологии использования ВИЭ в настоящее время характеризуются высокими удельными капиталовложениями и высокой себестоимостью электроэнергии, которая в дальнейшем может возрасти еще на 3–4%¹⁸². Вместе с этим, оценка эффективности и высокие темпы развития возобновляемых источников энергии в других странах свидетельствуют о пользе освоения и внедрения новых технологий энергопроизводства в промышленное использование.

Таким образом, операционные издержки российских СЭС являются намного более высокими, чем в мире, а операционные издержки российских ВЭС сопоставимы с глобальными значениями и находятся ближе к верхнему уровню значения последних.

Экономическая эффективность станций на ВИЭ и сама целесообразность их размещения в существенно большей степени зависит от условий данного места, чем в случае со станциями на ископаемых энергоносителях. Географический фактор играет очень важную роль и является ключевым моментом, связанным с экономической спецификой ВИЭ. Говорить об их эффективности в отрыве от определённых климатических условий не имеет смысла, поэтому основной задачей становится выбор оптимальных ниш (прежде всего, физико-географических и экономико-географических) для размещения ветроэлектростанций.

Интегральные относительные показатели экономической эффективности работы электростанции, такие, как стоимость единицы установленной мощности и произведённой электроэнергии, не отражают в достаточной степени реальные экономические характеристики станции. Для выводов и принятия решений об

¹⁸² Лапаева О.Ф., Иневатова О.А., Дедеева С.А. Современные проблемы и перспективы развития топливно-энергетического комплекса // Экономические отношения. – 2019. – Том 9. – № 3. – С. 2129– 2142. doi: 10.18334/eo.9.3.40815

экономической целесообразности того или иного варианта энергообеспечения требуется анализ фактических инвестиционных и операционных затрат и их распределения во времени.

Установлено, что основными критериями, влияющими на срок окупаемости проектов развития ВИЭ в России и в Кыргызстане, являются затраты на оборудование, строительство сооружений, приобретение земельного участка и создание инфраструктуры.

Исходя из проведенных анализа географических и климатических условий регионов, сравнения социально-экономических показателей и оценки экономической эффективности развития ветроэлектростанций в исследуемых регионах, были сделаны выводы:

1. Для развития проектов ВИЭ, в частности, ветроэнергетики, наиболее благоприятные условия сложились в Ростовской области.
2. Географические особенности Иссык-кульской области предпочтительнее для строительства электростанций с использованием возобновляемых источников энергии солнца и воды, в меньшей мере для ветроэлектростанций.

В целях оптимизации работы энергосистемы следует учитывать факт прохождения минимума электрической нагрузки в системе, особенно в зимнее время года, когда теплофикационная и вынужденная теплофикационная мощности оказываются соизмеримыми и даже превышают величину ночной электрической нагрузки. Для обеспечения устойчивости режима в ночное время энергосистема вынуждена останавливать конденсационные агрегаты, что связано с дополнительными затратами, и разгружать отборы турбин, переводя тепловую нагрузку на энергетические котлы через редуционно-охладительные установки. Представляется, что для энергосистемы окажется предпочтительнее ограничивать получение электроэнергии от ВЭУ, чем создавать дополнительную нагрузку с ведением режима в ночное время суток.

Следовательно, энергия ветра может быть доступной и масштабной и эффективно использоваться на открытых пространствах, таких как поля, холмы и равнины.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МОНИТОРИНГА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для построения и тестирования модели использованы эмпирические данные по скорости и структуре ветровых потоков за период 2020–2024 годов. Источниками данных выступили:

- метеорологические наблюдения Росгидромета;
- климатические массивы ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»;
- отчётные сведения и проектная статистика АО «Новавинд» по действующим ветропаркам.

Обработка и согласование данных производились с использованием методов вейвлет-анализа, цифрового фильтра и нормализации на основе средней годовой амплитуды ветра.

3.1. Методика оценки интенсивности использования мощности ВЭС

В условиях глобальных климатических изменений и необходимости перехода к низкоуглеродной экономике возобновляемая ветровая энергетика приобретает стратегическое значение. Помимо сокращения выбросов парниковых газов, она способствует повышению энергетической независимости и устойчивости национальных энергетических систем.

Эффективность ветроэлектрогенерации определяется климатическими характеристиками региона, включая среднегодовую скорость и устойчивость воздушных потоков. Оптимальные условия эксплуатации наблюдаются в регионах с высокими ветровыми потенциалами (скорость ветра не менее 8 м/сек и выше) и ограниченными альтернативными источниками энергоснабжения. Географическая адаптация ветровых электростанций позволяет их интеграцию в сельскохозяйственные ландшафты и горные районы, минимизируя экологические риски и конфликты с традиционными землепользованиями.

Несмотря на последние технологические достижения, распространение ветровой энергетики в России сдерживается рядом факторов, включая экономическую эффективность, инфраструктурные ограничения и

технологические барьеры. Средний коэффициент полезного действия ветрогенераторов составляет около 40%, что обусловлено переменной природой ветровых потоков и ограниченной возможностью полной утилизации кинетической энергии воздушных масс. Кроме того, географическая удалённость потребителей от точек генерации увеличивает капитальные затраты на строительство энергосетевой инфраструктуры и распределение электроэнергии.

Наряду с этим, развитие ветровой энергетики представляет собой перспективное направление диверсификации энергетического баланса, особенно в контексте снижения зависимости от импорта энергоносителей и уменьшения экологического воздействия на окружающую среду. В частности, интеграция ветроэнергетических технологий в атомный сектор может способствовать созданию гибридных энергетических систем, повышающих устойчивость электроснабжения и снижение операционных затрат.

Госкорпорация «Росатом» активно развивает направления, связанные с интеграцией атомной и ветровой энергетики, что позволяет значительно повысить устойчивость национальной энергетической системы. Развитие технологий направлено на решение проблем, связанных с надёжностью энергоснабжения, снижением углеродного следа и обеспечением стратегической энергетической безопасности РФ.

В 2022 году доля ВИЭ без крупной гидроэнергетики в энергобалансе ЕС составляет порядка 11%, США – 7%, Японии – 7%, Австралии – 8%. Процесс генерации энергии на наземных ВЭС и СЭС требует огромных свободных участков земли, сложных и дорогостоящих систем накопления энергии, и как следствие, большого объема цветных металлов.¹⁸³ Как известно, металлургическая отрасль отличается высоким энерго и водопотреблением и сопровождается загрязнением окружающей среды. Проблема утилизации компонентов для ВИЭ и аккумуляторов для электромобилей до сих пор не решена. Таким образом, назревает дилемма,

¹⁸³ Фокус энергоперехода только на ветре и солнце может обернуться значительными проблемами. <https://globalenergyprize.org/ru/2022/06/23/fokus-energoperehoda-tolko-na-vetre-i-solnce-mozhet-obernutsya-znachitelnymi-problemami/>

разрешить которую может новый комбинированный способ производства энергии, оказывающий щадящее влияние на климат планеты.

В мире исследовались вопросы интеграции переменных ВИЭ в единую энергетическую сеть стран в течение многих лет. Несмотря на это, выявление приоритетных мероприятий, которые нужно реализовать в конкретных условиях, остается актуальной задачей на повестке дня.

Интеграция атомной и ветровой энергетики открывает новые перспективы для формирования гибридных энергосистем, сочетающих высокую мощность традиционных атомных станций с переменной генерацией ветроустановок. Такой подход способствует увеличению доли возобновляемых источников энергии в общем энергобалансе, а также минимизации рисков, связанных с колебаниями.

Использование цифровых технологий и алгоритмов прогнозирования в энергетическом секторе позволяет оптимизировать управление производством и распределением электроэнергии. Анализ климатических данных и технологических трендов показывает, что комбинированные энергосистемы обеспечивают более стабильное энергоснабжение при снижении зависимости от ископаемого топлива¹⁸⁴.

1. Экономическая эффективность ветровой энергетики определяется совокупностью факторов, включая климатические условия, технологические инновации, государственные механизмы стимулирования и глобальные энергетические тренды. Внедрение форсайт-подходов к прогнозированию развития отрасли позволит оптимизировать стратегическое планирование и повысить инвестиционную привлекательность ветроэнергетики в долгосрочной перспективе.¹⁸⁵

2. Государственная политика в области возобновляемой энергетики и атомных технологий играет ключевую роль в реализации проектов по развитию ветроэнергетических мощностей. В Российской Федерации реализуется комплекс

¹⁸⁴ Некрасов С.А. Снижение издержек на интеграцию возобновляемых источников электроэнергии в энергосистему – путь повышения доступности возобновляемой энергетики. Теплоэнергетика, 2021, № 8, стр. 5-16. <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=tepen&y=2021&v=0&n=8&a=ТепEn2107003Nekrasov>

¹⁸⁵ Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии. Вестн. ИрГТУ. 2015, №9. – С. 133-140.

мер, направленных на ускоренное развертывание ветроэлектростанций посредством конкурсного механизма отбора инвестиционных инициатив¹⁸⁶ в сфере генерации на основе ВИЭ. В этой связи актуализируется проблема объективной оценки экономической эффективности ветроэнергетики, что требует разработки моделей прогнозирования и алгоритмической оптимизации.

Ключевым направлением одного из ведущих российских отраслевых форсайт-проектов является формирование методологии приоритизации инновационного развития «зеленой экономики» с апробацией на примере ветроэнергетического машиностроения, что подтверждается соответствующими нормативными актами Правительства РФ¹⁸⁷.

Прогнозирование отечественного энергетического сектора в рамках форсайт-технологий базируется на системной, комплексной и междисциплинарной методологии, учитывающей рискоориентированные аспекты. Инструменты цифровой трансформации позволяют существенно повысить оперативность обработки больших данных и повысить достоверность прогнозных оценок.

Динамика экономических индикаторов промышленного сектора РФ демонстрирует высокую степень корреляции с нелинейными процессами, характеризующими энергетические тренды. Представлен интегративный метод прогнозирования, сочетающий экономико-технологическое моделирование с базой данных климатических изменений, что позволяет учитывать, как макроэкономические, так и природные факторы.

Исследованиями установлено, что оптимизация работы ВЭС требует комплексного подхода, включающего анализ климатических условий, технических характеристик установок, алгоритмическое моделирование и использование цифровых технологий. Основной целью модели является максимизация

¹⁸⁶ Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 321 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации "развитие энергетики"» https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/f0e/aqybwcak8qsev77iuyheyw5r3q2j5amo/GP_30_v_redakcii_ot_18122021.pdf

¹⁸⁷ Распоряжение Правительства РФ от 04.10.2012 N 1839-р (ред. от 28.07.2015) «Об утверждении комплекса мер стимулирования производства электрической энергии генерирующими объектами, функционирующими на основе использования возобновляемых источников энергии» // Собрание законодательства РФ. 2012. № 41, ст. 5671.

коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) с учетом региональных особенностей и сезонных колебаний воздушных потоков.

Для моделирования поведения объектов в различных условиях, с целью оптимизации их производительности и прогнозирования потенциальных проблем используются цифровые двойники (виртуальные копии реальных объектов или процессов)¹⁸⁸. Цифровые двойники могут быть созданы на основе данных, полученных от датчиков, установленных на реальных объектах, и могут работать как в онлайн-, так и в офлайн-режиме. Модуль мониторинга и автоматического регулирования является цифровым двойником ВЭС и позволяет моделировать сценарии работы. Данные передаются в систему управления мощностью, которая регулирует параметры турбин в реальном времени.

С целью демонстрации сезонного изменения КИУМ для обоснования выбора региональных стратегий эксплуатации ВЭС автором были проведены расчеты и построен график сезонной зависимости КУИМ. Расчет КИУМ для ВЭС в обоих регионах на основе собранных климатических данных и разработанной модели на рис.29.

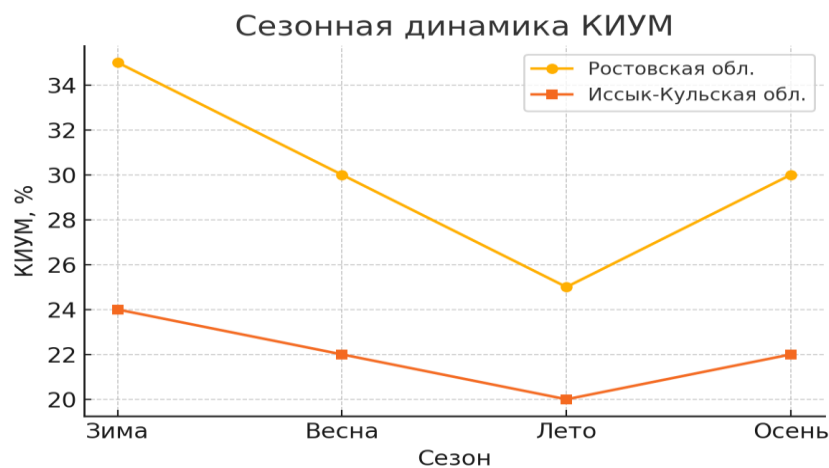


Рисунок 29. – Сезонная динамика КУИМ.

Источник: составлено автором.

¹⁸⁸ Щукина В.М., Щукин Н.И. Формирование цифровой модели ветроэнергетической установки в составе цифрового двойника и её апробация на примере оценки эффективности применения ветроустановки в селе Онгурены // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2024. № 4 (36). С. 112-122.

Модуль оптимизации интенсивности использования мощности работы ВЭУ определил, что в Ростовской области зимой скорость ветра максимальна (6-8 м/с), следовательно, там высокий потенциал генерации энергии и повышенная нагрузка энергосистемы в зимний период из-за отопления. Поэтому рекомендуется увеличить интенсивность использования мощности ВЭУ в зимний период, увеличить диаметр рабочего колеса турбины для повышения энергопотенциала и учитывать теплофикационную электрическую мощность, вырабатываемую турбоагрегатами ТЭЦ, чтобы сбалансировать нагрузку на сеть. Ожидаемый эффект – прирост КИУМ до 38-42% за счет сезонного усиления воздушных потоков (п.2.2 работы).

Полученные результаты свидетельствуют: в Ростовской области КИУМ зимой составляет 35%, летом — 25%; в Иссык-Кульской области значения КИУМ более стабильные — от 20 до 24%. Ростовская область требует адаптивного управления по сезонам, а для Иссык-Куля достаточна стандартная схема эксплуатации ВЭС.

В Иссык-Кульской области высокая стабильность воздушных потоков при относительно низкой скорости ветра (3-5 м/с), следовательно, рекомендуется использовать ВЭУ, способные работать при низких скоростях ветра и вводить в эксплуатацию ВЭС с номинальной мощностью, адаптированной к местным климатическим условиям. Это обеспечит стабильную генерацию электроэнергии в течение всего года. При этом достигается эффект увеличения номинальной мощности ВЭС при малых скоростях ветра и снижение зависимости региона от других источников энергии.

Экономические оценки проектов эксплуатации ВЭС в зависимости от ветровой активности позволили получить следующие результаты: при высокой ветровой активности в Ростовской области производство электроэнергии возрастает на 20–25% по сравнению со средним сценарием. Анализ данных показал:

- • В декабре–марте в Ростовской области ветровые скорости достигают 7,5–8,2 м/с.

- • Возможность увеличить установленную мощность турбин за счет:
 - использования режимов расширенного диапазона генерации,
 - применения турбин с повышенным коэффициентом использования ветра.

Экономический эффект выразился в росте годовой выработки электроэнергии на 8–10% в периоды зимней активности.

Автором были сделаны выводы: высокая ветровая активность значительно повышает выработку и экономическую эффективность проектов ВИЭ, а применение расширенного диапазона и турбин с высоким КИУМ даст прирост 8–10% годовой выработки (табл.34).

Таблица 34. Экономические показатели регионов

Показатель	Ростовская обл., млн.руб.	Иссык-Кульская обл., млн.руб.
Годовая выработка (МВт·ч)	10800	8700
LCOE (USD/MWh)	55 (4345 руб.)	60 (4740 руб.)
Точка безубыточности (лет)	4,9	6,0
Δ отн. (%)	+22%	-

Источник: составлено автором.

Было установлено, что Ростовская область демонстрирует на 22% большую выработку на одну ветроустановку, чем Иссык-Кульская. Точка безубыточности в Ростовской области достигается на 18% быстрее.

Организация регулярного мониторинга экономических показателей ВЭС двух регионов и проведение сравнительного анализа показала (табл.35), что систематический анализ экономических показателей проектов ВИЭ позволит своевременно корректировать эксплуатационные режимы и итоговую экономическую эффективность проектов.

Таблица 35. Экономические показатели мониторинга работы ВЭС

Показатель	Ростовская обл.	Иссык-Кульская обл.
КИУМ, %	30	22
LCOE, руб./кВт·ч	5,5	6,0
IRR, %	10	7

Источник: составлено автором.

Предложенная модель отличается от классических подходов, представленных в зарубежной литературе, тем, что в неё интегрированы региональные климатические особенности и сезонная изменчивость ветровых потоков.

В отличие от модели, представленной, например, в работе Gsänger & Pitteloud (IEA Wind, 2021), где ветропотенциал оценивается по усреднённым значениям за длительный период, в настоящем исследовании используются адаптивные методы (вейвлет-анализ), позволяющие учитывать колебания скорости и направлений воздушных масс в конкретных временных окнах.

Это обеспечивает более высокую точность прогнозирования выработки, особенно в регионах с нерегулярной и резко выраженной сезонностью ветра.

Применение цифровых технологий в управлении ветроэнергетическими комплексами, в том числе на базе атомной отрасли, позволяет не только повысить эффективность генерации электроэнергии, но и обеспечить ее интеграцию в национальные энергосистемы с учетом специфики региональных климатических условий. Автоматизированные системы управления производственными процессами, интеллектуальные платформы прогнозирования нагрузки и мониторинга состояния ВЭС способствуют минимизации операционных издержек и увеличению надежности электроснабжения.

Развитие цифровых платформ для оптимального управления производством и распределением энергии, а также автоматизация управленческих процессов, основанных на машинном обучении и предиктивной аналитике, являются ключевыми драйверами роста сектора ветровой энергетики. Использование инновационных решений в цифровой экономике способствует повышению

энергетической безопасности, снижению углеродного следа и расширению экспортного потенциала отечественных технологий в области возобновляемой энергетики.

3.2. Цифровая модель мониторинга экономических показателей ветроэнергетики

В ходе проведения исследования, автором были получены результаты, позволяющие сделать следующие выводы:

1. Эффективность ветроэлектрогенерации определяется климатическими характеристиками региона, в том числе среднегодовой скоростью и устойчивостью воздушных потоков.

2. Оптимальные условия эксплуатации наблюдаются в регионах с высокими ветровыми потенциалами и ограниченными альтернативными источниками энергоснабжения.

3. Географическая адаптация ветровых электростанций позволяет их интеграцию в сельскохозяйственные ландшафты и горные районы, минимизируя экологические риски и конфликты с традиционными землепользованиями.

4. Важность социально-экономических показателей регионов при принятии решения об инвестициях в строительство ВЭС.

Предлагаемая модель оптимизации интенсивности мощности ВЭС¹⁸⁹ состоит из нескольких взаимосвязанных модулей, которые работают вместе для оптимизации интенсивности использования мощности ВЭС:

1. Система сбора данных собирает данные из различных источников и передает их в другие модули системы. Модуль сбора данных собирает данные о климатических условиях (скорость ветра, плотность воздушного потока, направление, температура) и технических характеристиках ВЭУ (мощность, диаметр рабочего колеса, коэффициент эффективности), экономических данных (стоимость производства электроэнергии, тарифы, издержки эксплуатации).

¹⁸⁹ Мокшин М.Ю., Путилов А.В., Римская О.Н. Исследование методов и моделей прогнозирования мощности ветроэнергостанций. // Энергетическая политика. — 2025. — № 2 (205). — С. 56–66. DOI: 10.46920/24095516_2025_02205_56

2. Модуль анализа климатических данных. Данный аналитический модуль представляет собой интегрированную систему вычислительных алгоритмов и методов статистического анализа, ориентированную на обработку и интерпретацию больших объемов данных. В его состав входят инструменты для временного анализа, многомерного прогнозирования различных индикаторов, выявления структурных трендов, а также корреляционного и регрессионного анализа межфакторных взаимосвязей. Используя вейвлет-анализ, модуль анализирует спектральный состав скорости ветра и определяет оптимальные периоды для максимальной выработки электроэнергии. На основе розы ветров модель определяет преобладающие направления ветра и их интенсивность в разные сезоны.

3. Модуль расчета мощности. На основе формулы мощности ветровой турбины модель рассчитывает потенциальную выработку электроэнергии для каждой ВЭУ в зависимости от скорости ветра и технических характеристик.

Расчет мощности ВЭУ производится по формуле¹⁹⁰:

$$P = \eta \pi \rho V^3 D^2 / 8 \quad (19),$$

где:

P – мощность ветровой турбины,

η – коэффициент эффективности,

ρ – плотность воздуха,

V – скорость ветра,

D – диаметр рабочего колеса турбины.

4. Модуль оптимизации интенсивности использования мощности определяет оптимальные режимы работы ВЭУ для каждого региона на основе с учетом сезонных изменений скорости ветра для максимизации выработки электроэнергии. В модуле предусмотрено три сценария (режима):

¹⁹⁰ Мокшин М., Путилов А.В. Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования // Энергетическая политика. 2023. № 12. С. 80-91.

1. Оптимизация интенсивности использования мощности ВЭУ в зимний период достигается за счет максимизация прибыли путем увеличения выработки электроэнергии в зимний период, когда скорость ветра максимальна, ввода в эксплуатацию парка ВЭУ с максимальным диаметром рабочего колеса турбины для повышения энергопотенциала и учета теплофикационной электрической мощности, вырабатываемой турбоагрегатами ТЭЦ, для обеспечения стабильности энергоснабжения.

2. Ввод в эксплуатацию ВЭС с номинальной мощностью при низких скоростях ветра. В этом варианте повышение экономической эффективности за счет использования ВЭУ, способных работать при низких скоростях ветра, ввода в эксплуатацию ВЭС, адаптированных к низким скоростям ветра, использования ВЭУ с повышенным коэффициентом эффективности при низких скоростях ветра и оптимизации размещения ВЭУ с учетом розы ветров и климатических условий региона.

3. Моделирование нелинейной динамики за счет использования математических моделей для анализа работы ВЭС в различных климатических условиях и применение алгоритмов оптимизации для определения оптимальной интенсивности использования мощности ВЭС. Численное моделирование нелинейной динамики промышленных комплексов повышает экономическую эффективность эксплуатации производственных систем за счет численного моделирования, разработки модели

Анализ эффективности работы ВЭС региональных ветроэлектростанций показал:

LCOE в Ростовской области приблизительно 61 USD/MWh или 4819 Р/MWh (по курсу Банка России на 13 июня 2025 года¹⁹¹ = 79 руб.) и IRR $\approx$ 10%;

В Иссык-Кульской области LCOE ориентировочно составил 83 USD/MWh или 6557 Р/MWh, а IRR $\approx$ 7%.

¹⁹¹ Официальные курсы валют на заданную дату, устанавливаемые ежедневно.

<https://cbr.ru/search/?text=%D0%BA%D1%83%D1%80%D1%81+%D0%B4%D0%BE%D0%BB%D0%BB%D0%B0%D1%80%D0%B0+%D1%81%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8F>. (дата обращения 15.06.2025).

Оценка прироста экономической эффективности ресурсного обеспечения промышленности от реализации проектов ВЭС в регионах (приложение 2) показала следующие результаты (табл.36):

1. Модельный расчёт в Ростовской области: внедрение ВЭС увеличит ВРП на 0,5–0,7% за счёт: удешевления электроэнергии на 3–5% и стимулирования развития машиностроения и строительства.

2. Показатели по Иссык-Кульская области: прирост ВРП до 1,2%, благодаря: сокращению энергетического дефицита зимой, увеличению числа рабочих мест в энергетике и строительстве ВЭС. Ожидаемое значение экономического мультипликатора - рост производительности смежных отраслей промышленности на 1,5–2%.

Таблица 36. Экономические показатели по регионам

Регион	Прирост ВРП (%)	Мультипликатор (%)
Ростовская область	0,5–0,7	1,5–2,0
Иссык-Кульская область	1,2	1,5–2,0

Источник: составлено автором.

Инвестиции в проекты ВЭС обеспечивают прямой и мультипликативный экономический эффект, обосновывающий реализацию проектов в этих регионах.

Например, в промышленных комплексах Урала и Сибири, где наблюдается сезонная неравномерность потребления электроэнергии при высокой нагрузке ТЭЦ в холодные месяцы рекомендуется интегрировать ВЭС с энергосистемой ТЭЦ. Это позволит оптимизировать нагрузки на ТЭЦ путем частичного замещения их мощности ВЭС в периоды высокого ветрового потенциала. В дополнение к модели целесообразно разработать модель нелинейной динамики для прогнозных моделей для адаптации мощностей, что позволит повысить экономическую эффективность эксплуатации производственных систем и гибкости энергосистемы, а также снизит выбросы CO₂.

Модуль экономического анализа рассчитывает экономический эффект от использования ВЭУ в каждом регионе, учитывая стоимость производства электроэнергии, издержки эксплуатации и срок окупаемости на основе формулы:

$$\Delta_{\text{ЭФ}} = nQT_{\text{СЛ}}(T_{\text{СЛ}} - T_{\text{ОК}})(E_{\text{СТ}} - I_{\text{ЭКС}})(C_{\text{П}} - C_{\text{Т}}) \quad (20),$$

где:

– $\Delta_{\text{ЭФ}}$ – экономический эффект, n – количество ВЭУ, Q – годовой дефицит электроэнергии, $T_{\text{СЛ}}$ – срок службы ВЭУ, $T_{\text{ОК}}$ – срок окупаемости, $E_{\text{СТ}}$ – стоимость электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ, $I_{\text{ЭКС}}$ – издержки эксплуатации, $C_{\text{П}}$ – стоимость производства электроэнергии от традиционных источников, $C_{\text{Т}}$ – стоимость производства электроэнергии от ВЭУ.

Модуль визуализации данных представляет собой комплексную систему, обеспечивающую интуитивно понятное представление массивов больших данных с применением современных алгоритмов графической интерпретации. Он включает адаптивные механизмы обработки и визуализации многомерных структур, что позволяет исследователям выявлять скрытые корреляции, а также осуществлять глубокий анализ тенденций и аномалий. Для обеспечения высокой вычислительной эффективности модуль использует гибридный подход к распределенной обработке данных, предусматривающий совместное применение CPU и GPU-архитектур. Это позволяет динамически адаптировать вычислительные мощности к текущим задачам, значительно повышая скорость обработки и минимизируя задержки в визуализации сложных аналитических моделей. Модуль визуализации преобразует данные и отчеты о скорости ветра, мощности ВЭУ и экономической эффективности в удобные для восприятия визуальные форматы, такие как графики и диаграммы. Отчеты могут быть использованы для внутреннего анализа. Это помогает операторам ВЭС принимать решения по управлению мощностью и оптимизации работы ВЭУ.

Интеграционный блок взаимодействует с уже действующими учетными и управленческими решениями предприятия, используемыми в организации, такими как система учета, система управления производством или система управления рисками, что позволит инженерам в атомной отрасли автоматизировать сбор

данных и обеспечить более эффективное использование информационных ресурсов.

Интеграционный блок взаимодействует с уже действующими учетными и управленческими решениями предприятия, расширяя функциональность систем управления ресурсами.

Модуль информационной безопасности обеспечивает защиту конфиденциальной информации собранных данных. Авторы статьи предлагают использовать аппаратно-программный комплекс шифрования (АПКШ) «Континент», авторизацию и многофакторную аутентификацию пользователей, резервное копирование данных.

Такая архитектура модели позволяет эффективно собирать, анализировать и визуализировать большие объемы данных, а также поддерживать принятие обоснованных решений на основе аналитики.

В рамках корпоративной платформы управления данными автором предлагается эффективно использовать описанную выше модель совместно с комплексом инструментов DG/DM («Data Governance»/ «Data Management»)¹⁹², обеспечивающих:

- упорядочивание информационных потоков и унификация стандартов доступа позволяют сформировать централизованную систему управления аналитическими данными предприятия (Для повышения качества информационного взаимодействия необходимо сформировать унифицированную архитектуру данных, позволяющую ускорить доступ к аналитике и регламентировать обработку экономических индикаторов с использованием платформенных решений корпоративного класса);

- единое понимание данных (терминологии, взаимосвязей между бизнес-терминами, экономическими показателями и источниками данных, методологии экономических и технических расчетов);

¹⁹² Data Governance: зачем вам стратегия управления данными? <https://navicons.com/blog/4107/>

- быстрый доступ к данным и «data-сервисам» за счет реализации единой точки доступа к глоссарию, каталогу данных, аналитической отчетности, portalу самообслуживания;
- бизнес-процессы, ориентированные на цифровую трансформацию, описываются средствами концептуального моделирования, включая стандарты BPMN и системы управления знаниями предприятия.

Схемы процесса оптимизации, численного моделирования и выбора технологий помогают наглядно представить процессы и взаимодействия в модели оптимизации. Схема процесса оптимизации интенсивности мощности ветроэлектростанций наглядно отображает все этапы, начиная от сбора и анализа данных и заканчивая реализацией оптимальных решений (рис. 30).

Данная схема процесса оптимизации обеспечивает систематический подход к повышению интенсивности мощности ВЭС, учитывая различные факторы и условия. Она позволяет принимать обоснованные решения для повышения экономической эффективности и устойчивости ветроэнергетических проектов.

Схема численного моделирования отображает этапы моделирования нелинейной динамики и оптимизации (рис. 31).

Схема выбора технологий показывает, как выбираются технологии для различных климатических условий (рис.32).



Рисунок 30. – Схема процесса оптимизации интенсивности мощности ВЭС.

Источник: составлено автором.



Рисунок 32. – Схема численного моделирования.

Источник: составлено автором.



Рисунок 33. Схема процесса оптимизации интенсивности мощности ВЭС.

Составлено автором.

Предложенная модель позволяет оптимизировать интенсивность использования мощности ВЭС на основе климатических данных, технических характеристик и экономических показателей. Использование вейвлет-анализа и современных математических методов обеспечивает высокую точность прогнозов

и может быть адаптирована для различных регионов и типов ВЭУ.¹⁹³ Модель позволяет максимизировать экономический эффект от использования ВЭУ за счет оптимизации их работы и уменьшения издержек на неэффективное производство электроэнергии, а также автоматизирует процесс сбора данных, анализа и принятия решений, снижая затраты на управление ВЭС, что способствует снижению экологических рисков и устойчивому развитию ветроэнергетики. Эта модель интегрируется с существующими цифровыми системами и может использоваться в различных регионах для повышения эффективности ВЭС. На основе предложенной модели можно внедрять адаптивные методы управления мощностью ВЭС, повышая их эффективность и снижая стоимость вырабатываемой энергии.

Таким образом, развитие ветровой энергетики обусловлено совокупностью экономических, технологических и климатических факторов, что требует комплексного подхода к прогнозированию и моделированию.

Важнейшую роль играет интеграция современных методов анализа больших данных, разработка цифровых систем прогнозирования экономической эффективности и оценка потенциала ветроэлектростанций (ВЭС) в различных климатических зонах. Оптимизация работы ВЭС возможна на основе алгоритмической обработки данных коммерческого и технического учета электроэнергии, что способствует повышению точности прогнозирования и принятию обоснованных инвестиционных решений.

Применение цифровых технологий в управлении ветроэнергетическими комплексами, в том числе на базе атомной отрасли, позволяет не только повысить эффективность генерации электроэнергии, но и обеспечить ее интеграцию в национальные энергосистемы с учетом специфики региональных климатических условий. Автоматизированные системы управления производственными процессами, интеллектуальные платформы прогнозирования нагрузки и мониторинга состояния ВЭС способствуют минимизации операционных издержек и увеличению надежности электроснабжения.

¹⁹³ Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии. Вестн. ИргТУ. 2015, №9. – С. 133-140.

Развитие цифровых платформ для оптимального управления производством и распределением энергии, а также автоматизация управленческих процессов, основанных на машинном обучении и предиктивной аналитике, являются ключевыми драйверами роста сектора ветровой энергетики. Использование инновационных решений в цифровой экономике способствует повышению энергетической безопасности, снижению углеродного следа и расширению экспортного потенциала отечественных технологий в области возобновляемой энергетики.

3.3. Апробация модели мониторинга экономических показателей ВЭС

В результате апробации модели мониторинга экономических показателей ВЭС ожидается расширение генерации на базе ВИЭ, включая строительство новых ВЭС по конкурсным механизмам (ВЭС) в ближайшие годы благодаря разработанному механизму проведения конкурсов для выбора инвестиционных проектов по строительству генерирующих объектов, которые используют возобновляемые источники энергии. Это актуализирует вопросы оценки экономической эффективности ветроэнергетики посредством проектирования и алгоритмического моделирования.

В рамках национальной энергетической стратегии в ближайшие годы ожидается расширение генерации на базе ВИЭ, включая строительство новых ВЭС по конкурсным механизмам.

В ближайшие годы в России, благодаря разработанному механизму проведения конкурсов для выбора инвестиционных проектов по строительству генерирующих объектов, которые используют возобновляемые источники энергии. Это актуализирует вопросы оценки экономической эффективности ветроэнергетики посредством проектирования и алгоритмического моделирования.

Целью одного из основных российских отраслевых форсайт-проектов стала формирование стратегии перехода к экологически ориентированной экономике включало создание механизма приоритизации технологических направлений на основе экспертных сценариев.

Прогнозирование развития отечественной энергетики в рамках технологии форсайт-проектирования обусловлено возможностью применения принципов системного, комплексного, междисциплинарного и рискованного подходов. Применение при этом цифровых технологий обеспечивает скорость и качество обработки больших данных и предоставление наиболее вероятного результата.

Величины экономических показателей российской промышленности во многом коррелируют с нелинейной динамикой энергетических трендов. В статье разработан эффективный комплексно-сопряженный подход прогнозирования таких трендов. Он основан на комплексной экономико-технологической модели, которая сопряжена с базой данных климатических изменений.

Автором исследования предложена форсайт-методика¹⁹⁴, которая основывается на системном исследовании и анализе текущего состояния и потенциала ветровой энергетики РФ, выполнена статистическая обработка данных по производству ветровых установок, метеорологических и экономических показателей ветроэлектростанций в Ростовской и Исык-Кульской областях.

Оптимизация работы ВЭС требует комплексного подхода, включающего анализ климатических условий, технических характеристик установок, алгоритмическое моделирование и использование цифровых технологий. Основной целью модели является максимизация коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) с учетом региональных особенностей и сезонных колебаний воздушных потоков.

Для моделирования поведения объектов в различных условиях, с целью оптимизации их производительности и прогнозирования потенциальных проблем используются цифровые двойники (виртуальные копии реальных объектов или процессов)¹⁹⁵. Цифровые двойники могут быть созданы на основе данных, полученных от датчиков, установленных на реальных объектах, и могут работать как в онлайн, так и в офлайн-режиме. Модуль мониторинга и автоматического

¹⁹⁴ М.Ю. Мокшин. Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования. Энергетическая политика.

¹⁹⁵ Щукина В.М., Щукин Н.И. Формирование цифровой модели ветроэнергетической установки в составе цифрового двойника и её апробация на примере оценки эффективности применения ветроустановки в селе Онгурены // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2024. № 4 (36). С. 112-122.

регулирования является цифровым двойником ВЭС и позволяет моделировать сценарии работы. Данные передаются в систему управления мощностью, которая регулирует параметры турбин в реальном времени.

Систематический анализ экономических показателей ВЭС позволяет своевременно корректировать эксплуатационные режимы и итоговую экономическую эффективность проектов, а обработка больших данных и интеграция алгоритмов ML и вейвлет-анализа обеспечит полный цикл оценки экономической эффективности ВИЭ с помощью цифровой модели (рис.34).

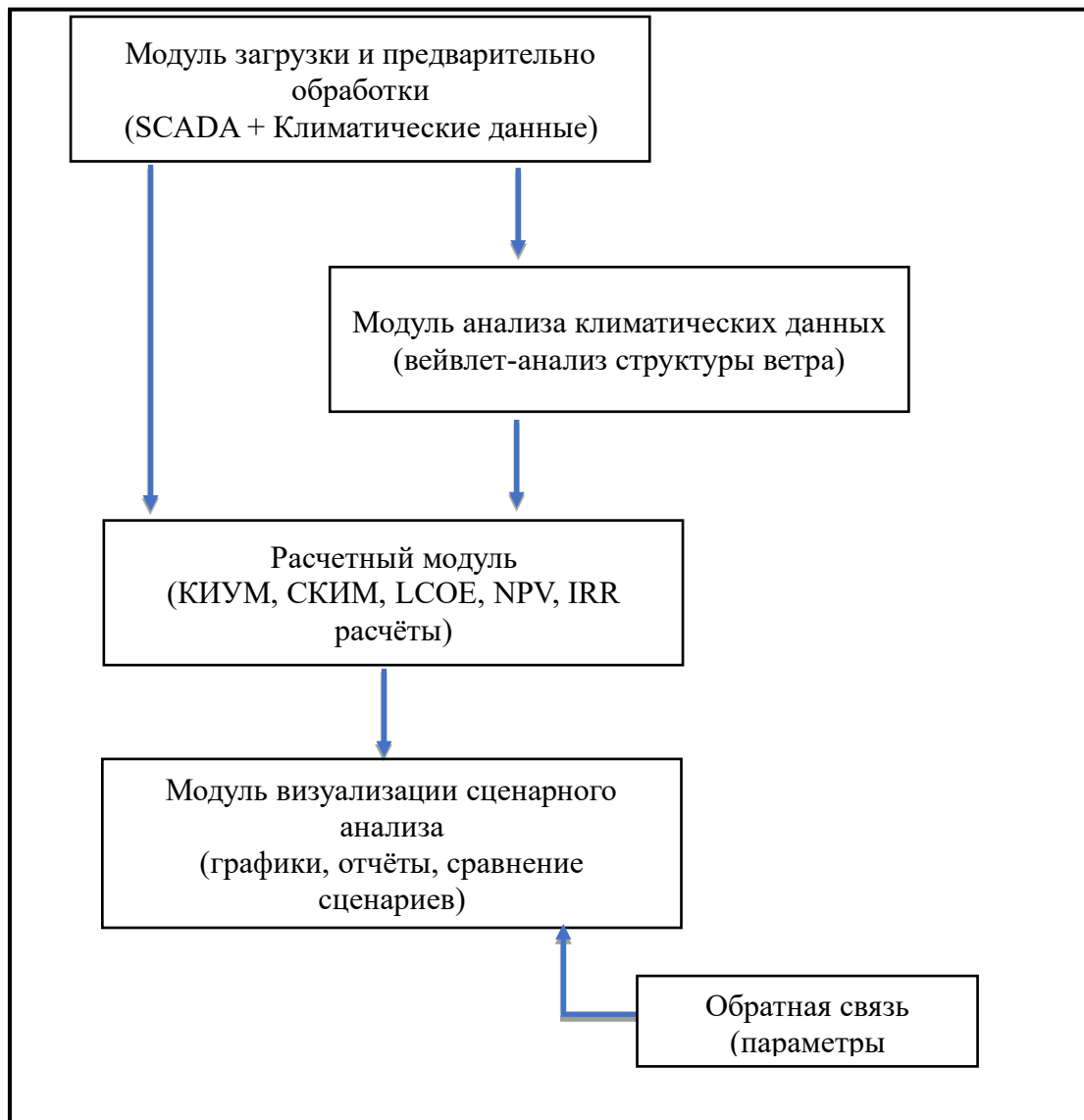


Рисунок 34. Информационно-функциональная модель системы оценки экономической эффективности ветроэнергетических установок.

Источник: составлено автором.

На основе обработанных данных автором было установлено:

1. В разделе о сезонной ветровой активности приведены расчёты средней скорости ветра, коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) и сезонных колебаний в Ростовской и Иссык-Кульской областях.

2. Целесообразно применение вейвлет-анализ для описания динамики скорости ветра. Имитационные расчёты сезонных профилей выработки электроэнергии также включены в цифровую модель мониторинга показателей работы ВЭС.

Следовательно, эффективное администрирование генерирующих объектов обеспечивается за счёт внедрения аналитических инструментов и цифровых систем оперативного управления. Инструменты цифрового анализа и управления производственно-энергетическими потоками становятся краеугольным элементом цифровизации ветроэнергетики и интеграции её в региональные экономические модели.

Использование цифровых инноваций является важным фактором для обеспечения устойчивого развития энергетической отрасли, обеспечения энергетической безопасности и продвижения технологий на экспорт.

Выводы по главе 3

Экономическая эффективность ветровой энергетики является интегральным показателем и определяется совокупностью многих факторов, включая технологические инновации, государственные механизмы стимулирования и глобальные энергетические тренды.

Было установлено, что в практике энергетической отрасли и по сей день используется зарубежное программное обеспечение для расчета показателей работы электростанций. Из-за специфики проведения ветроэнергетических расчетов и их достоверности в точке проведения, применение опыта зарубежных исследований затруднительно и не всегда подходит под условия работы российских ветростанций.

Исследователи выявили зависимость величины экономических показателей российской промышленности и нелинейной динамикой энергетических трендов и предложили эффективный комплексно-сопряженный подход прогнозирования таких трендов. Подход основан на комплексной экономико-технологической модели, которая сопряжена с базой данных климатических изменений.

Системы автоматизированного проектирования (САПР) уже являются неотъемлемой частью процесса проектирования ВЭС. САПР позволяют быстро создавать и модифицировать проекты, используя компьютерную модель ВЭС, что существенно сокращает время, необходимое на проектирование, и уменьшает вероятность ошибок, связанных с ручным вводом данных. Таким образом, цифровые двойники производственных объектов ВЭС являются важным инструментом для эффективного управления в различных режимах эксплуатации.

Настоящее положение дел в ветроэнергетике побудило российских ученых и исследователей на самостоятельное решение указанной проблемы, в том числе с помощью математического моделирования.

Проведенное исследование еще раз подтвердило постулат о том, что не существует универсального метода прогнозирования временных рядов, каждый метод находит свое применение для разных типов временного ряда. Для временных рядов, которые подвержены кризисным процессам лучшую эффективность дают методы на основе нейронных сетей.

Мониторинг данных о ВЭС Ростовской и Иссык-Кульской областей и исчисление экономических показателей работы ветроэлектростанции КУИМ, LCOE и IRR, систематический анализ экономических показателей проектов ВИЭ позволит своевременно корректировать эксплуатационные режимы и итоговую экономическую эффективность проектов в ветроэнергетике.

Интеграция прогнозных моделей с экономическими расчетами позволяет повысить точность оценки LCOE и доходности ВИЭ-проектов. Показана возможность применения краткосрочного и среднесрочного прогнозирования ветровой активности для оценки доходности ВЭС. Внедрение форсайт-подходов к прогнозированию развития отрасли позволит оптимизировать стратегическое

планирование и повысить инвестиционную привлекательность ветроэнергетики в долгосрочной перспективе.

Влияние сезонности ветровых колебаний на эффективность работы ВЭС обусловлена необходимостью вводить сезонные корректировки режимов, которые важны для поддержания рентабельности проектов и максимизации выработки электроэнергии. Прогнозируемое повышение ветровых скоростей увеличит NPV ВЭС на 3–5 %. Перенос ТО в периоды низкой ветровой активности и адаптивное эксплуатационное планирование увеличивают экономическую эффективность проектов ВЭС.

Частные и государственные инвестиции в проекты ВЭС обеспечивают прямой и мультипликативный экономический эффект, обосновывающий проекты в исследуемых регионах.

Инвестиции в проекты ВЭС обеспечивают прямой и мультипликативный экономический эффект, обосновывающий проекты ветроэнергетики в исследуемых регионах. Ростовская область демонстрирует лучшие экономические показатели и предпочтительна для реализации ВИЭ-проектов.

При оценке влияния уровней ветровой активности на производительность и экономический эффект работы ВЭС был сделан вывод: высокая ветровая активность значительно повышает выработку и экономическую эффективность проектов ВИЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях глобальных климатических изменений и необходимости перехода к низкоуглеродной экономике возобновляемая ветровая энергетика приобретает стратегическое значение. Помимо сокращения выбросов парниковых газов, она способствует повышению энергетической независимости и устойчивости национальных энергетических систем.

Несмотря на значительные технологические достижения, распространение ветровой энергетики в России сдерживается рядом факторов, включая экономическую эффективность, инфраструктурные ограничения и технологические барьеры. Средний коэффициент полезного действия ветрогенераторов составляет около 40%, что обусловлено переменной природой ветровых потоков и ограниченной возможностью полной утилизации кинетической энергии воздушных масс. Кроме того, географическая удалённость потребителей от точек генерации увеличивает капитальные затраты на строительство энергосетевой инфраструктуры и распределение электроэнергии.

Развитие ветроэнергетики обусловлено совокупностью экономических, технологических и климатических факторов, что требует комплексного подхода к прогнозированию и моделированию. В настоящее время в России не существует единых подходов к определению основных характеристик ветра в предполагаемой точке строительства ВЭС и нет единых методик для прогнозирования параметров ветра, как на краткосрочный, так и среднесрочные интервалы времени.

Оценка экономической эффективности сооружения парков ветроэнергоустановок представляет собой сложную технико-экономическую задачу, требующую учета соотношения цен на замещаемое топливо и стоимости ветровых турбин, реальных ветровых условий и режимных особенностей работы ВЭУ в составе энергосистемы. По мере совершенствования конструкции ветротрубин и удешевления их стоимости, масштабы развития ветроэнергетики будут расширяться, а стоимость вырабатываемой единицы электроэнергии будет дешеветь.

В диссертационной работе приведено сравнение показателей: средней скорости ветра, сезонных колебаний, годовой выработки электроэнергии, сезонных значений КИУМ между Ростовской и Исык-Кульской областями. Системный анализ экономических показателей проектов ВИЭ позволит своевременно корректировать эксплуатационные режимы и итоговую экономическую эффективность проектов в сфере ветроэнергетики.

В ходе проведения работы установлено, что анализ больших данных для формирования экономических показателей целесообразно проводить с использованием готовых цифровых решений.

Проведённое научное исследование подтвердило высокую актуальность и практическую значимость разработки цифровой методики мониторинга экономических показателей проектов ветровой генерации.

В результате выполнения диссертационного исследования автором получены следующие результаты и сделаны выводы:

1. Обоснована актуальность разработки цифровых методик мониторинга экономических показателей ветрогенерации в условиях энергетического перехода и необходимости повышения инвестиционной привлекательности проектов ВИЭ.

2. Установлено, что существующие подходы к оценке экономической эффективности ВЭС не учитывают климатическую изменчивость и региональную специфику, что снижает точность прогнозов и увеличивает риски при принятии инвестиционных решений.

3. Автором предложена цифровая модельная методика, включающая алгоритмы анализа сезонных и региональных ветровых потоков, основанные на применении вейвлет-преобразования, расчёта КИУМ и структурного коэффициента мощности.

4. Разработанная методика позволяет в реальном времени оценивать эффективность использования установленной мощности ветропарков, а также адаптировать режимы их работы в зависимости от сезонных климатических условий.

5. В диссертации построена экономико-математическая модель, позволяющая рассчитывать экономический эффект от внедрения ВЭУ с учётом регионального дефицита энергии, замещаемой генерации и тарифных характеристик.

6. Показано, что применение цифрового мониторинга в динамических условиях эксплуатации ВЭС способствует снижению издержек, оптимизации загрузки оборудования и увеличению сроков безубыточной работы объектов.

7. В рамках апробации модели проведён анализ двух регионов — Ростовской области и Исык-Кульской области, характеризующихся различными ветровыми и энергетическими профилями.

8. Доказано, что применение адаптивной модели управления мощностью ВЭС на указанных территориях обеспечивает увеличение выработки до 11,5% в зимние периоды и, как следствие, рост NPV проектов на сопоставимую величину.

9. Проведённый расчёт IRR, NPV и LCOE подтвердил высокую чувствительность эффективности проектов к сезонным ветровым режимам, что делает разработанную методику универсальным инструментом для принятия инвестиционных решений.

10. Сформулированы практические рекомендации для АО «Новавинд» и других операторов ВЭС по использованию модели при планировании ввода новых мощностей и модернизации действующих объектов.

Результаты исследования интегрируются в концепцию устойчивого развития энергетики России и могут быть использованы в стратегическом и проектном управлении при строительстве объектов ВИЭ.

Таким образом, цели исследования достигнуты, поставленные в диссертационном исследовании задачи выполнены, что подтверждает научную и практическую значимость проделанной работы.

Практическая ценность исследования заключается в возможности прямого внедрения результатов в деятельность промышленных предприятий, энергетических компаний, а также в разработку региональных программ по ВИЭ.

Результаты апробированы на данных Ростовской и Иссык-Кульской областей и получили подтверждение экономической применимости.

Разработанная методика и проведённые расчёты формируют прочную основу для научного и прикладного продолжения работы в сфере экономической эффективности ветроэнергетики, а также её интеграции в стратегическое планирование развития энергетики России и стран СНГ.

Авторское исследование о мониторинге данных о ВЭС Ростовской и Иссык-Кульской областей показало следующие результаты: сравнительный анализ сезонных ветровых условий и КИУМ Ростовской и Иссык-Кульской областей выполнен, экономические показатели выработки энергии приведены частично, исходя из доступных данных.

В настоящее время, одним из эффективных вариантов генерации электроэнергии для конкретной территории должна быть взаимодополняющая модель совокупности разных источников энергии в энергосистеме страны, в конкретном регионе и даже населенном пункте. С целью достижения эффективности в том числе стоит рассматривать электростанции комбинированного типа, принимая во внимание потребности в электроэнергии, увязанной с ростом и плотностью населения, развития промышленности и экономики, природным ландшафтом местности.

Заявленная автором работы гипотеза о планомерном увеличении объема мощности и уменьшение стоимости единицы производства электроэнергии посредством ветрогенерации возможна к реализации, в том числе, за счет цифрового мониторинга экономических и технических характеристик работы ветроэлектростанций и органично вписывается в развитие российского ТЭК. В целях достижения эффективности работы электроэнергетической системы страны рекомендуется рассматривать электростанции комбинированного типа.

Будущее отечественной ветроэнергетики представляет собой перспективное направление диверсификации энергетического баланса, особенно в контексте снижения зависимости от импорта энергоносителей и уменьшения экологического воздействия на окружающую среду. В частности, интеграция ветроэнергетических

технологий в атомный сектор может способствовать созданию гибридных энергетических систем, повышающих устойчивость электроснабжения и снижению операционных затрат.

Госкорпорация «Росатом» активно развивает направления, связанные с интеграцией атомной и ветровой энергетики, что позволяет значительно повысить устойчивость национальной энергетической системы. Развитие данных технологий направлено на решение проблем, связанных с надежностью энергоснабжения, снижением углеродного следа и обеспечением стратегической энергетической безопасности страны. Интеграция атомной и ветровой энергетики открывает новые перспективы для формирования гибридных энергосистем, сочетающих высокую мощность традиционных атомных станций с переменной генерацией ветроустановок. Такой подход способствует увеличению доли возобновляемых источников энергии в общем энергобалансе, а также минимизации рисков, связанных с колебаниями нагрузки и изменчивостью погодных условий.

Использование передовых цифровых технологий и алгоритмов прогнозирования в энергетическом секторе позволяет оптимизировать управление производством и распределением электроэнергии. Анализ климатических данных и технологических трендов показывает, что комбинированные энергосистемы обеспечивают более стабильное энергоснабжение при снижении зависимости от ископаемого топлива.

В настоящее время ветроэнергетика имеет большой потенциал для развития как в мире, так и в России. Ожидается, что до 2035 года будет введено 15 ГВт новых мощностей ВИЭ в рамках решения глобальных климатических задач. Наряду с имеющимися ограничениями и минусам, ветряные турбины не загрязняют окружающую среду и не производят вредных выбросов, использование ветряной энергии помогает снизить потребление воды, поскольку для ее производства не требуется водных ресурсов.

Обобщая итоги, можно с уверенностью утверждать, что мировая энергетика в наибольшей степени зависит от геополитики, которая определит возможности в трансфере технологий, наличия ограничений в торговых потоках, способности

вырабатывать совместные подходы к регулированию внешнеэкономической деятельности и преодолению барьеров в мировой торговле.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВИЭ – возобновляемые источники энергии

ВЭС – ветроэлектростанция

ВЭУ – ветроэнергоустановка, ветроагрегат, ветряная турбина

ТЭС – теплоэлектростанция

ГЭС – гидроэлектростанция

АЭС – атомная электростанция

ЕЭС России – Единая энергетическая система России

РФ – Российская Федерация

ЕС – Европейский союз

США – Соединенные штаты Америки

Росстат – Государственное управление статистики РФ

КР – Кыргызская республика

IRENA – International Renewable Energy Agency. Международное агентство по возобновляемым источникам энергии IRENA — межгосударственная международная организация.

GWEC – Global Wind Energy Council. Глобальный совет по ветроэнергетике.

СНГ – Содружество независимых государств.

Росатом – государственная корпорация по атомной энергии, российский государственный холдинг, объединяющий более 400 предприятий атомной отрасли РФ.

САПР – система автоматического проектирования.

САЭП – система автономного электроснабжения.

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition. Система диспетчерского управления и сбора данных.

КУИМ – коэффициент использования установленной мощности электростанции

IRR – процентная доходность проекта (в данном случае – ВЭС).

NVP – Net Present Value. Чистая приведенная стоимость проекта.

LCOE – себестоимость выработки 1 МВт*ч энергии за весь срок работы электростанции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ И ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамов, В. А. Формирование механизмов управления устойчивым развитием экономики промышленных отраслей и комплексов / В. А. Абрамов, А. В. Путилов, Е. Ф. Шамаева // Энергетическая политика. – 2023. – № 2 (180). – С. 40–53.
2. Агапова, И. И. История экономической мысли: курс лекций / И. И. Агапова. – М.: Экмос, 1998. – 245 с.
3. Азрилиан, А. Н. Экономика: понятия, категории, термины / А. Н. Азрилиан. – М.: Институт новой экономики, 2023. – 512 с.
4. Алиходжина, Н. В. Обзор существующих моделей и методов расчета основных характеристик ветра в определенной точке / Н. В. Алиходжина, М. Г. Тягунов, Т. А. Шестопалова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2024. – Т. 16, № 3 (63). – С. 76–93.
5. Альтернативная энергетика: перспективы развития рынка ВИЭ в России [Электронный ресурс] // Деловой профиль: [сайт]. – 2021. – 28 апр. – Режим доступа: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/alternativnaya-energetika-perspektivy-razvitiya-rynka-vie-v-rossii/> (дата обращения: 12.06.2025).
6. Анализ и оценка технологий использования возобновляемых источников энергии в Кыргызстане и их вклад в смягчение последствий изменения климата. Июнь 2022. Аналитический документ [Электронный ресурс] / Н. Абдырасулова, Ч. Сапарова, Б. Аскарбеков // MoveGreen: [сайт]. – Режим доступа: https://movegreen.kg/wp-content/uploads/2022/09/research_redo_29_august_final-1-1.pdf (дата обращения: 12.06.2025).
7. Аникина, И. Д. От статических нормативов к динамическому цифровому моделированию характеристик [Электронный ресурс] / И. Д. Аникина // Энергетика и промышленность России. – 2025. – № 03-04 (503-504). – Режим доступа: <https://www.eprussia.ru/epr/503-504/145371.htm> (дата обращения: 17.05.2025).

8. Архиреев, А. В. Генезис понятия эффективности. Структура, состояние, оценка / А. В. Архиреев // Контекст и рефлексия: философия о мире и человеке. – 2023. – Т. 12, № 10А. – С. 36–49.
9. Асаул, А. Н. Эффективность предпринимательской деятельности / А. Н. Асаул. – СПб.: ИПРЭ, 2022. – 280 с.
10. Бариленко, В. И. Анализ хозяйственной деятельности: учебное пособие / В. И. Бариленко. – М.: Омега-Л, 2013. – 363 с.
11. Богданец, С. Цифровые двойники и виртуальные мельницы: как моделирование меняет горнодобывающую и металлургическую промышленность [Электронный ресурс] / С. Богданец // ComNews: [сайт]. – 2024. – 05 февр. – Режим доступа: <https://www.comnews.ru/content/231388/2024-02-05/2024-w06/1013/cifrovye-dvoyniki-i-virtualnye-melnicy-kak-modelirovanie-menyaet-gornodobyvayuschuyu-i-metallurgicheskuyu-promyshlennost> (дата обращения: 20.05.2025).
12. Боголюбова, Н. П. Микроэкономическая теория: фирма в производстве и в сфере обмена: учебное пособие / Н. П. Боголюбова. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2018. – 189 с.
13. Болдырев, С. В. Использование вейвлет-преобразования в системах обработки и анализа сигналов / С. В. Болдырев // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 7. – С. 93–94.
14. Болквадзе, И. Р. Концепция системы мониторинга экономического состояния промышленного предприятия [Электронный ресурс] / И. Р. Болквадзе // Корпоративный менеджмент: [сайт] – Режим доступа: <https://www.cfin.ru/bandurin/article/sbrn05/03.shtml> (дата обращения: 19.06.2025).
15. Большой экономический словарь / под ред. А. Н. Азрилияна. – 7-е изд., доп. – М.: Институт новой экономики, 2007. – 1472 с.
16. Большой экономический словарь: экономика, финансы, бухгалтер, налоги, страхование, маркетинг, менеджмент, управление / авт. и сост. А. Б. Борисов. – М.: Книжный мир, 2003. – 895 с.

17. Борисов, М. Г. Развитие систем хранения электрической энергии: новые возможности для стран Востока / М. Г. Борисов // Восточная аналитика. – 2021. – № 1. – С. 22–32.
18. Бусько, Н. П. Влияние изменения климата на использование природных ресурсов и энергетику [Электронный ресурс] / Н. П. Бусько, Л. Г. Основина // Репозиторий Полесского государственного университета: [сайт]. – Режим доступа: <https://rep.polessu.by/bitstream/123456789/30206/1/Vliianie.pdf> (дата обращения: 12.06.2025).
19. Бухтияров, А. А. Экономическая целесообразность малых ветряных турбин / А. А. Бухтияров // Эпомен. – 2019. – № 27. – С. 91–95.
20. Бушукина, В. И. Особенности развития возобновляемой энергетики в мире и в России / В. И. Бушукина // Финансовый журнал. – 2021. – Т. 13, № 5. – С. 93–107.
21. В Москве в 2025 году будут действовать новые тарифы на электрическую энергию [Электронный ресурс] // Мосэнергосбыт: [сайт]. – 2024. – 20 дек. – Режим доступа: <https://www.mosenergosbyt.ru/individuals/news/v-moskve-v-2025-godu-budut-deystvovat-novye-tarify-na-elektricheskuyu-energiyu/> (дата обращения: 20.06.2025).
22. Ветроэнергетика бьет рекорды: 2023 год стал годом стремительного роста [Электронный ресурс] // Рамблер. Личные финансы: [сайт]. – 2024. – 25 апр. – Режим доступа: <https://finance.rambler.ru/business/52665071/> (дата обращения: 17.06.2025).
23. Ветроэнергетика в возобновляемой энергетике [Электронный ресурс] // Renwex 2026: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.renwex.ru/ru/ii/vetroehnergetika/> (дата обращения: 03.06.2025).
24. Витушкина, М. Г. Развитие механизма мониторинга устойчивости предприятий с длительным производственным циклом (на примере судостроительной промышленности): автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Витушкина Марина Геннадиевна. – М., 2020. – 28 с.

25. Возобновляемая энергетика России: рекорды 2024 года и планы на будущее [Электронный ресурс] // Национальное информационное агентство Экология: [сайт]. – 2024. – 03 дек. – Режим доступа: <https://nia.eco/2024/12/03/94559/> (дата обращения: 03.06.2025).

26. Глазьев, С. Ю. Глобальная трансформация через призму смены технологических и мирохозяйственных укладов / С. Ю. Глазьев // AlterEconomics. – 2022. – Т. 19, № 1. – С. 93–115.

27. Глушак, В. В. Экономическая сущность эффективности деятельности организации [Электронный ресурс] / В. В. Глушак // Молодой ученый. – 2019. – № 14 (252). – С. 97–99. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/252/57787/> (дата обращения: 13.06.2025).

28. ГОСТ Р 51237–98 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. – М.: Госстандарт России, 1998. – 11 с.

29. ГОСТ Р 51380–99 Энергосбережение. Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции их нормативным значениям. Общие требования. – М.: Госстандарт России, 1999. – 6 с.

30. Гэлбрейт, Дж. К. Новое индустриальное общество / Дж. К. Гэлбрейт. – М.: АСТ, 2019. – 460 с.

31. Данилин, О. Принципы разработки ключевых показателей эффективности (КПЭ) для промышленных предприятий и практика их применения [Электронный ресурс] / О. Данилин // Корпоративный менеджмент: [сайт]. – Режим доступа: https://www.cfin.ru/management/strategy/plan/industry_keyindicators.shtml (дата обращения: 23.05.2025).

32. Двас, Г. В. Ветроэнергетика как фактор устойчивости региональных экономических систем / Г. В. Двас, Е. Г. Цыплакова, Р. Р. Никифоров // Общество: политика, экономика, право. – 2023. – № 6 (119). – С. 87–93.

33. Демченко, З. А. Экономическая эффективность предприятия: понятие, сущность, показатели, способы определения / З. А. Демченко, Е. И. Быковский // Наука XXI века: сборник научных статей по итогам Международной научно-

практической конференции (Санкт-Петербург, 12 апреля 2016 г.). – СПб.: Культ-Информ-Пресс, 2016. – С. 141–145.

34. Единая энергетическая система России [Электронный ресурс] // Большая российская энциклопедия: [сайт]. – Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/edinaia-energeticheskaja-sistema-rossii-ees-rossii-bc18fc> (дата обращения: 28.05.2025).

35. ЕЭС 2022 [Электронный ресурс] // Системный оператор единой энергетической системы: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.sops.ru/functioning/ups/ups2022/> (дата обращения: 09.06.2025).

36. Журавлева, Г. П. Микроэкономика: теория и практика / Г. П. Журавлева, Ю. А. Поздняков, Н. А. Поздняков. – М.: Юрайт, 2022. – 432 с.

37. Журавлева, Г. П. Экономическая теория. Микроэкономика: учебник / Г. П. Журавлева, Ю. А. Поздняков, Н. А. Поздняков. – М.: ИНФРА-М, 2010. – 400 с.

38. Зубакин, В. А. Экономическая эффективность электростанций на возобновляемых источниках энергии на примере показателя LCOE / В. А. Зубакин // СОК. – 2024. – № 10. – С. 72–75.

39. Иваницкий, В. С. Оценка экономической эффективности функционирования предприятия в рыночных условиях: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05; 08.00.10 / Иваницкий Виктор Сергеевич. – Екатеринбург, 2003. – 149 с.

40. Илюшина, О. С. Анализ методических подходов к оценке экономической эффективности деятельности предприятия / О. С. Илюшина, Ю. К. Стуколова // Молодой ученый. – 2017. – № 19 (153). – С. 127–131.

41. Итоги социально-экономического развития Ростовской области за 2022 год [Электронный ресурс] // Официальный портал Правительства Ростовской области: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.donland.ru/result-report/1699/> (дата обращения: 23.04.2025).

42. К вопросу об экономике возобновляемых источников энергии / К. С. Дегтярев, А. М. Залиханов, А. А. Соловьев, Д. А. Соловьев // Энергия: экономика, техника, экология. – 2016. – № 10. – С. 10–20.

43. Калмацкий, М. Россия наряду с традиционной генерацией активно развивает возобновляемые источники энергии [Электронный ресурс] / М. Калмацкий // Российская газета: [сайт]. – 2023. – 22 дек. – Режим доступа: <https://rg.ru/2023/12/22/kilovatt-stanovitsia-chishche.html> (дата обращения: 22.05.2025).

44. Карамов, Д. Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии / Д. Н. Карамов // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 9 (104). – С. 133–140.

45. Киндратышин, Р. Энергетическая система России: прогноз на 2023-2028 годы [Электронный ресурс] / Р. Киндратышин // Conomy: [сайт]. – Режим доступа: <https://conomy.ru/analysis/articles/1020> (дата обращения 17.06.2025).

46. Клавдеева, В. Ключевые экономические показатели предприятия: как рассчитать и анализировать [Электронный ресурс] / В. Клавдеева // Управляем предприятием: [сайт]. – Режим доступа: <https://upr.ru/article/klyuchevye-ekonomicheskie-pokazateli-predpriyatiya-kak-rasschitat-i-analizirovat/> (дата обращения: 18.06.2025).

47. Козырев, В. М. Основы современной экономики: учебник / В. М. Козырев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 432 с.

48. Комплексный экономический анализ: учебное пособие / Л. Н. Бондарева, И. В. Климентьева, М. М. Микушина [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2018. – 152 с.

49. Кулагин, В. А. Прогноз развития энергетики мира и России до 2050 года / В. А. Кулагин, Д. А. Грушевенко, А. А. Галкина // Современная мировая экономика. – 2024. – Т. 2, № 1 (5). – С. 6–22.

50. Ланьшина, Т. Прогноз развития ВИЭ в России до 2035 года / Т. Ланьшина // Научный вестник ИЭП им. Гайдара. – 2019. – № 9. – С. 40–47.

51. Лапаева, О. Ф. Современные проблемы и перспективы развития топливно-энергетического комплекса / О. Ф. Лапаева, О. А. Иневатова, С. А. Дедеева // Экономические отношения. – 2019. – Т. 9, № 3. – С. 2129–2142.

52. Лапшин, Ю. Перспективы развития безбашенной ветроэнергетики / Ю. Лапшин // Norwegian Journal of Development of the International Science. – 2022. – № 95. – С. 78–82.

53. Лихачев, В. Н. Ресурсный подход к оценке экономической эффективности производства / В. Н. Лихачев, Н. Н. Пушкина // Социально-экономическое управление : теория и практика. – 2022. – Т. 18, № 4. – С. 13–26.

54. Манукиян, Е. Эксперты рассказали, где в России самая дешевая и самая дорогая электроэнергия [Электронный ресурс] / Е. Манукиян // Российская газета. – 2025. – 11 янв. – Режим доступа: <https://rg.ru/2025/01/11/reg-dfo/eksperty-rasskazali-gde-v-rossii-samaia-deshevaia-i-samaia-dorogaia-elektroenergiia.html> (дата обращения: 11.06.2025).

55. Маркс, К. К критике политической экономии / К. Маркс. – М.: Либроком, 2012. – 178 с.

56. Международный опыт развития инфраструктуры инновационной деятельности: материалы I Международного форума «От науки к бизнесу», Санкт-Петербург, 17-19 мая 2007 г.; ред. Г. А. Гош. – Тверь: [б. и.], 2008. – 314 с.

57. Михалева, О. Л. Теоретические аспекты комплексной оценки экономической эффективности деятельности организации / О. Л. Михалева // Экономика и управление: анализ тенденций и перспектив развития. – 2013. – № 8. – С. 243–252.

58. Мокшин, М. Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования / М. Мокшин, А. В. Путилов // Энергетическая политика. – 2023. – № 12. – С. 80–91.

59. Мокшин, М. Ю. Исследование методов и моделей прогнозирования мощности ветроэнергостанций / М. Ю. Мокшин, А. В. Путилов, О. Н. Римская // Энергетическая политика. – 2025. – № 2 (205). – С. 56–66.

60. Мокшин, М. Ю. Программно-инвестиционное обеспечение мониторинга показателей стратегического планирования ресурсов / М. Ю. Мокшин // Современные проблемы физики и технологий: материалы X

Международной молодежной школы-конференции (Москва, 25–27 апреля, 2023 г.). – М.: НИЯУ МИФИ, 2023. – С. 348–351.

61. Мокшин, М. Ю. Состояние топливно-энергетического комплекса России и пути развития в условиях четвертого энергетического перехода / М. Ю. Мокшин, М. Г. Жабицкий, О. Н. Римская // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2025. – № 16 (1). – С. 55–68.

62. Молчанова, Л. А. Особенности проектов альтернативной энергетики и специфика управления ими / Л. А. Молчанова, К. К. Молчанов // Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. – 2023. – № 1. – С. 62–69.

63. Мочалов, Д. О. Применение комплексов моделирования в реальном времени для современных энергосистем нефтегазовых предприятий / Д. О. Мочалов, Я. В. Законьшек, Н. А. Шамис // Экспозиция Нефть Газ. – 2014. – № 7 (39). – С. 79–82.

64. Мухина, И. А. Управление эффективностью предприятия на основе ключевых показателей (KPI) / И. А. Мухина. – М.: Финансы и статистика, 2020. – 248 с.

65. Наминова, К. А. Современное состояние страхования рисков сельскохозяйственных организаций с государственной поддержкой в России / К. А. Наминова // Апробация. – 2016. – № 7 (46). – С. 100–105.

66. Некрасов, С. А. Снижение издержек на интеграцию возобновляемых источников электроэнергии в энергосистему – путь повышения доступности возобновляемой энергетики / С. А. Некрасов // Теплоэнергетика. – 2021. – № 8. – С. 5–16.

67. О внесении изменений в акты Правительства Российской Федерации: Распоряжение Правительства РФ от 28.07.2015 № 1472-р [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_183717/ (дата обращения: 08.06.2025).

68. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие энергетики»: Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 № 321

[Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162194/ (дата обращения: 08.06.2025).

69. Об утверждении комплекса мер стимулирования производства электрической энергии генерирующими объектами, функционирующими на основе использования возобновляемых источников энергии: Распоряжение Правительства РФ от 04.10.2012 № 1839-р (ред. от 28.07.2015) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_136181/ (дата обращения: 08.06.2025).

70. Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации: Постановление Правительства РФ от 21.09.2021 №1587 [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_396203/ (дата обращения: 08.06.2025).

71. Об утверждении регионального плана адаптации к изменениям климата в Ростовской области: Распоряжение Правительства Ростовской области от 11.05.2022 № 285 [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.consultant.ru/regbase/cgi/online.cgi?req=doc&base=RLAW186&n=120872#t9G8soUQKShA7YCs> (дата обращения: 08.06.2025).

72. Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_399657/ (дата обращения: 08.06.2025).

73. Об утверждении Стратегия социально-экономического развития Ростовской области на период до 2030 года: Постановление Правительства Ростовской области от 26.12.2018 № 864 (ред. от 19.12.2022 № 1100) [Электронный

ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.consultant.ru/regbase/cgi/online.cgi?req=doc&base=RLAW186&n=91972#QiUHsoUquvGUnCMm2> (дата обращения: 08.06.2025).

74. Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2019–2025 годы: Приказ Минэнерго России от 28.02.2019 № 174 [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_325453/ (дата обращения: 08.06.2025).

75. Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2025–2030 годы: Приказ Минэнерго России от 29.11.2024 № 2328 [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=865807#BSJ6soUObyJlj0TF1> (дата обращения: 08.06.2025).

76. Об утверждении Энергетической стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_354840/ (дата обращения: 08.06.2025).

77. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ (дата обращения: 18.06.2025).

78. Обороина, О. Е. Экономическая эффективность: понятие и сущность / О. Е. Обороина // Молодой ученый. – 2020. – № 23 (313). – С. 427–429.

79. Общая мощность объектов ВИЭ в России на 1 декабря 2022 г. составила 5,68 ГВт [Электронный ресурс] // Energyland.info: [сайт]. – 2022. – 21 дек. – Режим доступа: <https://energyland.info/analitic-show-237562> (дата обращения: 23.05.2025).

80. Оценка компании сравнительным подходом [Электронный ресурс] // Энциклопедия Альт-Инвест: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.alt-invest.ru/wp-content/uploads/market-based.pdf> (дата обращения: 15.05.2025).

81. Оценка эффективности предприятия: критерии и методики [Электронный ресурс] // Bitcop: [сайт]. – Режим доступа: <https://bitcop.ru/blog/ocenka-jeffektivnosti-predprijatija-kriterii-i-metodiki> (дата обращения: 25.04.2023).

82. Панфилов, А. А. Обоснование основных параметров ветроэлектрических установок с учётом природно-климатических условий Российской Федерации / А. А. Панфилов // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 11 (151). – С. 49–55.

83. Первый зелёный гигаватт [Электронный ресурс] // Коммерсант: [сайт]. – 2023. – 23 нояб. – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/6350608> (дата обращения: 23.05.2024).

84. Переводим цели в цифры: как определить KPI [Электронный ресурс] // Яндекс Практикум: [сайт]. – 2022. – 24 нояб. – Режим доступа: <https://practicum.yandex.ru/blog/pokazateli-effektivnosti-kpi/> (дата обращения: 24.05.2025).

85. Плетнев, Д. С. Устойчивость и эффективность корпораций в условиях цифровой трансформации / Д. С. Плетнев. – М.: Наука, 2021. – 304 с.

86. Поликарпов, М. Д. Рассмотрение понятия экономической эффективности в современных условиях / М. Д. Поликарпов // Вестник науки. – 2023. – № 5 (62). – С. 75–80.

87. Политическая экономия Д. Рикардо [Электронный ресурс] // Ricardoeconomy: [сайт]. – Режим доступа: <https://ricardoeconomy.tilda.ws/> (дата обращения: 18.05.2025).

88. Применение компьютерного моделирования ветроэнергетической установки / О. Б. Тихонова, Д. В. Русяков, Л. В. Ларина, Я. С. Давыдов // Техно-технологические проблемы сервиса. – 2016. – № 3 (37). – С. 36–38.

89. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года [Электронный ресурс] // ИНЭИ РАН Аналитический центр при Правительстве РФ: [сайт]. – Режим доступа: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/789.pdf> (дата обращения: 01.05.2025).

90. Программы для электроэнергетики [Электронный ресурс] // pickTech: [сайт]. – Режим доступа: <https://picktech.ru/catalog/power-industry-software/> (дата обращения: 01.06.2025).

91. Путилов, А. В. Цифровые технологии прогнозирования и планирования развития атомной энергетики / А. В. Путилов, В. Н. Червяков, И. Н. Матицин // Энергетическая политика. – 2018. – № 5. – С. 87–98.

92. Путин: энергобаланс РФ – один из самых «зеленых» в мире [Электронный ресурс] // Энергетика и промышленность России: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.eprussia.ru/news/base/2024/7360342.htm> (дата обращения: 01.06.2025).

93. Равинский, А. Как получить государственное финансирование на «зеленый» проект [Электронный ресурс] / А. Равинский // EcoStandard: [сайт]. – Режим доступа: <https://journal.ecostandard.ru/esg/ustoychivoe-razvitie/kak-poluchit-gosudarstvennoe-finansirovanie-na-zelenyy-proekt/> (дата обращения: 23.05.2025).

94. Райзберг, Б. А. Современный экономический словарь / Б. А. Райзберг, Л. Ш. Лозовский, Е. Б. Стародубцева. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 512 с.

95. Рахимова, Ю. И. Цифровые двойники в промышленности: обзор технологий и проблемы внедрения [Электронный ресурс] / Ю. И. Рахимова // СОК. – 2024. – № 4. – С. 22–24. – Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/articles/cifrovye-dvoyniki-v-promyshlennosti-obzor-tehnologiy-i-problemy-vnedreniya> (дата обращения: 19.05.2025).

96. Регионы России: социально-экономические показатели – 2023: статистический сборник [Электронный ресурс] / под. ред. С. Н. Егоренко // Росстат: [сайт]. – Режим доступа: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2023.pdf (дата обращения: 06.05.2025).

97. «Росатом» внедрит уникальную систему управления электроэнергией на Кармалиновской ВЭС [Электронный ресурс] // Сетевое издание РУБЕЖ: [сайт]. – 2025. – 06 марта. – Режим доступа: <https://ru-bezh.ru/press-releases/rosatom-vnedrit-unikalnuyu-sistemu-upravleniya-elektroenergiiy-n> (дата обращения: 06.05.2025).

98. Российская электроэнергетика: 20 лет реформ: аналитический отчет. [Электронный ресурс] // Аналитический центр ТЭК: [сайт]. – Режим доступа: https://actek.group/russian_electric_power_industry/ (дата обращения: 14.06.2025).

99. Рыжкова, Т. В. Оценка эффективности деятельности предприятий (история и современность теории и методологии) / Т. В. Рыжкова, Л. В. Горелова // Вестник Екатеринбургского института. – 2013. – № 4 (24). – С. 51–55.

100. Рынок возобновляемой энергетики России. Текущий статус и перспективы развития: информационный бюллетень – 2024 [Электронный ресурс] // Ассоциация развития возобновляемой энергетики: [сайт]. – Режим доступа: https://rreda.ru/upload/iblock/c86/ck53fh9u065blilscovlumxq02gqvkcx/202408_RREDA_annual_RES_report.pdf (дата обращения: 13.06.2025).

101. Савина, Н. В. Применение технологии цифровых двойников на цифровых подстанциях / Н. В. Савина, Д. С. Покровский // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2023. – № 101. – С. 83–87.

102. Савицкая, Г. В. Критерии и показатели экономической эффективности бизнеса / Г. В. Савицкая // Журнал исследований по управлению. – 2017. – Т. 3, № 2. – С. 26–48.

103. Сидоренко, Г. И. Модель оптимизации параметров ветровой электростанции / Г. И. Сидоренко, А. Алджамил // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). – 2021. – № 1 (82). – С. 35–41.

104. Сидорович, В. Российская отрасль ВИЭ в международных сравнениях [Электронный ресурс] / В. Сидорович // RenEn: [сайт]. – 2020. – 06 нояб. – Режим доступа: <https://renen.ru/rossijskaya-otrasl-vie-v-mezhdunarodnyh-sravneniyah/> (дата обращения: 06.06.2025).

105. Сидорович, В. Интеграция ВИЭ в энергосистему: практика, мифы и легенды [Электронный ресурс] / В. Сидорович // RenEn: [сайт]. – 2017. – 13 июня. – Режим доступа: <https://renen.ru/integration-of-res-into-the-energy-system-practice-myths-and-legends/> (дата обращения: 06.06.2025).

106. Сколько атомных станций работает в мире и в России? [Электронный ресурс] // Росатом: [сайт]. – Режим доступа: <https://rosatommd.ru/mediacenter/informatoriy/skolko-atomnyix-stanczij-rabotaet-v-mire-i-v-rossii.html> (дата обращения: 13.06.2025).

107. Современные технологии в мировом научном пространстве: методы, модели, прогнозы: коллективная монография / Л. М. Божко, Г. Г. Воскресенский, А. В. Жданова [и др.]; под общ. ред. А. Б. Черемисина. – Петрозаводск: Новая наука, 2020. – 273 с.

108. Соколов, И. Л. Гид по цифровому производству: цифровое имитационное моделирование производственных систем [Электронный ресурс] / И. Л. Соколов // Управление производством: [сайт]. – Режим доступа: https://up-pro.ru/library/information_systems/automation_project/cifrovoe-imitacionnoe-modelirovanie/ (дата обращения: 01.06.2025).

109. Соркин, С. Л. Эффективность внешнеэкономической деятельности: понятие, измерение и оценка / С. Л. Соркин. – Гродно: РГГУ, 2011. – 130 с.

110. Социально-экономическое положение Иссык-Кульской области за январь-декабрь 2022 [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Кыргызской Республики: [сайт]. – Режим доступа: <https://stat.gov.kg/ru/statistika-issyk-kulskoj-oblasti/> (дата обращения: 23.05.2025).

111. Сравнение Системы анализа эффективности предприятия [Электронный ресурс] // Soware: [сайт]. – Режим доступа: <https://soware.ru/categories/enterprise-performance-analysis-systems/free-charge> (дата обращения: 02.02.2025).

112. Статистика ВИЭ [Электронный ресурс] // Ассоциация развития возобновляемой энергетики: [сайт]. – Режим доступа: <https://rreda.ru/industry/statistics/> (дата обращения: 01.05.2025).

113. Степанов, С. Ф. Обеспечение эффективной работы мультимодульной ветроэлектростанции при изменении скорости ветра и нагрузки [Электронный ресурс] / С. Ф. Степанов, И. М. Павленко, Е. Т. Ербаев // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=11407> (дата обращения: 13.04.2025).

114. Структура формирования цены на рынке электроэнергии [Электронный ресурс] // Калужская сбытовая компания: [сайт]. – Режим доступа: <https://kskka.ru/legal/pricing/electricity-market-price-formation/> (дата обращения: 12.06.2025).

115. Суслов, К. В. Экономика и возобновляемые источники энергии / К. В. Суслов, Е. В. Уколова, Е. В. Уколова // Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири: сборник научных трудов / под ред. проф. Б. Л. Тальгамера. – 2015. – № 15. – С. 94–98.

116. Сценарии развития мировой энергетики до 2050 г.: отчет Минэнерго России [Электронный ресурс] // Российское энергетическое агентство: [сайт]. – Режим доступа: <https://rosenergo.gov.ru/press-center/news/stsenarii-razvitiya-mirovoy-energetiki-do-2050-goda/> (дата обращения: 24.05.2025).

117. Танкаев, Р. Мировая энергетика [Электронный ресурс] / Р. Танкаев, А. Фролов // ИнфоТЭК: [сайт]. – 2022. – 03 нояб. – Режим доступа: <https://itek.ru/reviews/mirovaya-energetika/> (дата обращения: 03.06.2025).

118. Темербаев, С. А. Улучшение качества электроэнергии в автономных системах электроснабжения, использующих возобновляемые источники энергии / С. А. Темербаев, В. П. Довгун, Е. С. Шевченко // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2014. – № 7. – С. 821–831.

119. Толстых, Т. О. Критерии и методы оценки эффективности деятельности предприятия [Электронный ресурс] / Т. О. Толстых, О. В. Дударева // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – № 11-3. – С. 98–102.

120. Трегубова, Е. А. Экономическая эффективность накопителей электроэнергии при интеграции электростанций на возобновляемых источниках

энергии в энергосистеме / Е. А. Трегубова, М. А. Городилов, Л. С. Люшнин // Вестник университета. – 2024. – № 10. – С. 150–160.

121. Тулина, Ю. Г. Эффективность как экономическая категория / Ю. Г. Тулина, Н. В. Шевцова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах (Красноярск, 08–12 апреля 2019 г.). – Красноярск: СибГУ, 2019. – Т. 3. – С. 145–147.

122. Турдалиев, И. А. Энергоэффективность и энергосбережение при использовании альтернативных источников энергии / И. А. Турдалиев // Вестник науки и образования. – 2023. – № 3 (134). – С. 30–34.

123. Федоренко, В. Ф. Возобновляемые источники энергии: тенденции и перспективы развития: Научный аналитический обзор / В. Ф. Федоренко, В. С. Тихонравов, Н. П. Мишуров. – М.: Росинформагротех, 2015. – 128 с.

124. Филиппова, А. В России наладили производство ключевых компонентов ветроустановок [Электронный ресурс] / А. Филиппова // Отраслевое издание госкорпорации «Росатом»: [сайт]. – 2021. – 21 июля. – Режим доступа: <https://strana-rosatom.ru/2021/07/21/v-rossii-naladili-proizvodstvo-kljuche/> (дата обращения: 23.04.2025).

125. Фокус энергоперехода только на ветре и солнце может обернуться значительными проблемами [Электронный ресурс] // Глобальная энергия: [сайт]. – 2022. – 23 июня. – Режим доступа: <https://globalenergyprize.org/ru/2022/06/23/fokus-energoperehoda-tolko-na-vetre-i-solnce-mozhet-obernutsya-znachitelnymi-problemami/> (дата обращения: 07.11.2024).

126. Фридман, А. М. Экономика предприятий торговли и питания потребительского общества: учебник / А. М. Фридман. – 5-е. изд., стер. – М.: Дашков и К, 2019. – 656 с.

127. Фролов, А. Атомные рекорды, добыча трудной нефти и три главных источника для мировой энергетики [Электронный ресурс] / А. Фролов // Энергия+: [сайт]. – 2024. – 27 февр. – Режим доступа: <https://e-plus.media/technologies/atomnye->

[rekordy-dobycha-trudnoj-nefti-i-tri-glavnyh-istochnika-dlya-mirovoj-energetiki/](#) (дата обращения: 11.06.2025).

128. Хачатуров, Т. С. Экономическая эффективность: проблемы и методы оценки / Т. С. Хачатуров. – М.: Экономика, 1987. – 256 с.

129. Хачатуров, Т. С. Эффективность капитальных вложений / Т. С. Хачатуров. – М.: Экономика, 1979. – 335 с.

130. Хемраев, М. Специфика моделирования экономических процессов в условиях цифровизации / М. Хемраев // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2022. – № 8. – С. 234–236.

131. Хижа, О. Н. Эволюция подходов к трактовке понятия «эффективность» в науке / О. Н. Хижа // Вестник Челябинского государственного университета. – 2018. – № 7 (417). – С. 21–27.

132. Цены в России – 2024 [Электронный ресурс] // Росстат: [сайт]. – Режим доступа: http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Cena_2024.pdf (дата обращения: 18.06.2025).

133. Цифровая экономика Российской Федерации: Национальная программа: утверждена президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 04.06.2019 № 7 [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_328854/ (дата обращения: 08.06.2025).

134. Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян, А. С. Акопов // Бизнес-информатика. – 2021. – Т. 15, № 2. – С. 7–20.

135. Цыбатов, В. А. Экономический рост как важнейший фактор снижения энергоемкости валового регионального продукта / В. А. Цыбатов // Экономика региона. – 2020. – Т. 16, № 3. – С. 739–753.

136. Чебанов, К. А. Перспективы развития ветроэнергетики в России [Электронный ресурс] / К. А. Чебанов, Д. А. Салопихин, Д. П. Омельченко // Нефтегаз: [сайт]. – 2016. – 27 дек. – Режим доступа:

<https://magazine.neftegaz.ru/articles/vozobnovlyaemye-istochniki-energii/663245-perspektivy-razvitiya-vetroenergetiki-v-rossii/> (дата обращения: 14.06.2025).

137. Чистый денежный поток [Электронный ресурс] // Финансовый анализ: [сайт]. – Режим доступа: https://1fin.ru/Finansovyy_slovary/Chistyy_deneghnyy_potok (дата обращения: 07.04.2025).

138. Чубарова, О. В. Применение метода вейвлет-анализа данных для построения прогнозной модели / О. В. Чубарова, А. В. Чубаров, Д. И. Ликсонова // Вестник кибернетики. – 2024. – Т. 23, № 3. – С. 82–89.

139. Шарова, И. Д. Определение экономической эффективности производственно-хозяйственной деятельности на различных уровнях управления / И. Д. Шарова // Вестник Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова. – 2008. – № 4. – С. 46–52.

140. Шевченко, А. В. В Киргизии началось строительство ветряной электростанции Росатома мощностью 100 МВт. [Электронный ресурс] / А. Шевченко // Нефтегаз: [сайт]. – 2024. – 13 сент. – Режим доступа: <https://neftegaz.ru/news/Alternative-energy/854850-v-kirgizii-nachalos-stroitelstvo-vetryanoy-elektrostantsii-rosatoma-moshchnostyu-100-mvt/> (дата обращения: 13.06.2025).

141. Шевченко, М. В. Состояние и перспективы развития зарубежной ветроэнергетики / М. В. Шевченко // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2005. – № 4. – С. 139–145.

142. Шепелев, А. О. Классификация современных ветроэнергетических установок по мощности [Электронный ресурс] / А. О. Шепелев, Е. Ю. Артамонова // Молодой ученый. – 2016. – № 17 (121). – С. 92–96. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/121/33503/> (дата обращения: 09.04.2025).

143. Шеремет, А. Д. Теория экономического анализа / А. Д. Шеремет. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 365 с.

144. Шисяю, У. Исследование установки вертикально-осевых турбин на верхних этажах высотных зданий / У. Шисяю, С. Г. Шеина // Современные

тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2023. – № 2. – С. 19–28.

145. Щукина, В. М. Формирование цифровой модели ветроэнергетической установки в составе цифрового двойника и её апробация на примере оценки эффективности применения ветроустановки в селе Онгурены / В. М. Щукина, Н. И. Щукин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 4 (36). – С. 112–122.

146. Экономика и анализ деятельности промышленного предприятия: учебное пособие / Н. Е. Калинина, Н. А. Кузнецова, О. С. Норкина [и др.]. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 124 с.

147. Экономическая теория. Микроэкономика – 1,2. Мезоэкономика: учебник / под ред. Г. П. Журавлева. – 7-е. изд. – М.: Дашков и К, 2016. – 934 с.

148. Экономическая теория: учебное пособие для высшего профессионального образования / И. В. Скоблякова, В. В. Смирнов, Е. М. Родионова [и др.]; под ред. В. В. Смирнова. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2013. – 266 с.

149. Юсупов, К. И. Обзор методов прогнозирования в ветроэнергетике / К. И. Юсупов, С. Т. Тажибоев // Сантехника, отопление, кондиционеры. – 2022. – № 12 (252). – С. 70–73.5 Wind Energy Companies Innovating the Renewable Energy Industry [Электронный ресурс] // NES Fircroft: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.nesfircroft.com/resources/blog/5-wind-energy-companies-innovating-the-renewable-energy-industry/> (дата обращения: 09.06.2025).

150. Architecting a digital twin for wind turbine rotor blade aerodynamic monitoring [Электронный ресурс] / Y. Marykovskiy, T. Clark, J. Deparday // Frontiers in Energy Research. – 2024. – Vol. 12. – Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2024.1428387/full> (дата обращения: 14.06.2025).

151. Belton, V. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach / V. Belton, T. J. Stewart. – Berlin: Springer, 2002. – 391 p.

152. Comprehensive restructuring measures and long-term plan for profitable growth in wind business initiated / Leadership change at Siemens Gamesa / Jochen Eickholt hands over leadership to Vinod Philip [Электронный ресурс] // Siemens Energy: [сайт]. – 2024. – 08 мая. – Режим доступа: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/press-releases/strategic-development-and-personnel-change-at-siemens-gamesa.html> (дата обращения: 11.06.2025).

153. Dai, J. Study on Obtaining Real Power Curve of Wind Turbines Using SCADA Data [Электронный ресурс] / J. Dai, H. Zeng, F. Zhang [et al.] // Frontiers in Energy Research. – 2022. – Vol. 10. – Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2022.916355/full> (дата обращения: 22.06.2025).

154. Economic Efficiency: Definition and Examples [Электронный ресурс] // Investopedia: [сайт]. – Режим доступа: https://www.investopedia.com/terms/e/economic_efficiency.asp (дата обращения: 16.06.2025).

155. Renewable energy sources in figures. National and International Development, 2022 [Электронный ресурс] // BMWK: [сайт]. – Режим доступа: https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/renewable-energy-sources-in-figures-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=7 (дата обращения: 19.06.2025).

156. Free cash flow | Свободный денежный поток [Электронный ресурс] // Cbonds: [сайт]. – Режим доступа: <https://cbonds.ru/glossary/free-cash-flow/> (дата обращения: 09.06.2025).

157. Global Wind Report 2023. – Brussels: Global Wind Energy Council (GWEC), 2023. – 128 p.

158. Industryinsights: сайт. – Режим доступа: <https://www.industryinsights.eu/tt/> (дата обращения: 12.05.2025).

159. Kristensen, W. R. Vestas and Siemens Gamesa partner on standard solutions [Электронный ресурс] / W. R. Kristensen // EnergyWatch: [сайт]. – Режим доступа: <https://energywatch.com/energynews/Renewables/article16682630.ece> (дата обращения: 19.05.2025).

160. Lee, S. General Electric's Renewable Energy Rival Just Stepped Up Competition [Электронный ресурс] / S. Lee // Nasdaq: [сайт]. – 2021. – 12 февр. – Режим доступа: <https://www.nasdaq.com/articles/general-electrics-renewable-energy-rival-just-stepped-up-competition-2021-02-12> (дата обращения: 17.06.2025).

161. Moghadam, F. K. Editorial: Online monitoring of wind power plants using digital twin models [Электронный ресурс] / F. K. Moghadam, A. Keprate, Z. Gao // Frontiers in Energy Research. – 2024. – Vol. 12. – Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2024.1531689/full> (дата обращения: 27.05.2025).

162. Powerplus and Energy Performance Optimization – 2023 [Электронный ресурс] // Vestas: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.vestas.com/en/products/optimisation/powerplus> (дата обращения: 14.06.2025).

163. Renewable Power Generation Costs in 2022. – Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2023. – 132 p.

164. Siemens Gamesa. Product Portfolio and Wind Power Strategies. – Corporate presentation, 2023. [Электронный ресурс] // Siemensgamesa: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.siemensgamesa.com/global/en/home/products-and-services.html> (дата обращения: 19.06.2025).

165. Statistical Review of World Energy 2023 [Электронный ресурс] // BP Global: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (дата обращения: 05.06.2025).

166. 5 Wind Energy Companies Innovating the Renewable Energy Industry [Электронный ресурс] // NES Fircroft: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.nesfircroft.com/resources/blog/5-wind-energy-companies-innovating-the-renewable-energy-industry/> (дата обращения: 09.06.2025).

Сравнение жизненных циклов объектов выработки энергии из возобновляемых и невозобновляемых источников

Вид энергии	Возобновляемые источники энергии					Невозобновляемые источники	
	Ветер	Атом	Солнце	Вода	Приливы/отливы	Уголь, газ, нефть	Биомасса
Преимущества	Самый перспективный источник энергии. Экологический чистый источник. Условно возобновляемый источник энергии. Низкие эксплуатационные расходы, низкая начальная стоимость для производства энергии. Возможность размещения на пустырях и загрязненных территориях, Снижение безработицы для регионов работы ВЭС.	Возобновляемый источник при работе в замкнутом топливном цикле. Экономичность расходования топлива. Безвредность для окружающей среды (при строгой эксплуатации). Низкие эксплуатационные расходы после запуска.	Один их перспективных источников энергии. Экологический чистый источник. Батареи не требуют особого обслуживания. Надежность в работе. Легкая установка коллекторов.	Экологический чистый источник. Условно возобновляемый источник энергии. Высокая эффективность ГЭС - от 80 до 90%. Возможность быстрой остановки и запуска электростанции. Отработанная система и незатратная эксплуатация ГЭС. Возможность создания искусственных озера для строительства ГЭС. Удерживает водные ресурсы для агропромышленности и животноводства.	Экологический чистый источник. Условно возобновляемый источник энергии.	<u>Электростанции на угле.</u> Уголь имеет более высокую плотность энергии (по сравнению с ВИЭ). На производство электроэнергии приходится 72,8 процента использованного угля, а 21,6 процента используется в промышленности. <u>Электростанции на газе.</u> КПД современных установок может достигать 40-45% при производстве электроэнергии и до 90%. Гибкость в выборе топлива. Низкие выбросы вредных веществ. Быстрый запуск и высокая Проста конструкции.	Нулевой баланс выбросов углекислого газа (CO ₂), выделяемых при сжигании биомассы. Более низкие, чем у ископаемого топлива, выбросы диоксида серы, оксидов азота и окиси углерода.

Вид энергии	Возобновляемые источники энергии					Невозобновляемые источники	
	Ветер	Атом	Солнце	Вода	Приливы/отливы	Уголь, газ, нефть	Биомасса
						Экономическая эффективность.	
Недостатки	ВЭС портят ландшафт. Зависимость от погоды и силы ветра. Высокая стоимость строительства и обслуживания. Занимает обширные площади, потерянные для сельского хозяйства. Шум турбин. Зависимость от мощности ветра. Помехи приему радио- и телевизионных волн. КПД ВЭС не превышает 40%.	Опасность техногенной катастрофы при авариях на АЭС. Проблемы с хранением отработанного топлива. Высокие затраты на строительство и вывод из эксплуатации.	Технологические препятствия – нужна большая площадь для установки. Ограничение в использовании (домохозяйства, небольшие фермы, теплицы). Непостоянство источника - зависимость от погоды. В фотоэлектрических элементах батареи используются токсичные элементы. Низкая суточная плотность потока энергии солнечного излучения.	Зависимость от осадков и необходимость затопления больших площадей и переселения людей, что разрушает естественную наземную среду обитания для растений и животных. Дороговизна строительства ГЭС.	Низкая рентабельность. Ограничение территорий использования. Непостоянство генерации энергии.	Электростанции на угле. Истощение источников на планете. Загрязнение окружающей среды вредными выбросами. Сложность и трудоемкость добычи (особенно угля), высокий риск аварий в шахтах с человеческими потерями. Поэтапный отказ от угля продлится несколько десятилетий. При сжигании углеродоемкость угля в 2,2 раза превышает углеродоемкость природного газа. Методы добычи топлива, влияющие на потребности в перевозках и выбросы метана. Потери природного газа в процессе его передачи.	• Относительно низкая плотность сырья, затрудняющая его транспортировку, хранение и дозирование. • Высокая влажность биомассы, затрудняющий ее подготовку к использованию в энергетических целях. • Низкая энергетическая ценность сырья. • Некоторые отходы доступны только сезонно.

Вид энергии	Возобновляемые источники энергии					Невозобновляемые источники	
	Ветер	Атом	Солнце	Вода	Приливы/отливы	Уголь, газ, нефть	Биомасса
						<u>Электростанции на газе.</u> Высокие первоначальные затраты. Зависимость от качества газа. Необходимость регулярного обслуживания. Ограниченная мобильность. Высокий уровень шума, производимый вращением турбины (для турбинных ГЭС).	

Источник: Составлено авторами по данным ресурсов.

1. Возобновляемые источники энергии. <https://energy.hse.ru/Wiie>

2. Кривонос. А. Альтернативные источники энергии: плюсы и минусы. https://bezpeka-shop.com/blog/poleznye-sovety/alternativnye-istochniki-energii-plyusy-i-minusy/?srsId=AfmBOormUIZKsWPUQgohZQVe9DX_UjPSnsMZCgMeLNYtEyxcoP9ndyDv

3. Богманс Кристиан, Ли Клэр Мэнджи. Более экологичное будущее начинается с перехода от угля к альтернативным источникам энергии. <https://www.imf.org/ru>

4. ДЖОЗЕФ В. СПАДАРО, ЛЮСИЛЬ ЛАНГЛУА, БРЮС ГАМИЛЬТОН. ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ОТ ЦЕПОЧЕК ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА. ОЦЕНКА РАЗЛИЧИЙ. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull42-2/42204981924_ru.pdf

5. Бучнев А.О. Экологические особенности использования возобновляемой энергии в свете достижения Целей устойчивого развития. Государственная служба. 2021. № 4. С. 51–58

6. Ефимцева Т.В., Дьяконова А.А., Михайлова Е.С., Рахматуллина О.В., Салиева Р.Н. Возобновляемая энергетика в России и в других государствах ЕАЭС и СНГ: проблемы и перспективы правового регулирования // Вопросы российского и международного права. 2019. Том 9. № 12А. С. 90-110. DOI: 10.34670/AR.2020.92.12.009

7. Тищенко Н.И. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. «Научно-практический электронный журнал Аллея Науки» №2(18) 2018 Alley-science.ru. https://alley-science.ru/domains_data/files/February2-18/DOSTOINSTVA%20I%20NEDOSTATKI%20GAZOTURBINNYH%20ELEKTROSTANCIY.pdf

8. Преимущества и недостатки газопоршневых электростанций: что нужно знать? <https://aer-spb.ru/novosti/preimushchestva-i-nedostatki-gazoporshnevyykh-elektrostantsiy-cto-nuzhno-znat/?ysclid=m5pmpdmna894702992>

9. Газотурбинная электростанция (ГТЭС): что такое, преимущества и недостатки. <https://gktex.ru/info/gazoturbinnaya-elektrostantsiya/?ysclid=m5pnqmj94173765493>

Расчет показателей эффективности работы проектов ВЭС в Ростовской и Иссык-Кульской областях

В условиях энергодефицита регионов особую значимость приобретают проекты ветроэнергетики (ВЭС), обеспечивающие устойчивое развитие энергетического сектора. В статье обоснована методика рублевой оценки экономических эффектов от эксплуатации ВЭС в Ростовской и Иссык-Кульской областях на основе показателей выработки, коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), LCOE и мультипликативных эффектов. Проведено обоснование подходов к интеграции климатических факторов в расчёты, применены результаты вейвлет-анализа и имитационного моделирования. Автором получены рублевые значения NPV и IRR в привязке к сезонной ветровой активности регионов.

1. Исходные данные по состоянию на конец 2024 года:

1. Инвестиции на 1 МВт установленной мощности — 130 000 000 руб. (по данным ГК «Новавинд», Презентация 2024 года, ДСП)
2. Срок службы — 20 лет (рекомендации Минэкономразвития РФ)
3. Ставка дисконтирования — 10% (по рекомендациям Минэкономразвития РФ)
4. Годовой доход от реализации электроэнергии:
 - Ростовская область: $10\,800\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \times 4,8 \text{ руб.} = 51\,840\,000 \text{ руб./год}$
 - Иссык-Кульская область: $8\,700\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \times 1,2 \text{ руб.} = 10\,440\,000 \text{ руб./год}$

2. Расчет базируется на комбинации:

- имитационного моделирования ветропотенциала;
- вейвлет-анализа сезонных колебаний;
- расчёта КИУМ, NPV и IRR;
- перевода выработки в рубли на основе действующих тарифов.

Экономический эффект оценивается через:

- NPV — чистую приведённую стоимость:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (21)$$

- **IRR** — внутреннюю норму рентабельности (ставка r), при которой $NPV = 0$.

3. Исходные данные и параметры регионов

По данным SCADA и климатических наблюдений за 2023–2024 годы:

- Ростовская область: 7,5 м/с, сезонность $\pm 20\%$;
- Иссык-Кульская область: 6,3 м/с, сезонность $\pm 15\%$.

4. Расчёт выработки и КИУМ. Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) — это один из ключевых показателей эффективности работы ветроэнергетических установок. Он показывает, насколько эффективно используется установленная мощность оборудования.

$$\text{КИУМ} = (\text{Фактическая выработка энергии за год}) / (\text{Установленная мощность} \times 8760 \text{ часов}), \quad (22)$$

где:

- 8760 — количество часов в невисокосном году
- Установленная мощность — номинальная мощность ВЭУ (например, 1 МВт)
- Фактическая выработка — сумма произведённой электроэнергии за год

Расчёт для Ростова: Фактическая выработка: 10 800 000 кВт·ч Установленная мощность: 1 МВт = 1 000 кВт

$$\text{КИУМ} = 10\,800\,000 / (1\,000 \times 8760) = 10\,800\,000 / 8\,760\,000 \approx \mathbf{0,246} \text{ или } \mathbf{24,6\%}$$

Для Иссык-Кульской области: Фактическая выработка: 8 700 000 кВт·ч КИУМ = $8\,700\,000 / 8\,760\,000 \approx \mathbf{0,198}$ или **19,8%**

Чем выше КИУМ, тем стабильнее и эффективнее работает ветроэнергетическая установка. КИУМ выше 30% считается высоким. Значения, близкие к 20%, характерны для регионов с умеренными ветровыми условиями или значительной сезонностью.

Вычисляем (КИУМ) для обоих регионов:

$$\text{КИУМ} = \frac{\text{Годовая выработка}}{\text{Установленная мощность} \times 8760} \quad (23)$$

- Выработка: 10 800 000 кВт·ч/год
- Ростов: $10\,800\,000 / 8\,760\,000 = 0,246$
- Выработка: 8 700 000 кВт·ч/год
- Иссyk-Куль: $8\,700\,000 / 8\,760\,000 = 0,198$

5. Перевод выработки мощности в денежный поток

Средневзвешенные тарифы на единицу электроэнергии в регионах в 2025 году:

- Ростовская область: **4,8 руб./кВт·ч**¹⁹⁶
- Иссyk-Кульская область: **1,2 руб./кВт·ч**¹⁹⁷ (по курсу 0,8 руб./сом за ед. электроэнергии)

Фактический доход от реализации электроэнергии по договорам ДММ в 2024 году составил:

- Ростовская обл.: $10,8 \text{ млн} \times 4,8 = \mathbf{51,84 \text{ млн руб.}}$
- Иссyk-Кульская обл.: $8,7 \text{ млн} \times 1,2 = \mathbf{10,44 \text{ млн руб.}}$

6. Расчёт капитальных вложений. NPV и IRR

Входные общие условия:

- Инвестиции: 130 млн руб.
- Срок эксплуатации: 20 лет
- Ставка дисконтирования: 10%

Формула расчета индекса рентабельности инвестиций:

$$PV_t = \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad , \quad (24)$$

где:

¹⁹⁶ Региональная служба по тарифам ростовской области постановление 10.12.2024 г. Ростов-на-Дону № 628 Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Ростовской области на 2025 год https://cdn.tns-e.ru/iblock/724/7242031edee3d6dd4174096c8032632e/Postanovlenie_RST_628_ot_10.12.2024_

¹⁹⁷ Национальная энергетическая сеть Кыргызстана. <https://bipes.nesk.kg/ru/abonentam/tarif/>

- CF_t — денежный поток в t -м году;
- r — ставка дисконтирования (в нашем случае 10% или 0,10);
- t — номер года;
- PV_t — приведённое значение денежного потока CF_t к текущему моменту.

$$CF / (1 + r)^t \quad (25)$$

это классическая формула дисконтирования, где:

- CF — денежный поток за год (cash flow), млн.руб.;
- r — ставка дисконтирования, % (например, 0,10 = 10%);
- t — номер года;
- $(1 + r)^t$ — во сколько раз уменьшается ценность денег с учётом времени.

Эта часть формулы расчета NPV представляет собой множитель дисконтирования, который отвечает на вопрос: «Сколько стоит 1 рубль через 10 лет, если его "ценность" ежегодно падает на 10%?».

Дисконтированный поток (или дисконтированная стоимость):

$$ДДП = PV = FV / (1 + r)^n, \text{ где:} \quad (26)$$

- PV — текущая стоимость;
- FV — будущая стоимость;
- r — ставка дисконтирования (процент, используемый для приведения будущих потоков к текущей стоимости);
- n — количество периодов (лет, месяцев и т. п.), на которые производится дисконтирование.

Рассчитаем потоки для исследуемых регионов.

1. Ростовская область. Исходные данные: $CF = 51\,840\,000$ руб., $r = 10\% = 0,10$, $I_0 = 130\,000\,000$ руб., Срок: 20 лет

Таблица 1. Расчет дисконтированного потока для Ростовской области за 20 лет

Номер года	Расчёт	Дисконтированный поток, руб.
1	51 840 000 / 1,10	47 127 273
2	51 840 000 / 1,21	42 842 975
3	51 840 000 / 1,331	38 948 159
4	51 840 000 / 1,4641	35 407 417
5	51 840 000 / 1,61051	32 188 561
6	51 840 000 / 1,77156	29 262 328
7	51 840 000 / 1,94872	26 601 207
8	51 840 000 / 2,14359	24 181 097
9	51 840 000 / 2,35795	21 980 089
10	51 840 000 / 2,59374	19 978 263
...	...	...
20	51 840 000 / 6,72749	7 648 037

$\sum CF_t \approx 476,32$ млн руб.

$NPV = 476,32 - 130 = 346,32$ млн руб.

Внутренняя норма доходности IRR находится из условия $NPV = 0$. Подбором: установлено что $IRR \approx 29\%$ при стартовых вложениях в размере 30 млн.руб.

Расчеты были произведены в программе Excel MS Office:

1. 10% 476,32 млн +346,32
2. 15% 345 млн +215 млн
3. 20% 265 млн +135 млн
4. 25% 190 млн +60 млн
- 5. 29% 130 млн 0 руб.**
6. 30% 125 млн -5 млн.

Таким образом, проект ВЭС будет выгоден, пока стоимость денег во времени ниже 29% в год. Если ставка выше — вложения уже не окупятся.

2. Иссык-Кульская область. Исходные данные: $CF = 10\,440\,000$ руб., $r = 10\% = 0,10$, $I_0 = 130\,000\,000$ руб.

Таблица 2. Расчет дисконтированного потока для Иссык-Кульской области за 20 лет

Номер года	Формула расчёта	Дисконтированная сумма, руб.
1	$10\,440\,000 / 1,10$	9 490 909
2	$10\,440\,000 / 1,21$	8 628 099
3	$10\,440\,000 / 1,331$	7 843 726
4	$10\,440\,000 / 1,4641$	7 130 660
5	$10\,440\,000 / 1,61051$	6 482 418
6	$10\,440\,000 / 1,77156$	5 893 107
7	$10\,440\,000 / 1,94872$	5 357 370
8	$10\,440\,000 / 2,14359$	4 870 336
9	$10\,440\,000 / 2,35795$	4 427 578
10	$10\,440\,000 / 2,59374$	4 025 071
11	$10\,440\,000 / 2,85311$	3 659 155
12	$10\,440\,000 / 3,13842$	3 325 595
13	$10\,440\,000 / 3,45227$	3 020 541
14	$10\,440\,000 / 3,79749$	2 740 492
15	$10\,440\,000 / 4,17724$	2 482 265
16	$10\,440\,000 / 4,59496$	2 243 877
17	$10\,440\,000 / 5,05446$	2 023 524
18	$10\,440\,000 / 5,55991$	1 819 567
19	$10\,440\,000 / 6,11590$	1 630 515
20	$10\,440\,000 / 6,72749$	1 454 104

Аналогичным образом произведем вычисления и получим следующие результаты:

$$\sum CF_t \approx 95,42 \text{ млн руб.}$$

$$NPV = 95,42 - 130 = -34,58 \text{ млн руб.}$$

$$IRR \approx 6,4\%$$

Показатель внутренней доходности $\approx 6,4\%$ показывает, что проект ВЭС, в который вложены средства, имеет годовую доходность 6,4% при условии реинвестирования доходов по той же ставке. В большинстве случаев инвесторы принимают решение вкладываться в проекты, в которых IRR превышает 10–15%, однако это зависит от отрасли, рыночных условий, ключевой ставки и уровня риска, а также социально – экономической обстановки в регионе и поддержке государства. Исходя из этого, можно судить, что проект ВЭС в Иссык-кульской области относится к низкодоходным, но имеет высокое социальное значение для населения региона.

Таким образом, расчёты демонстрируют принципиальную разницу в экономической эффективности проектов между исследуемыми регионами с сопоставимыми инвестициями, но различным ветропотенциалом и тарифной политикой региональных властей.

Мультипликативные эффекты. Мультипликативный эффект в экономике отражает, насколько 1 рубль инвестиций увеличивает совокупный объём валового регионального продукта (ВРП). Мультипликатор включает:

- прямой эффект (строительство, оборудование);
- косвенный (подрядчики, сырьё);
- индуцированный (заработки и потребление местного населения).

Мультипликатор рассчитывается как:

$$\text{Мультипликатор} = \frac{\text{Прирост ВВП}}{\text{Инвестиции}} \quad (27)$$

Ростовская область:

- Мультипликатор: 1,5–2,0

Предполагаемый мультипликатор: 1,5–2,0 (на основе оценки

Минэкономразвития РФ и данных ИЭР РАН.

Мультипликатор = Прирост ВРП / Инвестиции, где инвестиции = 130 млн руб., а ВРП: $130 \times 1,5 = 195$ млн. руб., $130 \times 2,0 = 260$ млн. руб.

Вывод: Инвестиции в ВЭУ в Ростовской области способны дать совокупный прирост ВРП от 195 до 260 млн. руб. Это обусловлено высоким уровнем локализации производства, наличием транспортной и инженерной инфраструктуры, а также кадрового потенциала.

Иссык-Кульская область:

- Мультипликатор: 1,7–2,2
- Мультипликатор: 1,7–2,2 (по данным Всемирного банка и Минэкономики КР)
- ВРП: $130 \times 1,7 = 221$ млн, $130 \times 2,2 = 286$ млн. руб.

Вывод: Несмотря на отрицательный NPV, проект в Иссык-Кульской области может оказать сильное влияние на региональную экономику за счёт вовлечения местных подрядчиков, создания временной и постоянной занятости, развития инфраструктуры и поставок строительных и монтажных услуг. Это типичный случай, когда социально-экономический эффект превышает коммерческую доходность. Мультипликатор учитывает как прямые затраты (например, строительство ВЭУ), так и косвенные (рост заказов у подрядчиков, спрос на логистику, питание, жильё), а также индуцированные (рост потребления у работников). Поэтому значения выше 1,5 считаются хорошими в отраслях с высоким эффектом сопряжённого спроса, таких как энергетика и инфраструктура.

Заключение

Ростовская область показывает полную окупаемость ВЭУ при стандартных рыночных условиях: $NPV = +346$ млн руб., $IRR = 29\%$. Иссык-Куль — проект с высоким мультипликатором (до 2,2), но требует субсидирования: NPV отрицательное, $IRR < 7\%$. Модель применима в управлении региональными программами развития ВИЭ.

Список литературы и источников (Приложение 2)

1. Алиходжина, Н. В. Обзор существующих моделей и методов расчёта основных характеристик ветра в определенной точке / Н. В. Алиходжина, М. Г. Тягунов, Т. А. Шестопалова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2024. – № 3 (63). – С. 76–93.

2. День инвестора и аналитика. Стратегический план на 2021-2023 гг. [Электронный ресурс] // Энел Россия: [сайт]. – Режим доступа: https://el5-energo.ru/upload/iblock/3fc/o0v7mko0cyxcp8oj1cmuyy9lig32nv25f/Enel_Russia_ID_2021-23_FINAL_rus.pdf (дата обращения: 12.06.2025).

3. Кыргызская Республика увеличит потенциал в сфере возобновляемых источников энергии при поддержке Всемирного банка и Зеленого климатического фонда [Электронный ресурс] // Группа Всемирного Банка: [сайт]. – 2023. – 28 июня. – Режим доступа: <https://www.vsemirnyjbank.org/ru/news/press-release/2023/06/28/the-kyrgyz-republic-to-boost-its-renewable-energy-potential-with-support-from-the-world-bank-and-the-green-climate-fund> (дата обращения: 12.06.2025).

4. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов: утверждена Минэкономики РФ, Минфином РФ и Госстроем РФ от 21.06.1999 № ВК 477 [Электронный ресурс] // Гарант: [сайт]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/2320803/> (дата обращения: 18.06.2025).

5. Мокшин, М. Ю. Исследование методов и моделей прогнозирования мощности ветроэнергостанций / М. Ю. Мокшин, А. В. Путилов, О. В. Римская // Энергетическая политика. – 2025. – № 2 (205). – С. 56–65.

6. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2023 году [Электронный ресурс] // Системный оператор единой энергетической системы: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc2024/tech-disc2024ups/> (дата обращения: 18.06.2025).

7. Land-Based Wind Market Report: 2022 Edition [Электронный ресурс] // Lawrence Berkeley National Laboratory: [сайт]. – Режим доступа:

<https://emp.lbl.gov/publications/land-based-wind-market-report-2022> (дата обращения: 18.06.2025).

8. System Advisor Model (SAM): User Manual – 2021 [Электронный ресурс] // National Renewable Energy laboratory: [сайт]. – Режим доступа: <https://sam.nrel.gov/> (дата обращения: 12.06.2025).