

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

22.12.2025

Москва 2025

## Содержание

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....</b>	<b>16</b>
1.1. Сущность экономической эффективности, показатели эффективности хозяйственной деятельности промышленного предприятия .....	16
1.2. Современное состояние и тенденции развития мировой и российской ветроэнергетики.....	43
1.3. Анализ методик мониторинга экономических показателей промышленного предприятия .....	66
Выводы по главе 1 .....	83
<b>ГЛАВА 2. ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ .....</b>	<b>87</b>
2.1. Основные показатели эффективности работы ВЭС .....	87
2.2. Подходы к цифровому моделированию в ветроэнергетике. Модель цифрового моделирования экономических показателей ВЭС .....	110
2.3. Оптимизация работы ВЭС на основе алгоритмического анализа.....	158
Выводы по главе 2 .....	185
<b>ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МОНИТОРИНГА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....</b>	<b>191</b>
3.1. Методика оценки интенсивности использования мощности ВЭС .....	191
3.2. Цифровая модель мониторинга экономических показателей ветроэнергетики .....	199
3.3. Апробация модели мониторинга экономических показателей ВЭС.....	212
Выводы по главе 3 .....	216
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>220</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>226</b>

<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>227</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. СРАВНЕНИЕ ЖИЗНЕННЫХ ЦИКЛОВ ОБЪЕКТОВ ВЫРАБОТКИ ЭНЕРГИИ ИЗ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ И НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>240</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПРОЕКТОВ ВЭС В РОСТОВСКОЙ И ИССЫК-КУЛЬСКОЙ ОБЛАСТЯХ .....</b>	<b>243</b>

## 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 Мартьянов В.Л., Бутузов В.А., Пугачев Р.В., Андреев В.А., Путилов А.В., Жабицкий М.Г., Юрченко И.В., Бубенчиков А. А., Бубенчикова Т. В., Шепелева Е. Ю., Андреев В.А., Абаев А.В., Долинский А.В., Беляков П.Ю, Пронин С.П., Чебанов В.А., Трутаев В.В., Дмитриевский А. Н., Харитонов Д.А. и многие другие внесли большой вклад в развитие производства электроэнергии из различных источников. В работах рассматриваются современные тенденции в развитии мировой энергетики и основные характеристики топливно-энергетического комплекса России, анализируются особенности развития газовой, нефтяной, угольной генерации электроэнергии и производства «чистой» энергии на возобновляемых источниках.

Среди первого поколения зарубежных ученых и инженеров - основоположников создания и развития ветроэнергетики нужно упомянуть Чарльза Браша, Поля ля Кур, Джо Якобса и Марцеллуса Якобса, Уильяма Томсона, Джеймса Блайта, Дарье и некоторых других. Современные зарубежные исследователи проблем ветроэнергетики Хансен А., Полиндер Г., Цили М., Папатанасиу С., Моррен Дж., Де Хаан С., Вессельс К., Гебхардт Ф., Фукс Ф., Мигахапола Л. Г., Литтлер Т., Флинн Д., Юсупов К. И. Тажибоев С. Т., 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 Артемьев А. Ю., Андриянов Д.Л, Алиходжина Н. В., Беккер Н. А., Велькин В. И., Гвоздев В. А., Глазунова А. М., Грушевенко Д. А., Гуров В. И., Давыдов Д. Ю., Зинатуллин А. В., Зубакин В. А., Игнатьев Е. В., Капустин Н. О., Кирьянов Д. А., Климов Г. М., Ковальчук Д. В., Куделин А. Г., Кулагин В. А., Мартьянов А. С., Мокшин М. Ю., Обухов С. Г., Путилов А. В., Старкова Г. С., Тожибоев С. Т., Томилин С. А., Тягунов М. Г., Чибисова Е. Ю., Шакиров В. А., Шелубаев М. В., Шерьязов С. К., Шестопалова Т. А., Юсупов К. И. и другие. Исследования проводились в профильных научно-исследовательских институтах университетов и профессиональных ассоциациях: РАН, ЦАГИ, РусГидро, РАВИ, АО «ВИЭН», НИЯУ МИФИ, НИУ «МЭИ», Томском политехническом университете, РГУ нефти и газа им.Губкина 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 КРІ в прикладных экономических исследованиях ограничено и не носит системного характера.

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

**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:**

Провести анализ отечественных и зарубежных методов оценки экономической эффективности ветроэнергетических систем и выявить направления совершенствования применяемых подходов.

Исследовать влияние климатических факторов на экономические показатели работы ветроустановок и выполнить их математическую обработку с использованием методов временных рядов и вейвлет-анализа.

Разработать цифровую модель мониторинга, интегрирующую климатические, технические и экономические данные для оперативной оценки показателей эффективности ветрогенерации.

Сформировать методику интегральной оценки технико-экономических показателей ветроэнергетических систем с учётом сезонной структуры ветрового ресурса и условий эксплуатации.

Провести апробацию разработанной методики и цифровой модели на пилотных площадках Ростовской и Иссyk-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.

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.

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.

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:

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.

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).

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.

**Информационную 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 «НоваяВинд» 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 145 наименований, списка сокращений. Содержит 250 страницы машинописного текста, 33 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**

Сегодняшняя реальность характеризуется политической нестабильностью и продолжительным глобальным экономическим застоем. К тому же вооружённые столкновения идут бок о бок с ускоренным технологическим прогрессом и повсеместной цифровизацией, затрагивающей общественную и частную сферы деятельности. Наконец, острый миграционный кризис усиливает системную нестабильность, что проявляется в росте колебаний в работе глобальной хозяйственной системы. В эпоху усиливающегося взаимопереплетения международных рынков и инициированных трансформаций технологических укладов<sup>1</sup>, при движении к 4-му энергетическому уровню на фоне глобальной зелёной повестки и повсеместного поворота государств к цифровой экономике<sup>2</sup>, приоритет национальной политики – обеспечение стабильности и роста российской экономики. Производственные предприятия составляют основу государственной экономики; повышение результативности и конкурентоспособности предприятий ведёт к укреплению и дальнейшему развитию системы национальной экономики.

Перед рассмотрением термина «экономическая эффективность» целесообразно уточнить значения понятий «эффект» и «эффективность». В словаре экономики термин «эффект»<sup>3</sup> понимается как итог, проявляющийся в

---

<sup>1</sup> Глазьев, С. Ю. Глобальная трансформация через призму смены технологических и мирохозяйственных укладов / С. Ю. Глазьев // *AlterEconomics*. – 2022. – Т. 19, № 1. – С. 93–115.

<sup>2</sup> 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_328854/) (дата обращения: 08.06.2025)

<sup>3</sup> Райзберг, Б. А. Современный экономический словарь / Б. А. Райзберг, Л. Ш. Лозовский, Е. Б. Стародубцева. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 512 с.

материальной, денежной либо социальной форме. Некоторые публикации, посвящённые критериям экономической эффективности, иногда используют термин «результат» в качестве альтернативы понятию «эффект». В совокупности рассматриваемые термины близки по содержанию и служат для характеристики достигнутого результата хозяйственной деятельности в абсолютных показателях. Понятие «эффективность» трактуется как относительный показатель, оно отражает степень результативности процессов, операций и проектов через отношение полученного эффекта или итогового результата к величине понесённых затрат и расходов, послуживших причиной достижения данного результата.<sup>4</sup>

Масштаб достигнутого результата фиксируют заранее и устанавливают посредством расчётных процедур. В одном случае расходы рассматривают в качестве наилучшего решения – без утрат и дополнительных перерасходов. В другом варианте в расчёт расходов вносят все виды потерь, простой техники, механические повреждения продукции, наличие сверхнормативных запасов средств материально-технического обеспечения либо дефицит запасов; что приводит к необходимости замены, ухудшению качества выпускаемой продукции, неполному задействованию технического оборудования и снижению производительности труда.

Слово «эффективность» употребляется в различных сферах общественной деятельности, в том числе в экономических исследованиях. В теоретической экономике выдвигаются многочисленные трактовки понятия «экономической эффективности». В сфере хозяйственных отношений указанное понятие приобретает своеобразное, единственное по смыслу значение. Различные авторы приходят к схожему содержанию определения; указанное содержание остается многокомпонентным и вызвано множеством факторов.

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

---

<sup>4</sup> 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.

Взаимосвязь итогов и понесённых расходов. В 1817 году в труде «Начала политической экономии и налогового обложения» Д. Рикардо сформулировал представление об экономической эффективности через соотношение итогов к конкретному классу затрат, обозначив выражением «превышение результата над затратами».<sup>5</sup> На отечественной сцене экономической мысли фигурирует Советский экономист Т.С. В трактовке Хачатурова термин «эффективность» раскрывается как соотношение получаемого экономического либо социального результата и затрат, необходимых для его получения.<sup>6</sup> И.А. Мухина, представитель научного сообщества, рассматривает эффективность как соизмерение итогового результата с понесёнными затратами или задействованными ресурсами, повлиявшими на итог.<sup>7</sup> В понимании А. М. Фридмана показатель эффективности выражается через отношение полученного эффекта (результата) к ресурсам, использованным или потреблённым.<sup>8</sup>

В основе концепции оптимизации заложено стремление обеспечить наибольший эффект при минимуме вложений; поэтому внимание уделяется не только количественным индикаторам, но и рациональному использованию ресурсов и сокращению издержек. По мнению Д.С. Плетнева<sup>9</sup>, термин «эффективность» целесообразно трактовать как умение корпорации превращать доступные ей ресурсы в конечный товар, обладающий потребительской ценностью, при сведении потерь к минимуму. Г.П. Журавлева<sup>10</sup> рассматривает эффективность как соотношение объёма произведённых экономических благ и объёма задействованных ресурсов, подчёркивая два подхода, производство заданного

<sup>5</sup> Политическая экономия Д. Рикардо [Электронный ресурс] // Ricardoeconomy: [сайт]. – Режим доступа: <https://ricardoeconomy.tilda.ws/> (дата обращения: 18.05.2025).

<sup>6</sup> Хачатуров, Т. С. Эффективность капитальных вложений / Т. С. Хачатуров. – М.: Экономика, 1979. – 335 с.

<sup>7</sup> 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.

<sup>8</sup> 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.

<sup>9</sup> 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.

<sup>10</sup> Экономическая теория. Микроэкономика – 1,2. Мезоэкономика: учебник / под ред. Г. П. Журавлева. – 7-е. изд. – М.: Дашков и К, 2016. – 934 с.

объёма с минимальными затратами либо достижение максимального выпуска при фиксированном наборе ресурсов.

Вопросы, связанные с качественным измерением результативности, образуют отдельную область аналитического внимания. По мнению Т.В. Рыжкова и Л.В. Гореловой, эффективность рассматривают как категорию, отражающую качество работы организации и связанную со степенью интенсивности функционирования организации.<sup>11</sup>

Вывод, показатели эффективности сильнее зависят от качественных характеристик результатов, чем от объёма получаемых результатов. Данная позиция подтверждается в трудах К.А. Наминовой<sup>12</sup>. Аналогичные положения приведены в учебном издании по микроэкономике авторства Журавлевой Г.П., Поздняковой Ю.А. и Поздняковой Н.А.<sup>13</sup>

Поставленные задачи считают главным критерием оценки результативности. А. Азрилияна формулирует понятие как способность создавать воздействие и оказывать влияние на процессы.<sup>14</sup> При оценке учитывают не исключительно количественные показатели, но и качественные критерии, ориентированные на выполнение конкретных задач. С.Л. Соркин считает эффективность мерой результативности работы различных систем, в том числе экономических структур.<sup>15</sup>

В трудах признанных зарубежных исследователей нередко рассматривали эффективность хозяйственной деятельности; К. Маркс полагал, что эффективность хозяйственной деятельности выступала фактором, приводившим к переходу одного социально-политического строя в другой.<sup>16</sup> По словам Дж. Гэлбрейта, мерилom

---

<sup>11</sup> 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.

<sup>12</sup> Наминова, К. А. Современное состояние страхования рисков сельскохозяйственных организаций с государственной поддержкой в России / К. А. Наминова // Апробация. – 2016. – № 7 (46). – С. 100–105.

<sup>13</sup> Журавлева, Г. П. Экономическая теория. Микроэкономика: учебник / Г. П. Журавлева, Ю. А. Поздняков, Н. А. Поздняков. – М.: ИНФРА-М, 2010. – 400 с.

<sup>14</sup> Большой экономический словарь / под ред. А. Н. Азрилияна. – 7-е изд., доп. – М.: Институт новой экономики, 2007. – 1472 с.

<sup>15</sup> Соркин, С. Л. Эффективность внешнеэкономической деятельности: понятие, измерение и оценка / С. Л. Соркин. – Гродно: РГТУ, 2011. – 130 с.

<sup>16</sup> Маркс, К. К критике политической экономии / К. Маркс. – М.: Либроком, 2012. – 178 с.

экономической эффективности служит умение достигать заранее установленных целей.<sup>17</sup>

Исследователь О.Н. Хижа изучила существующие определения «экономической эффективности», чтобы глубже понять содержание понятия «эффективность». Дополнительно она составила классификацию определений термина «эффективность» и распределила её по четырём группам, 1. Отношение; 2. Достижение результата; 3. Показатель результата; 4. Критерий результата.

По мнению О.Н. Хижи, термин «эффективность» – совокупность характеристик системы, создающих условия для достижения требуемого результата в оговорённые сроки при минимизации расходов с учётом выявленных ранее недостатков.<sup>18</sup> Данное толкование придаёт исследованию прикладной смысл и стимулирует создание нового набора индикаторов для регулирования социально-экономических процессов в российских условиях.

По итогам обзора трансформации термина «экономическая эффективность» в исследованиях российских и зарубежных авторов можно зафиксировать заметные изменения, изначально понятие рассматривали как простую пропорцию между результатом и затратами, тогда как сейчас его трактуют как многомерное явление, предполагающее качественные параметры, возможность достижения поставленных целей и степень интенсивности потребления ресурсов. Классификация, предложенная О.Н. Хижей, служит основой для упорядочения подходов, она облегчает систематическое сопоставление разных трактовок и выявление взаимосвязей между ними. Н. Хижей предлагает трактовку эффективности как способность системы обеспечивать получение требуемого результата в установленные сроки при минимуме затрат; данное определение хорошо соответствует актуальным условиям хозяйственной деятельности и служит основой для оценки работы ветроэлектростанций. В собственной систематике исследователь выделяет четыре подхода к интерпретации эффективности – как

---

<sup>17</sup>Поликарпов, М. Д. Рассмотрение понятия экономической эффективности в современных условиях / М. Д. Поликарпов // Вестник науки. – 2023. – № 5 (62). – С. 75–80

<sup>18</sup> Хижа, О. Н. Эволюция подходов к трактовке понятия «эффективность» в науке / О. Н. Хижа // Вестник Челябинского государственного университета. – 2018. – № 7 (417). – С. 21–27.

соотношение, как факт достижения результата, как индикатор полученного результата и как критерий, оценивающий результат; подобная группировка подчёркивает многогранность категории и исключает упрощённое сведение категории к одному измерителю. Нельзя не отметить вклад отечественных исследователей – Н.А. Полянская, А.Н. Асаул, Е.И. Быковский, З.А. Демченко. Перечисленные труды сильно повлияли на подходы к оценке эффективности экономической деятельности, они внесли новые грани, а смысл терминов был подробно уточнён с учётом особенностей функционирования рыночной среды.

В трудах отечественных специалистов нашего времени встречаются различные трактовки понятия «экономическая эффективность».

А.Н. Асаул трактует экономическую эффективность как категорию качественного порядка, описывающую свойства хозяйственной деятельности. Через указанную категорию, по мнению автора, проявляются фундаментальные процессы улучшения, затрагивающие все звенья предпринимательства. В качестве показателей выделяются параметры производственной результативности, степень упорядоченности системы, уровень реализации поставленных задач и прочие сопутствующие индикаторы.

Н.А. Полянская трактует эффективность в сфере экономики как итог реализации хозяйственных инициатив – мероприятий и программ; по её оценке показатель выражается соотношением достигнутого эффекта и затрат факторов и ресурсов, ставших причиной появления данного итога.<sup>19</sup> З. А. Демченко и Е. И. Быковский полагают, что показатель эффективности в экономике отражает итоги использования совокупности производственных ресурсов за конкретный период времени<sup>20</sup>.

По мнению О.Е. Обориной, тема, посвящённая взаимному соотношению терминов «экономическая эффективность», «эффект» и «результативность»,

---

<sup>19</sup> Оборина, О. Е. Экономическая эффективность: понятие и сущность / О. Е. Оборина // Молодой ученый. – 2020. – № 23 (313). – С. 427–429.

<sup>20</sup> 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.

остаётся актуальной из-за тесной взаимосвязи указанных терминов. Под термином «эффект» понимают компонент, входящий в дефиницию «экономическая эффективность». Сама «экономическая эффективность» выражается как отношение конечного эффекта (результата) к ресурсам, затраченным на получение результата. Эффект рассматривают как абсолютную величину, являющуюся результатом некоторого процесса<sup>21</sup>, и вычисляют по формуле:

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

Эффект может быть положительным и отрицательным.

Показатель, оценивающий экономическую сторону деятельности, носит относительный характер. Он создаётся путём сравнения абсолютного объёма полученного результата с совокупными объёмами понесённых затрат и использованных ресурсов. Такой индикатор выполняет функцию меры степени результативности работы предприятия.

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

Оценка эффективности ставит задачу определить, какими конкретными затратами и объёмами ресурсов было обеспечено получение тех или иных итогов. Показатель по своей природе относителен и выражается положительным значением.

Показатель результативности выражается отношением объёмов фактического выпуска к запланированным показателям; он показывает, в какой мере были достигнуты заранее поставленные цели.<sup>22</sup>

Вывод, сформулированный на основе изложенного материала, таков. Термины «эффективность», «эффект» и «результативность» взаимно дополняют друг друга и состоят в тесной взаимосвязи; рассматривать указанные термины как тождественные понятия нельзя (рис.1).

Изучение формулировок, предложенных зарубежными и российскими авторами, показывает отсутствие единого толкования термина «экономическая

<sup>21</sup> Козырев, В. М. Основы современной экономики: учебник / В. М. Козырев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 432 с.

<sup>22</sup> 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.

эффективность». Различные подходы в толкованиях подчёркивают многоплановый характер категории. К тому же попытки зафиксировать «экономическая эффективность» с помощью набора индикаторов и метрических оценок сталкиваются с заметными трудностями.

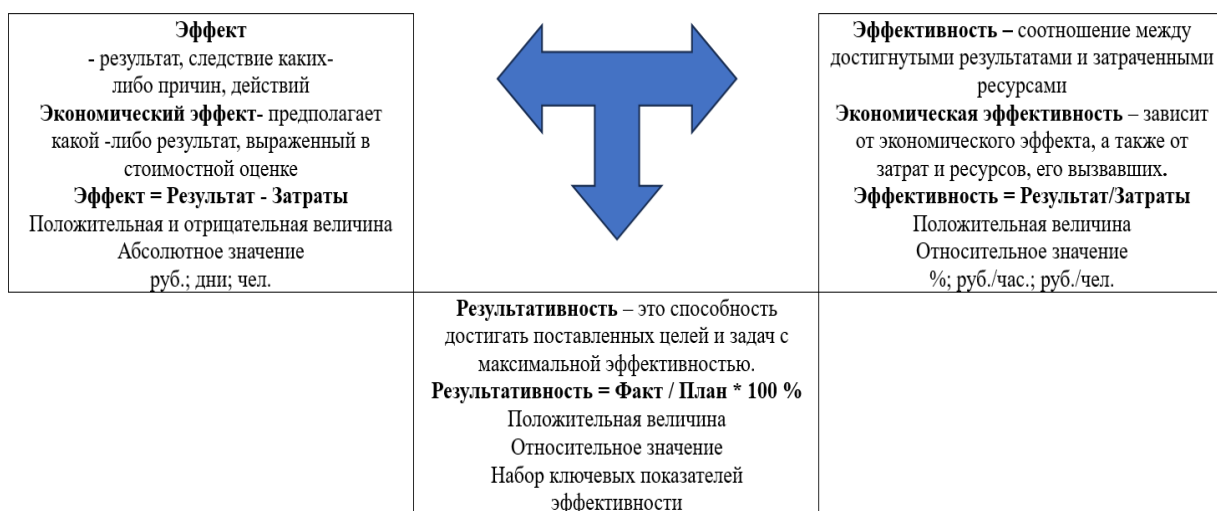


Рисунок 1. Схема взаимозависимости понятий эффект, эффективность и результативность.

Источник: составлено автором.

Многие исследователи оценивают показатель эффективности в экономическом измерении как отношение полученного результата к объёму ресурсов, затраченных на его достижение.

Итак, проведённое выше исследование научной литературы показывает, категория «экономическая эффективность» – сложное, многоаспектное, исторически меняющееся понятие; на протяжении нескольких столетий развития экономической мысли она претерпевала заметные трансформации и уточнения. Начиная с классических работ Д. От трудов Рикардо, положивших начало восприятию эффективности как соотношения достигнутого результата и понесённых издержек, до работ российских и зарубежных исследователей просматривается постепенное расширение и уточнение семантического содержания данного термина. В экономической науке сложилось представление о

том, что понятия «эффект», «эффективность» и «результативность» находятся во взаимной связи и дополняют друг друга; сохраняя различия, они совместно служат основанием для комплексной оценки деятельности компании в хозяйственной сфере. Следует отметить, что показатель, фиксирующий экономическую эффективность, носит относительный характер, его вычисляют как соотношение абсолютного объёма достигнутого эффекта и объёма понесённых затрат либо задействованных ресурсов. Данное положение подчёркивает различие между рассматриваемым критерием и самим эффектом; эффект выступает как абсолютный измеритель. Принятие такой логики имеет значение для последующих исследований, поскольку на её базе можно создать методологически обоснованный инструментарий для оценки функционирования ветроэлектростанций как особой категории промышленных предприятий.

В условиях рыночной хозяйственной системы центральной категорией становится показатель результативности производственной деятельности, роль данного показателя проявляется в прямой связи с задачей обеспечения развития отдельного хозяйствующего субъекта и социума в целом. Термин «экономическая результативность» применяется как методический инструмент для установления и количественной оценки уровня эффективности работы предприятия. Данная категория отражает успешность хозяйственной деятельности организации и рассчитывается как соотношение достигнутых итогов к использованным ресурсам.

Исчерпание природных богатств, нарастание конкурентного давления, международная интеграция бизнеса и рост предпринимательских рисков под влиянием геополитических факторов вызывают высокий спрос на систематический контроль показателей результативности в промышленной сфере. Постоянный мониторинг комплекса экономических индикаторов операционной деятельности компании относится к приоритетным задачам нынешнего бизнеса. Компетенции руководящего состава в организации хозяйственных процессов напрямую влияют на величину прибыли. Поэтому компаниям целесообразно внедрять регулярные механизмы оценки экономической результативности и корректировки управленческих решений.

Показатель экономической результативности организации – относительная величина; на его величину влияют многочисленные факторы. Достижение заданного уровня результативности представляет собой затяжной многоэтапный процесс, отражённый на (рис.2). Эффективность предприятия в рассматриваемом подходе трактуется как состояние, объёмы получаемых результатов возрастают одновременно со снижением объёма ресурсов, необходимых для получения указанных результатов.



Рисунок 2. Связь инструментов управления эффективностью и декомпозиции целей.

Источник: составлено автором.

Российские исследователи – И. Ансофф, В.М. Баутин, Е. Дихтль, Ф. В. Ковалев, Г.В. Савицкая, Г.В. Скляренко и А.И. Хорев – сосредоточили научные усилия на вопросах повышения результативности деловой активности предприятий. Они предложили и реализовали решения для множества как теоретических, так и прикладных задач, нацеленных на укрепление экономической результативности организаций. Со стороны зарубежных специалистов заметный вклад в изучение рассматриваемой проблематики внес американский исследователь Э.Б. Ловинс.

В экономической теории признают, что оценка эффективности хозяйственной деятельности относится к числу трудноклассифицируемых понятий; процесс затрагивает множество последовательных этапов производственного цикла предприятия и служит отправной точкой для выработки критериев ценности принимаемых решений. Интегративным итогом данной эффективности является совокупный результат хозяйствования организации, проявляющийся через взаимодействие главных элементов. Система критериев измерения содержит показатели абсолютной и относительной эффективности, наряду с показателями, отражающими изменения во времени; они позволяют судить о результативности используемых на предприятии средств и методов обеспечения эффективности.

Иностранные аналитики формулируют, в экономическом измерении эффективность производственной деятельности трактуется как отношение совокупных затрат к объёму доходов, поступающих в распоряжение хозяйствующего субъекта<sup>23</sup>. В тех случаях, когда производственные издержки оказываются ниже выручки от реализации продукции и оказания услуг, делается вывод о высокой результативности экономической деятельности компании.

Итак, под понятием «экономическая эффективность» понимают совокупность важнейших характеристик хозяйственной деятельности предприятия, активность развития, целостность функционирования, конкурентоспособность и бизнес-планирование. Поднятие экономической эффективности означает<sup>24</sup>, добиться увеличенного результата при неизменном объёме используемых ресурсов, получить тот же итог при снижении ресурсных затрат и повысить результат при одновременном сокращении расходов.

При доминирующей рыночной системе необходимо согласовывать процессы производства с запросами потребительского спроса, одновременно внедряя передовые технические решения и актуальные управленческие практики. Главные направления оценки результативности организации, сфера технологий,

---

<sup>23</sup> Belton, V. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach / V. Belton, T. J. Stewart. – Berlin: Springer, 2002. – 391 p.

<sup>24</sup> Бариленко, В. И. Анализ хозяйственной деятельности: учебное пособие / В. И. Бариленко. – М.: Омега-Л, 2013. – 363 с.

экономические показатели, вопросы социальной ответственности и экологические критерии.<sup>25</sup>

Единый критерий для оценки экономической результативности предприятий не выработан. При наличии множества применяемых универсальных схем и способов оценки результативности выделены и рассмотрены отдельные варианты (табл.1).

Таблица 1. Общие подходы к оценке экономической эффективности

Подход	Суть	Результат	Особенности
Ресурсный подход <sup>26</sup>	Построение сводного показателя совокупной и хозрасчетной результативности производственной деятельности экономических объектов	Главный критерий итогов производственной деятельности – величина добавленной стоимости, образующаяся при выпуске изделий и при оказании сервисных услуг. При полном исчислении добавленной стоимости учитывается совокупный объём вознаграждений, направляемых производителем лицам, непосредственно задействованным в производственном процессе.	Данный способ пользуется широкой популярностью. При рассмотрении подхода сопоставляют максимальные объёмы задействованных ресурсов с объёмом выпускаемой продукции либо с масштабом оказанных услуг. Параметры экономической результативности интерпретируют с позиции производительности.
Чистый денежный поток <sup>27</sup> (ЧДП)	ЧДП или Net Cash Flow (NCF), основополагающий инструмент оценки рентабельности проектов инвестиционного характера. Величина ЧДП отражает чистый	Net Cash Flow, NCF – ориентир, используемый для оценки экономической результативности инвестиционных инициатив. По результатам расчёта NCF инвесторы	ЧДП – чистая величина, образующаяся при сопоставлении поступлений наличных средств и выплат, возникающих при исполнении проекта; операции по движению

<sup>25</sup> 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).

<sup>26</sup> 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.

<sup>27</sup> Чистый денежный поток [Электронный ресурс] // Финансовый анализ: [сайт]. – Режим доступа: [https://1fin.ru/Finansovyy\\_slovariy/Chistyiy\\_deneghnyy\\_potok](https://1fin.ru/Finansovyy_slovariy/Chistyiy_deneghnyy_potok) (дата обращения: 07.04.2025).

	баланс поступлений и выплат денежных средств, возникающих в ходе реализации проекта, при одновременном исключении операций по вводу и изъятию капитала.	получают сведения о том, в какой мере предприятие создаёт свободные денежные потоки и возвращает вложенный капитал.	капитала исключаются из учёта.
Комплексный подход <sup>28</sup>	Проводится всесторонняя оценка совокупности метрик; метрики отражают состояние предприятия как системы, подверженной изменениям. Особое внимание уделяется траекториям выручки, показателям прибыли и величине активов при сопоставлении по временной оси.	Комплексная оценка работы предприятия не сводится к простой сумме исследований по изолированным сторонам производства и по отдельным критериям результативности. Речь идет о целостном, системном исследовании хозяйственных сторон организации, направленном на выявление взаимозависимостей между разными областями изучения и причин, лежащих в основе достигнутых показателей.	Сформировались две группы методов комплексной оценки экономической эффективности предприятия, эвристические методы и методы с расчетом единого интегрального показателя.
Свободный поток денег <sup>29</sup> .	Оценка сосредоточена на движении денежных средств при отсутствии регулярных затрат на его обеспечение.	Величина маржинальной прибыли задаёт индекс экономической результативности компании.	Финансовый индикатор способен принимать положительные и отрицательные значения. Отрицательное значение указывает на то, что выплаты компании превышают поступления денежных средств.
Сравнительный подход <sup>30</sup> .	критериев организации и определении похожих	Суть техники – сопоставление результатов работы	Метод рыночного сопоставления обладает рядом преимуществ. По

<sup>28</sup> 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.

<sup>29</sup> Free cash flow | Свободный денежный поток [Электронный ресурс] // Cbonds: [сайт]. – Режим доступа: <https://cbonds.ru/glossary/free-cash-flow/> (дата обращения: 09.06.2025)

<sup>30</sup> 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)

	по характеристикам организаций-аналогов.	одной организации с показательными значениями, характерными для схожих по профилю субъектов. На первый взгляд процедура кажется простой, хотя итоговые выводы в большой степени зависят от состава сведений и от способа обработки имеющихся данных. Методики сопоставления классифицируют по тому, какой показатель принят за основу, по способу расчёта и по происхождению данных, задействованных в вычислениях.	уровню сложности он заметно уступает оценке, основанной на доходах, поэтому работа с ним протекает проще. По итогам процедуры получается адекватная рыночная оценка фирмы. Для использования методики не требуется обязательного наличия узкоспециальной профессиональной экспертизы. Сложность сопоставительного подхода состоит в необходимости опираться на заключения профильных коллег. Сопоставимые результаты достигаются лишь при подборе предприятий с наивысшей степенью сходства. В расчётах задействован ограниченный набор индикаторов, что уменьшает объём исходных данных в процессе оценки.
Затратный подход	Главная идея методики – сосредоточить внимание на углублённом изучении издержек производства и на характере отражения данных издержек в итоговых показателях.	Базируется на активах, находящихся в распоряжении организации, но не учитывает вероятность изменения рыночной ситуации и будущие уровни прибыли и рентабельности организации.	Применяется для оценки стоимости организаций, функционирующих длительное время. Применение методики выявляет неэффективные расходы; на базе выявленных расходов предлагаются варианты сокращения затрат на производство.

Структурный подход Куросавы <sup>31</sup>	Состоит из трёх компонентов, оценка экономических показателей деятельности предприятий, оценка по качественным критериям и оценка экономических показателей отрасли.	Куросава полагал, что оценка деятельности организации служит инструментом для ретроспективного разбора и выявления перспективных направлений работы. Затем создаётся набор взаимосвязанных показателей, предназначенных для подготовки новых инициатив.	Характерные черты подхода: при проведении оценки учитывается внутренняя организационная схема предприятия. Одновременно проводится изучение экономических индикаторов сектора и оценка результативности деятельности отдельных хозяйствующих субъектов. накопленный опыт позволяет прогнозировать перспективы компании и осваивать дополнительные направления деятельности.
Бенчмаркинг	Предназначен для заблаговременного оповещения о возникающих внутренних рисках организации. Предусматривает процедуру оценивания количественных и качественных параметров товаров, обслуживания клиентов и рабочих практик с целью сопоставления полученных показателей с результатами ведущих и самых успешных конкурентов сектора.	Бенчмаркинг обеспечивает получение сведений, позволяющих сопоставлять финансовые показатели; оценивать работу персонала по функциям, типу и размещению; измерять длительность цикла разработки; выявлять показатели по качеству и услугам.	Затратный бенчмаркинг, проводимый по путям движения расходов и учитывающий главные факторы, влияющие на величину издержек, позволяет количественно оценить, как рост объёма производства или внедрение иной технологической схемы скажется на затратах, приходящихся на одну произведённую единицу.

Источник: составлено автором.

<sup>31</sup> 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.

Рассмотренные методы не противоречат друг другу; напротив, они открывают взаимодополняющие ракурсы для описания деятельности организации. Каждый метод ценен тем, что делает акцент на главных элементах тенденций, управленцы считают необходимым учитывать данные элементы при исследовании изменений в работе компании.

Подход, ориентированный на ресурсы, предполагает создание интегрального индикатора, фиксирующего общий и хозяйственно-расчётный уровни эффективности производственной деятельности хозяйствующих субъектов; при использовании такого инструмента величины потреблённых ресурсов соотносят с объёмом выпускаемой продукции и объёмом предоставляемых услуг, благодаря чему приём относится к широко используемым способам оценки результативности. Классификация общих подходов к оценке экономической эффективности, оформленная в таблице, расположенной выше, служит основой для выстраивания цельной картины методического набора, имеющегося у нынешних исследователей и практиков, занимающихся экономической аналитикой. Подход, основанный на вычислении чистого потока наличности как величины, получаемой путём вычитания расходов из поступлений, связанных с реализацией проекта, служит основным инструментом для оценки результативности вложений в проекты и позволяет вкладчикам понять, в какой степени организация превращает операционную деятельность в доступные денежные средства. Комплексный подход, направленный на детальное изучение экономических сторон деятельности предприятия и на выявление взаимного влияния отдельных блоков обработки и интерпретации данных, гарантирует полное отображение уровня эффективности хозяйственных операций. Прием, ориентированный на исследование движения наличных средств в условиях отсутствия регулярных расходов, необходимых для поддержания операционной активности, позволяет оценить ликвидность предприятия. Метод сравнительной оценки предусматривает сопоставление показателей результативности организации с данными аналогичных по профилю структур. В совокупности упомянутые подходы расширяют набор аналитических инструментов. Исследование затрат, направленное на изучение расходов в

производственной сфере, сочетается с концепцией Куросавы; концепция акцентирует организационную конфигурацию и оценку отраслевых экономических индикаторов. Введение бенчмаркинга как механизма раннего оповещения о вероятных сложностях превращает данный набор инструментов в многоуровневую систему оценок, позволяющую детально рассмотреть операционные и стратегические стороны работы производственного предприятия.

В ходе изучения способов оценки экономической результативности деятельности заводов и фабрик выявлен широкий спектр доступных аналитических приёмов. Указанные инструменты, доступные специалистам в научной и практической сферах, сочетают многофункциональность и широкий набор возможностей. При ресурсном варианте акцент делается на создании агрегированных индикаторов производительности и на оценке степени задействования доступных материально-технических средств. Комплексный подход подразумевает всестороннее изучение экономической системы предприятия с учётом взаимозависимости составляющих. Направление по затратам сосредоточено на изучении объёмов производственных издержек и на оценке того, как расходы отражаются в итоговых показателях. Метод сопоставления опирается на сравнение показателей между объектами или периодами, благодаря чему проявляются относительные преимущества. Одна стратегия позволяет соизмерять показатели компании с результатами сопоставимых структур, а бенчмаркинг, ориентированный на сравнение с ведущими игроками рынка, выступает как механизм заблаговременного выявления возникающих затруднений. В совокупности приёмы дополняют друг друга; каждый подчёркивает разные стороны деятельности организации. Нельзя рассчитывать на один метод как на средство, гарантирующее всесторонний охват разных сторон хозяйственной практики; оправдано сочетание нескольких аналитических приёмов с учётом поставленных задач. Данная проблема имеет высокую актуальность для исследования, направленного на создание механизма оценки экономических параметров, характерных для ветроэлектростанций. При создании такого механизма, помимо привычных финансовых и экономических индикаторов, нужно

принимать во внимание специфические характеристики, вызванные природой выработки энергии из возобновляемых ресурсов и условиями её эксплуатации.

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

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	Азрилиан	2018	Ориентация на постановленные задачи	Применим в стратегическом управлении

Источник: составлено автором

Метод «Максимальный результат при минимальных затратах» принят для последующих вычислений. Изучение многочисленных публикаций по методам измерения хозяйственной результативности организаций показало, единого, чётко регламентированного способа для полноценной оценки деятельности компании нет. На практике преимущественно применяется подход, основанный на качественной, то есть неколичественной, оценке, полученной на основе хозяйственных показателей, движения денежных средств и платежеспособности. Ограничение метода заключается в том, что интерпретация результатов затруднена

вследствие большого числа экономических индикаторов, привлекаемых к рассмотрению.<sup>32</sup>

Большинство экономистов считает, что в целом ответ на вопрос об экономической эффективности предприятия дают показатели рентабельности. В ходе исследования выявлены преобладающие показатели экономической эффективности деятельности предприятия; в таблице 3 перечислены фондоотдача, производительность труда, ресурсоотдача, оборачиваемость оборотных средств и др.

Несогласованность изменений ряда экономических индикаторов затрудняет сравнение рентабельности конкретной организации с показателями конкурентов.

Определять результативность организации следует посредством различных методик и наборов индикаторов – в числовом выражении и через качественную оценку; широко применяется объединённый сводный комплекс показателей. В перечне применяемых индикаторов выделяют, финансовые индикаторы; параметры качества выпускаемой продукции или предоставляемых услуг; показатели трудовой производительности; индикаторы удовлетворённости клиентов; степень приверженности сотрудников компании; и прочие сопоставимые критерии.

Эффективность рассматривают как комплексный, многогранный индикатор, проявляющийся изменениями во времени. Значения индикатора выражаются количественно и всегда имеют положительный знак.

Актуализация термина «эффективность» в связке с сопоставлением результатов у разных участников невозможна без учета широкого набора факторов и методологических принципов. Для корректного вывода требуется детальное и системное исследование.

Под каждой отдельной целью выбирают один или несколько показателей эффективности работы предприятия при соблюдении определённых

---

<sup>32</sup> 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.

рекомендаций<sup>33</sup>. Показатели должны быть сопоставимы, возможны числовое или денежное выражение; допускается качественная оценка. Для каждого показателя требуется временной компонент, позволяющий отследить изменение в течение нескольких учётных периодов. Формулировка показателя должна быть ясной и реалистичной, поскольку расчёт показателя должен приводить к конкретным итогам. Необходимо обеспечить достаточную достоверность исходных данных для корректного вычисления критерия.

Под «эффективностью» понимают итог, выходящий за рамки простого достижения цели; он проявляется в выраженном эффекте – например, в показателях, максимальных по объёму и величине, либо при превосходных характеристиках качества и надёжности при рационально организованных расходах. Установление приемлемого уровня расходов для каждой отдельной ситуации на практике оказывается почти невозможным.<sup>34</sup>

Эффективность хозяйственного функционирования понимают как показатель успеха деятельности, реализованных инициатив и мероприятий, соотношение достигнутого экономического результата (эффекта) и расходов задействованных факторов и ресурсов, позволивших получить результат. Под данной категорией понимают способность при ограниченном наборе средств либо обеспечить максимально большой объём выпуска, либо выполнить заданный объём продукции при минимальных расходах. Экономически рациональным состоянием считают организацию хозяйства, когда при дефиците ресурсов запросы потребителей удовлетворяются в максимально большой степени. В таблице табл.3 приведены типичные индикаторы для оценки результативности работы предприятия.

Таблица 3. Показатели оценки эффективности деятельности предприятия

Наименование показателя	Алгоритм расчета
-------------------------	------------------

<sup>33</sup> 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)

<sup>34</sup> Боголюбова, Н. П. Микроэкономическая теория: фирма в производстве и в сфере обмена: учебное пособие / Н. П. Боголюбова. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2018. – 189 с.

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
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.

Величину экономической результативности фиксируют через относительные шкалы; например, используют показатель, отражающий результат деятельности производств, нацеленных на решение общественных задач. Параметры результативности в отношении сектора, входящего в национальную экономическую систему, раскрывают механизм создания благ общественного характера через преобразование природных ресурсов с целью удовлетворения потребностей людей.

При оценке экономической отдачи производства применяют показатели в абсолютных величинах; среди них встречаются валовой внутренний продукт (ВВП) и валовой национальный продукт (ВНП). Валовой внутренний продукт (ВВП) отражает суммарную стоимость товаров материального производства и услуг, произведённых на территории страны. Валовой национальный продукт (ВНП) описывает общую стоимость конечной продукции и услуг, созданных внутри государства и за его пределами. В обоих определениях, подобно понятию результативности, подчёркивают связь между достигнутым итогом и понесёнными затратами.

При организации производственного цикла в компании, ориентированной на передовые технологии, под экономической результативностью понимают совокупность характерных показателей, отражающих специфику данного производства. Для количественной оценки показателей энергетической эффективности выпускаемой продукции и технологических операций на электростанциях используется показатель под наименованием «энергетическая эффективность», дающий возможность фиксировать объёмы потребления и утраты энергоресурсов.

Понятие «показателя энергетической эффективности» закреплено в стандарте ГОСТ Р 51380-99<sup>35</sup>. Под понятием подразумевают величину – абсолютную, удельную либо относительную – характеризующую потребление или потери энергетических ресурсов, соотносимую с продукцией любого назначения или с конкретным технологическим процессом.

Совокупный итог работы фирмы проявляется в том, каким образом её составные части взаимодействуют и служит мерилom экономической результативности. Показатели результативности выражаются как соотношение полученного эффекта к понесённым затратам или к задействованным ресурсам<sup>36</sup>.

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

Эффективность невозможна без результативности.

При оценке реальной деятельности предприятия учитывают следующие показатели, Чистая прибыль, Производительность труда, Рентабельность продаж, Рентабельность активов, Рентабельность собственного капитала, Денежный поток, Материалоёмкость и иные показатели.

Инструментарий оценки результативности хозяйственной деятельности – набор метрик, числовых показателей, относительных коэффициентов и

<sup>35</sup> ГОСТ Р 51380-99. Энергосбережение. Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции их нормативным значениям. Общие требования. Дата введения 2000–09–01. 6 с. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.elec.ru/library/gosts\\_e01/gost\\_r\\_51380-99.pdf](https://www.elec.ru/library/gosts_e01/gost_r_51380-99.pdf) (дата обращения: 21.12.2025).

<sup>36</sup> Савицкая, Г. В. Критерии и показатели экономической эффективности бизнеса / Г. В. Савицкая // Журнал исследований по управлению. – 2017. – Т. 3, № 2. – С. 26–48.

индикаторов изменения, служащих для проверки того, насколько применяемые предприятием средства и приёмы повышают экономическую результативность.

На основе ведущих финансово-экономических показателей собственник способен планировать затраты, составлять бюджет и выстраивать стратегию дальнейшего развития организации.

В условиях рыночной конъюнктуры, оценивая результативность деятельности фирмы, первоочередное внимание уделяют финансовым показателям. Прибыль служит основой для таких показателей, стимулирует рост капитала владельцев и повышает рыночную стоимость предприятия.

Аббревиатура KPI (Key Performance Indicators) используется для оценки результативности функционирования промышленного субъекта. Сущность заключается в том, что KPI – метрическая величина, позволяющая с высокой степенью достоверности определять, насколько организация или структурное подразделение движутся к заранее установленным стратегическим задачам.<sup>37</sup> В специализированном хранилище метрик аккумулируются различные показатели; отбор показателей осуществляет управленческая команда предприятия с учётом приоритетов, заданных на данный период. Иллюстративные примеры показателей для разных отраслей приведены в таблице 4.

Таблица 4. Примеры ключевых показателей деятельности в различных сферах

Вид деятельности	Ключевые показатели
Производство товаров	<p>Показатели использования ресурсов, стоимость ресурсов и объемы потребления (например, коэффициенты оборачиваемости активов, запасов, внеоборотных активов предприятия, дебиторской задолженности, фондоотдача и фондоемкость).</p> <p>Показатели производительности (показывают использование действующих мощностей).</p> <p>Показатели отдачи производства и активов.</p> <p>Показатели, отражающие итоги работы производства и т.д.</p>

<sup>37</sup> 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).

Продажа	<p>Индикаторы в большинстве случаев отражают итоги работы персонала службы сбыта.</p> <p>Показатели рентабельности, объема продаж, прибыльности и доходности. Метрики, отражающие поведение покупателей, применяют для измерения численности покупательской базы и качественных параметров взаимодействия с продуктом или сервисом. Примеры показателей, приток лиц, совершивших покупку; увеличение доли аудитории, периодически возвращающейся; снижение объёма негативных отзывов с последующей обработкой; рост потока хвалебных откликов.</p> <p>Денежные показатели (рост выручки по отделам; количество заказов; объём производства по каждому продавцу и т. п.).</p>
Управление персоналом	<p>Количественные показатели (нормы выработки; переработка; труд в выходные и праздничные дни; сверхурочная работа и т. п.).</p> <p>Критерий качества складывается из следующих показателей, сокращение числа дефектных изделий и снижение доли несоответствий; получение благоприятных откликов от заказчиков и оценка профессионализма персонала по отзывам; недопущение задержек при исполнении обязанностей; строгое соблюдение оговорённых сроков выполнения работ; прочие сопутствующие индикаторы.</p> <p>Организация внедряет комплекс материальных и нематериальных мер, направленных на повышение мотивации персонала. Денежные вознаграждения и премии предоставляются работникам за достижение установленных показателей и за проявленный высокий профессионализм. Нематериальные формы признания предусматривают публичные благодарности, дополнительные возможности для профессионального роста и специальные привилегии, помогающие удерживать ценных сотрудников.</p>

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

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

Процесс систематического контроля КРІ нужно выстроить как непрерываемую процедуру, призванную гарантировать, что фактические результаты соответствуют целям, установленным предприятием для реализации запланированных показателей. Такая постоянная фиксация КРІ создаёт основу для выработки адекватной управленческой стратегии и детализированного плана действий, направленного на выполнение задач, утверждённых руководством. С целью ускорения оборачивания капитала используют комплекс взаимосвязанных

мер<sup>38</sup>. Реализуют ряд мероприятий, расширение объёмов производства, ревизия технологических процессов, вложения в долгосрочные активы, приобретение новой техники или обновление существующего оборудования. Одновременно организуют инвентаризацию товарных остатков и предпринимают шаги по упорядочению задолженности со стороны покупателей. Чтобы нарастить выручку, ориентируются на увеличение выпуска, освоение новых каналов сбыта, привлечение дополнительных потребителей и рост бюджетов на рекламные и маркетинговые активности.

Табличная компоновка, где сгруппированы образцы метрической оценки результатов для направлений в частности, изготовление продукции, коммерческий блок и управление кадрами, подчёркивает пригодность подхода КРІ для широкого спектра служебных функций предприятия. В подразделе, ориентированном на производство товаров, перечисляются метрики использования ресурсов – например, скорость обращения запасов, дебиторской задолженности, основных средств и иных активов, в том числе индикаторы эффективности фондов и показатель капиталовой интенсивности фондов. Набор содержит показатели продуктивности, отражающие степень загрузки имеющихся мощностей и критерии, оценивающие отдачу от объёма выпуска и рентабельность используемых активов. В торговом направлении набор базовых метрик сосредоточен на оценке эффективности конкретного подразделения, рентабельность, объём реализованных продаж, уровень прибыли и показатели доходности. Сегмент измерений, ориентированный на покупателей, фиксирует расширение клиентской базы и её качественные характеристики; финансовые индикаторы отражают колебания выручки и объёма заказов. В службе управления персоналом метрики разделены на две категории – количественные, фиксируют соблюдение норм выработки и случаи переработки; качественные, направлены на снижение дефектов и на оценку работы сотрудников с позиции клиентов. Дополнительно учитываются индексы

---

<sup>38</sup> 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](https://www.cfin.ru/management/strategy/plan/industry_keyindicators.shtml) (дата обращения: 23.05.2025).

мотивации, предусматривающие системы стимулирования и премирования работников. Широкий состав КРІ обязывает проводить скрупулёзную селекцию метрик, предпочтение дают индикаторам, максимально соотносящимся с профилем предприятия и задачами, решаемыми им. Аналогичные принципы действуют для ветроэлектростанций; требуется учитывать специфику выработки электроэнергии.

Подводя итог изложенному, можно отметить, совокупность показателей результативности не представляет собой фиксированный перечень измерителей; управленческий механизм предназначен для адаптации к меняющимся режимам работы компании и к её приоритетным стратегическим ориентирам, задаваемым руководящими органами. При формулировке отдельной цели выбирают один либо несколько индикаторов, соответствующих содержанию цели. Отбор проводится по нескольким требованиям, измеримость и пригодность для количественной или качественной оценки; наличие временной ориентации, позволяющей фиксировать изменения по времени; чёткость формулировки и реальная выполнимость; достоверность первичных сведений, лежащих в основе расчётов. Понимание того, что регулярный контроль КРІ необходим при подготовке управленческих решений и при составлении обоснованного плана мероприятий для достижения поставленных целей, выходит на первый план. В отношении ветроэнергетических предприятий подход получает дополнительные особенности, производственные показатели изменяются под влиянием природно-климатических факторов, поэтому требуется объединять традиционные экономические индикаторы с параметрами, отражающими ветровой ресурс территории размещения станции.

Для включения в механизм сбалансированной оценки показателей эффективности (КРІ) требуется соблюсти ряд предварительных условий. При выборе объекта мониторинга устанавливают уровень рассмотрения – предприятие производственной деятельности, отдельное организационное звено или конкретный цех; параллельно проводят подбор факторов, влияющих на достижение стратегической цели, поставленной организацией. Грамотно выполненный отбор сокращает список КРІ, исключают метрики без практической ценности и

оставляют лишь индикаторы, служащие объективной оценкой результатов работы в текущем периоде.

Сопоставление общепринятых трактовок понятия «экономическая эффективность» выявляет совокупность главных смысловых акцентов. Затем упомянутые акценты систематизируются и сводятся в компактное, ёмкое резюме, раскрывающее сущность термина.

Эффективность в экономической сфере показывает, в какой мере общество рационально распоряжается дефицитными ресурсами при выпуске товаров. Оценку показателя в экономической теории проводят различными способами, через исследование порядка размещения ресурсов, путём сопоставления издержек и через учёт объёмов произведённых для потребления благ.

Под производственной результативностью понимают состояние, предприятия стремятся к выгодному соотношению используемых средств, направленному на сокращение издержек выпуска. Рациональность распределения означает размещение ресурсов экономики с учётом стоимости, что обеспечивает достижение наивысшего уровня удовлетворения потребительского спроса.

В. Паретто, признанный специалист в областях экономики и социологии, понимал эффективность как состояние, при котором любые преобразования, не наносящие вреда никому и приносящие некоторым субъектам выгоду по собственному мнению самих субъектов, считались улучшением; он признавал право на любые изменения, не причиняющие никому дополнительного ущерба.<sup>39</sup> В экономической практике широко используется принцип Паретто, или правило 80/20, согласно которому порядка 20% приложенных усилий порождают примерно 80% итогового эффекта.<sup>40</sup>

Для конкретного предприятия повышение показателей достигается при максимально полном использовании имеющихся ресурсов, целенаправленных

---

<sup>39</sup> Агапова, И. И. История экономической мысли: курс лекций / И. И. Агапова. – М.: Экмос, 1998. – 245 с.

<sup>40</sup> 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.

усилиях ради получения лучших итогов и внедрении регулярного контроля за сбалансированным перечнем приоритетных индикаторов результативности.

## **1.2. Современное состояние и тенденции развития мировой и российской ветроэнергетики**

Роль нефти как главного энергоносителя остаётся ведущей на глобальной арене; показатели её разработки и спроса показывают стабильный рост. На второе место по значимости среди приоритетных энергоносителей вышел уголь, в 2023 году потребление угля достигло рекордных 8,5 миллиардов тонн, результат, который ещё три года назад ряд специалистов считал невероятным. В энергетических изменениях 21 века видно сочетание использования топлива минерального происхождения и возобновляемых источников энергии; доля ископаемых источников остаётся преобладающей. Сектор энергопроизводства служит основой экономики и связывает различные промышленные направления в каждом государстве. Выработка электроэнергии на ядерных установках, как правило, обходится дороже, чем у большинства альтернативных источников. В глобальном измерении ядерные мощности сосредоточены в 31 государстве, суммарно функционируют сто девяносто две станции, где развернуто четыреста тридцать восемь энергоблоков. На территории Российской Федерации насчитывается десять АЭС; суммарно там функционируют тридцать три энергоблока.<sup>41</sup> По объёму потребления природный газ располагается на третьей позиции, и его использование сопоставимо с потреблением угля.

Отчётливое увеличение объёмов производства и потребления энергоносителей рассматривается как признак продолжающегося роста

---

<sup>41</sup> Сколько атомных станций работает в мире и в России? [Электронный ресурс] // Росатом: [сайт]. – Режим доступа: <https://rosatommd.ru/mediacenter/informatory/skolko-atomnyix-stancij-rabotaet-v-mire-i-v-rossii.html> (дата обращения: 13.06.2025)

международного спроса; явление объясняется подъёмом экономической активности на глобальном уровне, зафиксированным вплоть до 2022.

Производство электричества сегодня во многих странах опирается на ископаемые виды топлива – нефть, газ и уголь; доступ к указанным запасам распределён неравномерно, а объёмы ограничены. Столкнувшись с перебоями в поставках и истощением ископаемых ресурсов, специалисты энергетической сферы в разных странах сосредоточили усилия на создании и внедрении технологий, позволяющих вырабатывать электричество с использованием возобновляемых источников при низком экологическом следе.

В РФ обеспечение промышленности и населения электрической и тепловой энергией в настоящее время преимущественно осуществляется за счёт трёх источников производства электро- и теплоэнергии, тепловые электростанции, работающие на ископаемом топливе; гидроэлектростанции; атомные электростанции.

ВИЭ объединяют гидроэнергетику, ветровые ресурсы, солнечную энергию, геотермальные ресурсы недр и технологии обращения с биомассой. Особое внимание заслуживает атомная энергетика, при использовании атомных установок электричество и теплота вырабатываются посредством преобразования энергии, заключённой в ядре. Сравнительный разбор преимуществ и ограничений каждого из перечисленных видов приведён в Приложении 1.

Увеличение общей выработки электроэнергии на планете объясняется ростом численности населения, прогрессивными технологическими изменениями и повышением спроса со стороны домохозяйств и промышленных предприятий на фоне обострения дефицита энергоресурсов. Цифровая перестройка энергетического сектора, широкое распространение распределённых источников генерации и внедрение систем автоматизации служат движущими силами создания новой модели работы электроэнергетики. С усилением движения в сторону интеллектуального управления и низкоуглеродной модели хозяйствования растёт потребность в развитии комплементарного для энергетики направления – технологий накопления и длительного хранения энергии. По оценке Агентства

Bloomberg, глобальные объёмы средств хранения электрической энергии должны увеличиться с 9 ГВт. ч. в 2019 г. до 1095 ГВт. час. к 2040 году,<sup>42</sup> что рассматривается как альтернатива вводу в эксплуатацию новых генерационных мощностей.

Наблюдения, изложенные в части работы, послужили основанием для выделения ряда главных выводов, непосредственно связанных с предметом диссертации. Прежде всего отметим, что планетарный энергокомплекс переживает глубокую и масштабную перестройку. Сочетание факторов в сферах геополитики, экономики, экологии и технологий задаёт рамки текущих преобразований. Зафиксированный вплоть до 2022 года подъём глобального энергопотребления – свидетельство продолжительного увеличения международного спроса в условиях экономического развития – сопровождается глубинной перестройкой энергетической структуры, проявляющейся в постепенном росте вклада источников энергии возобновляемого характера. Как уже указывалось, Китай, США и Россия сохранили статус ведущих потребителей; суммарная доля трёх стран близка к половине общего потребления. Интенсификация процессов электрификации сопровождает переход к новой фазе развития энергетики и создаёт реальные основания для масштабирования солнечной и ветровой генерации на четвёртом этапе. Изучение экономической рентабельности ветроэлектростанций приобретает приоритетное значение для модернизации энергетического сектора.

На рубеже столетий (XXI) США утратили монопольный статус в области выработки электроэнергии. Комплексная оценка множества показателей – от обеспеченности первичными энергоресурсами и разведанных месторождений минеральных запасов до объёмов производства продовольствия и товаров промышленного назначения, от уровня научных исследований до оснащённости новейшими образцами вооружения и программ пилотируемых полётов в космос – привела к выводу, что среди ведущих стран оказались три, Китай; следом идёт США; замыкает тройку Россия; см. (рис.3).

---

<sup>42</sup> Борисов, М. Г. Развитие систем хранения электрической энергии: новые возможности для стран Востока / М. Г. Борисов // Восточная аналитика. – 2021. – № 1. – С. 22–32.

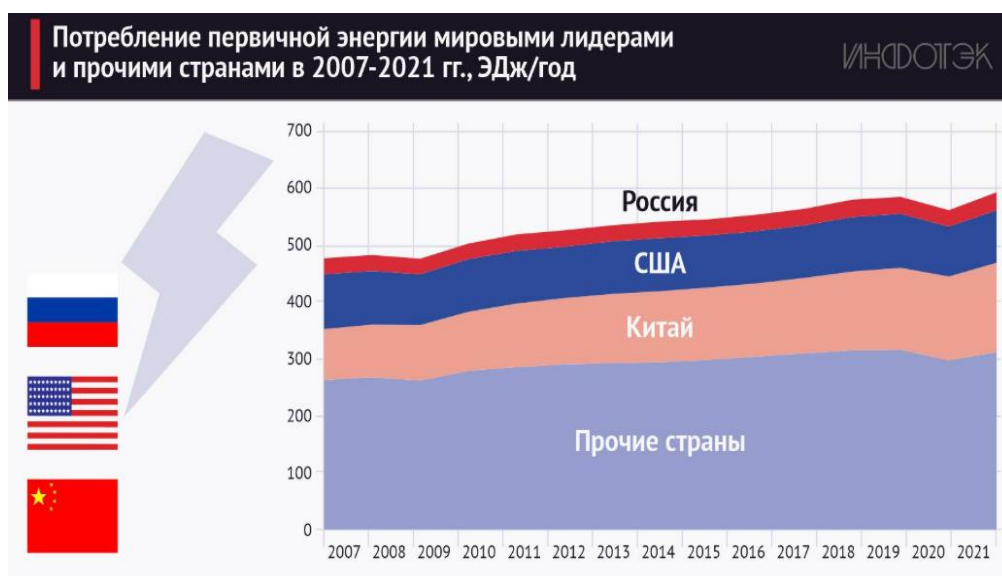


Рисунок 3. Динамика потребления первичной энергии мировыми лидерами в период с 2007 по 2021.

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

В 2019–2020 годах спрос на электроэнергию снизился из-за пандемии COVID-19 и остановки промышленного производства. Аналитическая выборка охватывает данные до 2021 года, поскольку после начала военного конфликта России с Украиной дальнейшая статистика была приостановлена. На долю Китая пришлась основная часть прироста глобального энергопотребления – 58,24%. Тройка лидеров по потреблению – Китай, США и Россия – обеспечивает почти половину глобального спроса; суммарная доля трёх названных стран вскоре приблизится к 50% <sup>43</sup>. В конечном потреблении энергоресурсов доминирует ускоренная электрификация как главное направление энергетического перехода. В 2022 году геополитическая ситуация привела к удорожанию электроэнергии в странах Европы, одновременно обострила дефицит ископаемых ресурсов и усилила акцент на климатических задачах «зеленой повестки». В ответ глобальная

<sup>43</sup> 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).

энергетика перешла к четвертой фазе энергетического перехода с приоритетом генерации из ВИЭ-источников<sup>44</sup>, например ветровыми мощностями (рис.4).

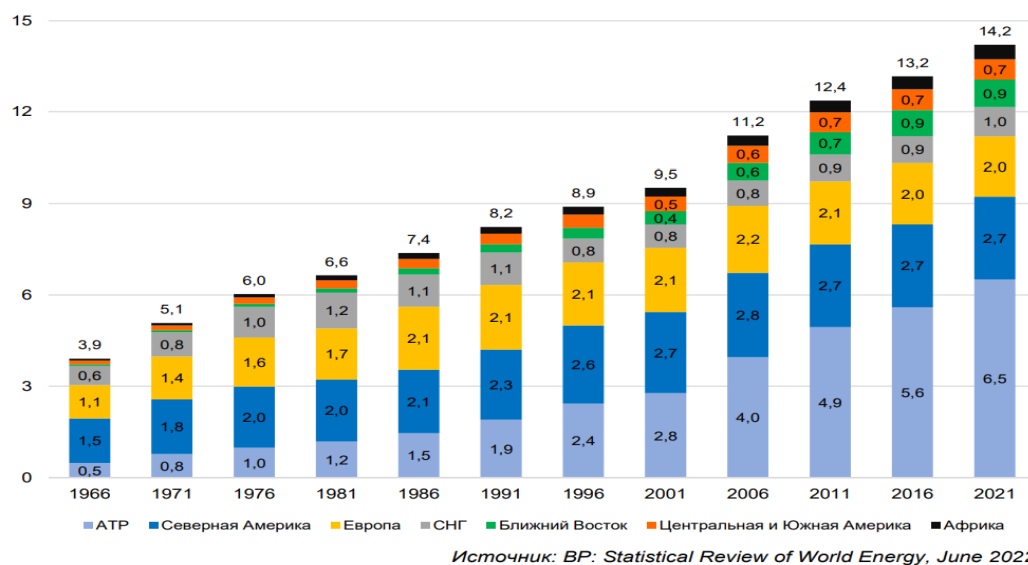


Рисунок 4. Динамика мирового потребления энергии за период 1966-2022 годы.

Источник: Statistical Review of World Energy, June 2022

В РФ действует двухуровневый рынок электроэнергии, оптовый и розничный. Нормативная основа регулирования рынка электроэнергии состоит из следующих актов. Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике». 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». 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 утратившими силу некоторых законодательных актов Российской Федерации в связи с принятием Федерального закона «Об электроэнергетике».

<sup>44</sup> 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.

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».

Опираясь на приведённые данные относительно правовой и нормативной базы регулирования и организационных характеристик рынка электроэнергии в Российской Федерации, можно получить целостное представление об институциональном окружении, где ветроэлектростанции действуют как участники оптового сегмента, розничного звена обращения электрической энергии и сегмента мощности. Двухъярусная организация торговой системы – разделение зон оптовой и розничной торговли – задаёт основу для многоаспектного механизма расчёта цен. В указанном механизме оптовые ценовые показатели влияют на уровень розничных цен. Либерализация, достигшая стопроцентного уровня с первого января две тысячи одиннадцатого года, привела к замене государственного установления тарифов рыночным механизмом. Нормативная основа отраслевого регулирования – среди её компонентов Федеральный закон «Об электроэнергетике» и постановления Правительства Российской Федерации, регламентирующие функционирование розничных рынков и устанавливающие правила оптового рынка; указанные акты задают юридические пределы для всех субъектов энергетического сектора. В ветроэнергетике механизм договоров предоставления мощности обеспечивает возврат вложений и одновременно создаёт условия для расширения генерации на базе возобновляемых источников энергии. Понимание указанной институциональной среды необходимо для надёжной экономической оценки ветроэлектростанций и для выработки адекватных процедур мониторинга.

К 2011 году в РФ завершился процесс либерализации энергетического рынка, административная система назначения тарифов уступила место механизмам рыночного ценообразования; котировки оптового сегмента используются в качестве ориентира при расчёте розничных цен. С 1 января 2011 года либерализация достигла 100% и была внедрена одновременно на оптовом и

розничном уровнях. С указанной даты зафиксирован последовательный рост тарифов на электроэнергию.

По объёму выработки электроэнергии Российская Федерация занимает одно из ведущих пяти мест по всему земному шару; одновременно установленная мощность её ВИЭ-источников заметно ниже аналогичных показателей у прочих стран данной группы, что выражается в разгах меньших величинах. Сводные показатели по объёму потребления, объёму производства и потребностям в электроэнергии Единой энергетической системы России<sup>45</sup> сведены в табл. 4 и касаются периода 2019-2025 годов (прогноз). Разбивка выработки по видам генерации иллюстрирует вклад каждого типа источников в суммарный объём. Исследование долей, приведённых в табл.5, показывает соответствие структуры российской энергосистемы глобальным тенденциям, лидирующее место занимают ТЭС, затем идут атомные станции и гидроэлектростанции, замыкают распределение мощности источники ВИЭ.

Сведения о соотношении выработки электроэнергии Единой энергетической системы России, представленные в вышеуказанной таблице, служат основой для выявления направлений изменения национальной электроэнергетики и для расчёта доли источников возобновляемой энергии в совокупной структуре генерирующих мощностей. Сопоставление данных по потреблению электроэнергии показывает стабильную тенденцию увеличения объёмов, от одной тысячи тридцати двух целых восьми десятых миллиарда киловатт-часов в две тысячи девятнадцатом году до прогнозируемых одной тысячи девяноста семи целых двух десятых миллиарда киловатт-часов в две тысячи двадцать пятом году. Указанная картина рассматривается в роли индикатора поступательного развития национальной экономики и объясняется ростом энергопотребления в промышленном секторе и среди населения. Около двух третей общей выработки приходится на ТЭС; за ними по объёму следуют АЭС и гидроэнергетические сооружения. Доля ветровой и

---

<sup>45</sup> 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_325453/) (дата обращения: 08.06.2025).

солнечной генерации остаётся сравнительно низкой, но фиксируется её постепенный рост. Рост установленной мощности ветровых и солнечных электростанций зафиксирован, с двух тысяч четырёхсот одного целого пятидесятих мегаватт в две тысячи девятнадцатом году до пяти тысяч четырёхсот двадцати двух целых одной десятой мегаватт к две тысячи двадцать пятому году, что указывает на широкие перспективы развития данного направления. Параллельно увеличивается число часов эксплуатации установленной мощности, отражающее улучшение показателей работы, с шестисот пятидесяти шести часов в год до одной тысячи восьмисот шестидесяти семи часов в год для ветровых и солнечных электростанций.

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

Располагая большими и качественными запасами энергии солнца и ветровых потоков, Россия по темпам внедрения установок, вырабатывающих электричество от упомянутых источников, намного уступает не только другим членам БРИКС, но и ведущим нефтегазодобывающим странам (Норвегия, Канада, Саудовская Аравия, ОАЭ, Катар и др.). На территории России станции, вырабатывающие электричество на базе возобновляемых источников, строят по договорам предоставления мощности (ДПМ), направленным на возврат вложенных средств. При успешной реализации первой программы ДПМ ВИЭ<sup>46</sup> в 2024 году Россия по суммарной установленной мощности фотоэлектрических и ветряных электростанций занимала лишь место в пятой десятке государств.

На фоне обострения международной политической конъюнктуры прогноз траекторий развития энергетического комплекса на международной арене и в России на период до 2040 года учитывает замедление темпов экономического роста, в том числе российской экономики. К 2040 году прогнозируется, что доля выработки электроэнергии из чистых источников достигнет 77%<sup>47</sup> (рис. 5); широкое распространение ВИЭ в производстве электроэнергии и тепла во многом

<sup>46</sup> 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).

<sup>47</sup> 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).

объясняется стагнацией экономики и повышением стоимости электрической энергии. В планируемом горизонте до 2040 года ископаемые виды топлива сохраняют преобладающее значение в секторе электрогенерации, а доля ресурсов ВИЭ будет возрастать медленными темпами.<sup>48</sup>

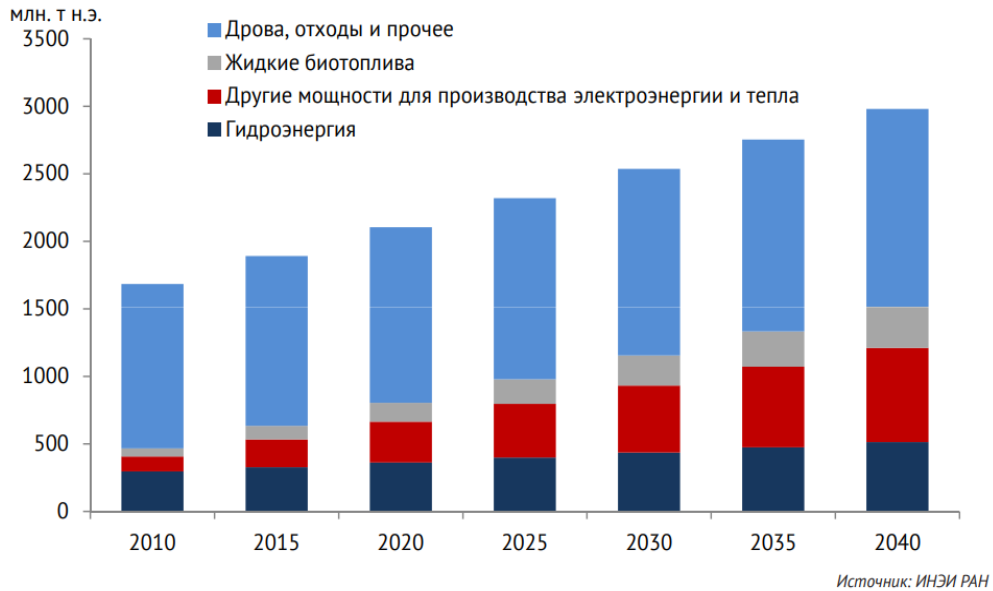


Рисунок 5. Потребление ВИЭ по видам, базовый сценарий.

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

Отрасль, использующая кинетическую энергию ветра для генерации электричества, относится к возобновляемым и экологически чистым источникам энергии. К положительным сторонам такой генерации относятся сравнительно низкие расходы на эксплуатацию и отсутствие эмиссии вредных соединений в атмосферу. Среди минусов – высокие капитальные затраты на монтаж и сооружение объектов; в дополнение требуется привлечение крупномасштабных инвестиций для развития соответствующей инфраструктуры.

В разных частях света 54 государства воздвигли новые ветропарки. Объёмы выработки электричества выросли практически повсеместно, за исключением

<sup>48</sup> 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)

территории Европы и Северной Америки. Особую долю внес Китай, введённые установки добавили 75 ГВт, что составляет примерно 65% глобального прироста. Прирост со стороны США достиг 18,8 ГВт; у Германии он составил 11,4 ГВт; у Индии прирост равнялся 7,1 ГВт. У Бразилии прибавилось 4,8 ГВт.

Глобальный совет по ветроэнергетике (GWEC) зафиксировал, что 2023 год отметился заметным прогрессом в развитии ветрогенерации, что показало роль ветроэнергетики как приоритетного источника чистой энергии в перспективе.

Суммарная установленная мощность ветровой энергетики превысила 1 тераватт.

Зарубежные энергосистемы отличаются неоднородной структурой генерирующих мощностей и дисбалансом по электроэнергии и мощности в отдельных национальных системах энергоснабжения, что вынуждает поддерживать дополнительные резервы, повышает риск перегрузки электрических сетей и приводит к иным форс-мажорным ситуациям.

Вопрос оптимизации расхода энергии входит в число приоритетных задач, требующих особого внимания в государствах, находящихся на этапе развития экономики. Под термином понимают продуманное использование топливно-энергетических ресурсов в ходе производственной и хозяйственной деятельности предприятий. На практике такое решение позволяет достичь прежнего уровня энергоснабжения зданий или технологических циклов при уменьшенном объеме потребляемой энергии.

Критерий, показывающий эффективность использования энергии на фабриках и заводах, – энергоёмкость выпуска; под показателем понимается доля расходов на энергоносители в общей цене изготавливаемых товаров. Сокращение потребления энергии на единицу продукции снижает затраты на выпуск и укрепляет конкурентные позиции предприятий. Средняя энергоёмкость предприятий России по сравнению с Канадой, Финляндией, США, Германией и Японией выше в 2-3 раза, что указывает на наличие резервов для повышения энергетической эффективности национальной промышленности. Повышение

энергоэффективности в ряде отраслей промышленности уменьшает расходы на производство на 20-30%.<sup>49</sup>

Сфера энергетики подпадает под регулирование государственной власти независимо от уровня развития экономики и модели хозяйствования, поскольку её роль для экономики страны носит стратегический характер; дополнительно структурные элементы сети и сопутствующие инфраструктурные компоненты энергосистем квалифицируются как естественные монополии. Меры государственного надзора направлены на согласование интересов государственных органов, представителей отрасли и конечных потребителей и на создание условий для стабильной работы промышленного сектора.

В глобальном масштабе в ряде государств (число государств приближается к 100) действуют официальные программы по внедрению и масштабированию ВИЭ, и установлены количественно выраженные целевые ориентиры развития ВИЭ на среднесрочную и долгосрочную перспективы.<sup>50</sup> Накопленный опыт показывает, что при темпах годового увеличения, достигающих нескольких десятков процентов, текущий объём внедрения ВИЭ невозможен без решительной государственной поддержки в сферах законодательства, бюджетной политики и политического сопровождения.

Ожидается, что техническая трансформация ветроэнергетической отрасли в целом приведёт к увеличению размеров турбин, снижению затрат на выработку единицы электрической энергии, а ветроэнергоустановки будут чаще эксплуатироваться совместно с системами накопления энергии или установками для производства водорода. Во всех сегментах прогнозируют сокращение издержек; показатель LCOE в 2035 году окажется ниже уровня 2020 года, у

---

<sup>49</sup> Энергоэффективность // Межрегиональная Энергосберегающая Компания. [Электронный ресурс]. URL: <https://mes-energo.ru/energoeffektivnost-predpriyatij> (дата обращения: 21.12.2025).

<sup>50</sup> Возможно ли рассчитать окупаемость ВИЭ\* в России? // Энергетика и промышленность России. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eprussia.ru/epr/364/5415968.htm> (дата обращения: 21.12.2025).

наземных парков снижение составит 27%, у морских ветряных электростанций – в пределах 17–35%.<sup>51</sup>

Достижение целевых ориентиров глобальной экологической повестки и уменьшение следа, создаваемого углеводородами, требует наращивания капитальных вложений в строительство заводских комплексов и создание сетей для эксплуатации ветряных электростанций. Администрации ряда государств осознают необходимость программ по сохранению приемлемых климатических условий. Вместе с тем они продолжают стимулировать вложения в традиционные энергоносители из-за относительной дешевизны. Экономическая отдача продолжает играть главную роль, инициативы по ветровой генерации пока показывают ограниченную доходность, что заставляет регуляторов предпочитать поддержку более дешёвых углеводородных решений.

На территории России работа по обороту электрической энергии организована на двух взаимосвязанных уровнях – розничном и оптовом. В оптовой части поставщики предлагают покупателям два вида продукции, мощность и электроэнергия. Операционная деятельность оптового сегмента распространяется на границы субъектов, входящих в состав Российской Федерации; указанные территории сгруппированы в зоны с ценовой привязкой и зоны, свободные от ценового регулирования.<sup>52</sup>

Баланс энергоресурсов, присущий Единой энергетической системе России<sup>53</sup> (ЕЭС), считается одним из самых экологически ориентированных на международной арене. За период в 15 лет совокупная установленная мощность российской электроэнергетики увеличилась на 18%; одновременно большинство генерирующих объектов было модернизировано. Вклад природного газа совместно с экологичным углеводородом составляет 48% в энергобалансе России, а при

---

<sup>51</sup> Что говорят эксперты ветроэнергетики о будущем отрасли // Power Green. [Электронный ресурс]. 17.08.2022. URL: <https://powergreen.pro/trendy/161-chto-govoryat-eksperty-vetroenergetiki-o-budushchem-otrasli> (дата обращения: 21.12.2025).

<sup>52</sup> Структура формирования цены на рынке электроэнергии [Электронный ресурс] // Калужская сбытовая компания: [сайт]. – Режим доступа: <https://kskcaluga.ru/legal/pricing/electricity-market-price-formation/> (дата обращения: 12.06.2025).

<sup>53</sup> 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)

суммировании долей атомной и гидроэнергетики общая доля «зеленой» генерации достигает 85%<sup>54</sup>.

Сегодня энергетическая система Российской Федерации рассматривается как одна из самых надёжных и сбалансированных на глобальном уровне; состав объединяет электростанции разного технологического профиля. Надёжность поставок электроэнергии остаётся высокой даже при экстремальных природных явлениях, благодаря невысокому удельному весу неконтролируемых генераторов. На долю теплоэлектростанций приходится примерно 66% национального парка электростанций; большинство теплоэлектростанций работает на газовом топливе. Гидроэлектростанции дают порядка 20% выработки, атомные станции – 11,9%, ветровые и солнечные установки в сумме – примерно 2%. К 2023 году доля генерации без углерода в России достигла 34%<sup>55</sup>, что считается положительным показателем энергетического развития.

На территории России на сегодняшний день три направления возобновляемой энергетики обладают наибольшими возможностями практического применения, производство энергии из биомассы; наземные ветровые установки, используемые преимущественно в зонах, не подключённых к централизованным системам электроснабжения; солнечные фотоэлектрические технологии.<sup>56</sup>

Суммарная установленная мощность 01.02.2025 возобновляемых источников энергии на территории Российской Федерации составляет 6,59 ГВт. Основную часть мощности дают ветровые и солнечные станции с показателями 2,57 ГВт и 2,55 ГВт соответственно; дополнительно задействованы малые гидроэлектростанции (мощностью до 50 МВт) с общей генерацией 1,3 ГВт. Дополнительно в эксплуатации находятся установки на биомассе, биогазе,

---

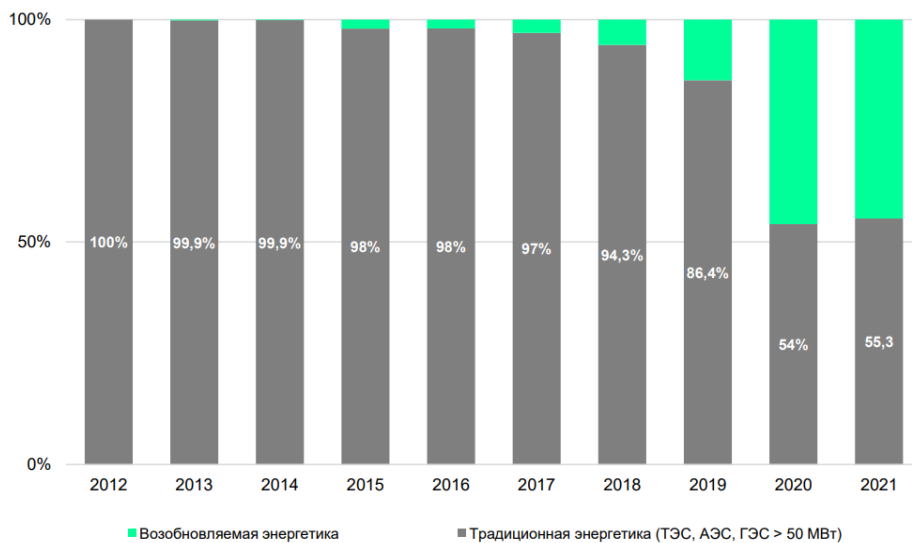
<sup>54</sup> Путин: энергобаланс РФ – один из самых «зеленых» в мире [Электронный ресурс] // Энергетика и промышленность России: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.eprussia.ru/news/base/2024/7360342.htm>

<sup>55</sup> 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).

<sup>56</sup> 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.

свалочном и коммунальном газе, твердых бытовых отходах и геотермальной энергии; суммарная мощность перечисленных установок превышает 150 МВт.<sup>57</sup> По мере усиления экономического и промышленного развития страны прогнозируется рост спроса на электроэнергию, производимую ВИЭ-генераторами (см. рис.6).

Среди генерации энергии на ВИЭ-источниках преобладает ветровая энергия<sup>58</sup> (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.

<sup>57</sup> Статистика ВИЭ [Электронный ресурс] // Ассоциация развития возобновляемой энергетики: [сайт]. – Режим доступа: <https://rreda.ru/industry/statistics/> (дата обращения: 01.05.2025).

<sup>58</sup> 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).

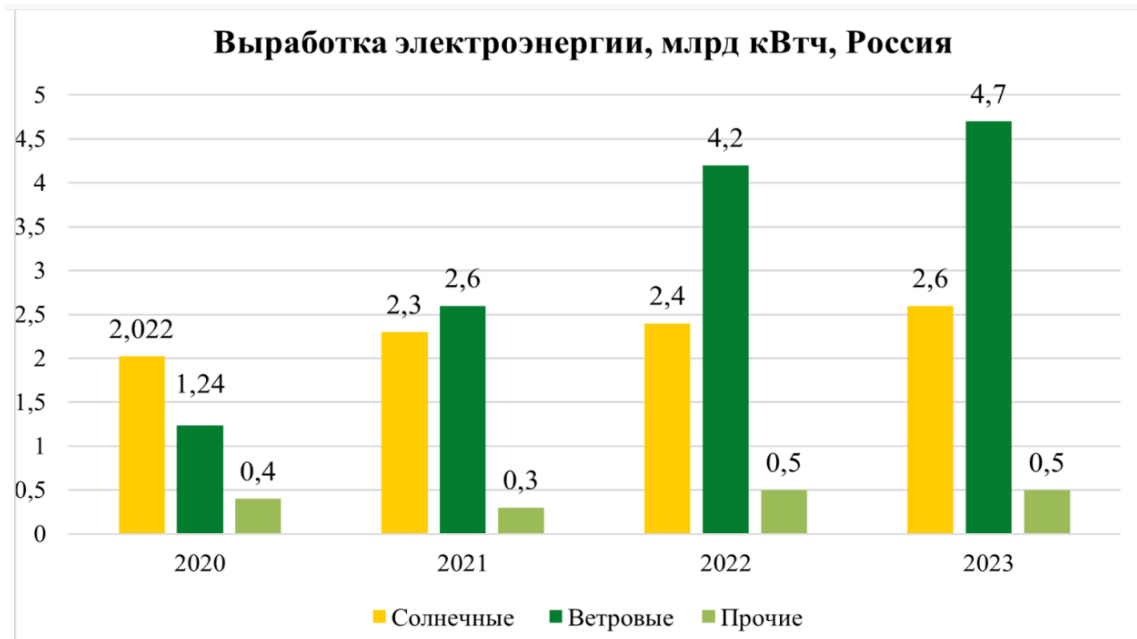


Рисунок 7. Выработка электроэнергии по видам источников за 2020–2023 годы.

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

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

Величина тарифа на каждый киловатт-час выработанной электроэнергии служит показателем, влияющим на перспективы экономического роста. Директор Российской ассоциации ветроиндустрии И. Брызгунова отмечает, что установки нынешнего поколения способны поставлять электроэнергию по цене от 3,5 рубля за киловатт-час и удерживать такую стоимость в течение срока эксплуатации оборудования – примерно 20 лет – поскольку топливо не требуется.<sup>59</sup>

Команды российских исследователей, выполнившие соответствующие работы, зафиксировали корреляцию, для того чтобы ветровые электростанции начали обеспечивать заметный вклад в национальную энергосистему, размещение новых объектов нужно планировать в районах с годовой усреднённой ветровой скоростью не ниже 8 м/с, а номинальная (установленная) мощность каждой ветроустановки должна составлять минимум 1000 кВт.<sup>60</sup>

<sup>59</sup> 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).

<sup>60</sup> 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>

Сегодня главную роль в генерации энергии из возобновляемых источников играют солнечные и ветровые установки. По расчётам, теоретически достижимый объём выработки ветровой генерации в Российской Федерации превышает 50 000 кВт·ч /год; экономически реализуемый ресурс оценивается в 260 млрд кВт·ч /год, что соответствует примерно одной трети совокупной выработки электроэнергии по стране.<sup>61</sup>

Выводы, вытекающие из исследования отмеченных параметров российской электроэнергетики, указывают на наличие принципиальных внутренних особенностей национальной энергосистемы; при подготовке методик оценки экономической эффективности ветроэлектростанций указанные различия необходимо учитывать напрямую. В качестве одной из характерных черт Единая энергетическая система России показывает высокую степень надёжности и внутреннюю сбалансированность; такое состояние объясняется диверсификацией генерирующих мощностей и наличием электростанций разных базовых типов. Исследовательские оценки фиксируют технико-экономический ресурс ветроэнергетики на уровне 260 миллиардов киловатт-часов в год; объём эквивалентен примерно трети совокупного производства электроэнергии в России и служит реальной основой для опережающего развития сектора. Одновременно удельный вес возобновляемых поставок в национальной энергоструктуре остаётся сравнительно малым; данное обстоятельство подчёркивает отличие России от ведущих стран Европейского союза и иных развитых государств, внедряющих программы «зелёной» энергетики. Чтобы полностью реализовать возможности, требуются не только технические решения и инвестиции, но и создание адекватной методологии вместе с набором инструментов для оценки и регулярного мониторинга экономических индикаторов проектов ветроэнергетики.

За первое полугодие 2023 года электростанции на ветровой тяге в собственности АО «Новавинд» выработали 1,1 млрд кВт·ч электроэнергии.

---

<sup>61</sup> 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.neftgaz.ru/articles/vozobnovlyaemye-istochniki-energii/663245-perspektivy-razvitiya-vetroenergetiki-v-rossii/> (дата обращения: 14.06.2025)

Прирост объема генерации в 2023 году составил 110 млн кВт-ч по сравнению с первым полугодием 2022 года, когда объем выработки превысил 987 млн кВт-ч.

Госкорпорация «Росатом» занимает ведущую роль в становлении сектора ветровой энергетики в Российской Федерации, дочерняя компания АО «Новавинд» аккумулирует ветровые активы корпорации и выполняет экспертизу в передовых направлениях и технологических платформах отрасли электроэнергетики.

Инициатором внедрения в российской практике прогрессивной технологии – ветрогенераторов с постоянными магнитами – выступило АО «Новавинд», тогда как все отечественные ВЭС эксплуатируют редукторные машины.<sup>62</sup>

На площадке компании «Атоммаш» открылся завод по выпуску узлов, необходимых для ветроэнергетических установок, не имевший аналогов в России (рис.8).

Скорость наращивания генерации из возобновляемых ресурсов превышает показатели прочих первичных источников энергообеспечения. Особенно выражено в ветроэнергетике и фотоэлектрике, прогнозируется рост свыше 10-кратного уровня в период с 2022 по 2050 годы.<sup>63</sup>

---

<sup>62</sup> 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).

<sup>63</sup> 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).



Рисунок 8. Завод по производству ключевых узлов ветроэнергетических установок.

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

В 2022-м году на территории РФ эксплуатировалось 37 объектов ветровой генерации; одновременно функционировали 7 автономных, полностью изолированных энергосистем. Более 10 масштабных ветропарковых проектов находились на стадии проектирования и строительства. В России сектор ветроэнергетики главным образом представлен вертикально интегрированными предприятиями, достигающими высокого уровня локализации комплектующих и объединяющими эксплуатацию объектов, инжиниринговые услуги и изготовление оборудования. Среди заметных участников рынка – «Роснано» и Госкорпорация «Росатом».

Нельзя отрицать потребность во внедрении ветровой генерации в единую энергетическую сеть России в свете ограниченности запасов органического ископаемого топлива. По сравнению с традиционными способами производства электроэнергии главными выгодами являются низкая стоимость вырабатываемого

электричества и относительно короткий срок возврата инвестиций. Ветряные установки характеризуются малыми объёмами эмиссий углекислого газа и соединений серы и азота, и они не требуют использования водных ресурсов в процессе генерации. Все перечисленные обстоятельства способствуют поддержанию экологического равновесия планеты; вместе с тем ветровая энергетика не лишена ряда серьёзных ограничений. Выход электрической мощности у ветрогенераторов отличается значительной переменчивостью, что обусловлено непредсказуемостью ветрового ресурса. Для формирования на выходе параметров 220 В, 50 Гц требуется установка инвертора с высокой стоимостью, выполняющего конверсию как переменных, так и неизменных по направлению токов. Ветроэнергетика воздействует на климат в локальном и глобальном масштабе, фиксируются замедление перемещения воздушных масс и перераспределение показателей влажности в зонах её эксплуатации. Кроме того, акустические уровни, создаваемые при функционировании ветрогенераторов, часто воспринимаются людьми как источник дискомфорта.

По состоянию на 2021 год в составе Единой энергетической системы России (ЕЭС России) насчитывается 71 региональная энергосистема; вместе они образуют 7 объединённых энергетических систем, Востока, Сибири, Урала, Средней Волги, Юга, Центра и Северо-Запада. Связь между региональными энергосистемами осуществляется через межсистемные высоковольтные линии электропередачи напряжением 220–500 кВ и выше, что обеспечивает синхронную работу.<sup>64</sup>

В электроэнергетический комплекс ЕЭС России входят 911 электростанций мощностью более 5 МВт каждая. По состоянию на 1 января 2022 года общая установленная мощность электростанций ЕЭС России составляла 246 590,9 МВт.

На российском рынке ветроэнергетики доминируют четыре компании, АО «Новавинд» (ГК «Росатом») – 1 000 МВт, ПАО «Энел Россия» – 361 МВт, Фонд развития ветроэнергетики (совместный фонд АО «РОСНАНО», ПАО «Фортум») – 1 823 МВт и ПАО «Фортум» – 35 МВт.

---

<sup>64</sup> ЕЭС 2022 [Электронный ресурс] // Системный оператор единой энергетической системы: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.so-ups.ru/functioning/ups/ups2022/> (дата обращения: 09.06.2025)

Ранее проведённое исследование участников ветроэнергетического сектора России даёт целостное представление о конфигурации отрасли и о тех субъектах, влияющих на её тенденции. Акционерное общество «НоваВинд», дочернее предприятие государственной корпорации «Росатом», с установленной мощностью в одну тысячу мегаватт, занимает ведущую позицию на российском рынке ветроэнергетики. Под управлением НоваВинд аккумулированы ветроэнергетические активы корпорации, а через компанию осуществляется экспертная работа в перспективных сегментах и на технологических платформах электроэнергетики. В российском секторе ветроэнергетики действуют несколько заметных участников, создающих конкурентную среду. Среди них – Публичное акционерное общество «Энел Россия», чья мощность составляет триста шестьдесят один мегаватт; Фонд развития ветроэнергетики, учреждённый как совместный проект акционерного общества «РОСНАНО» и публичного акционерного общества «Фортум», имеющий максимальную мощность – одну тысячу восемьсот двадцать три мегаватта; и публичное акционерное общество «Фортум» с мощностью тридцать пять мегаватт. Сегодня сектор представляют предприятия с вертикальной интеграцией, совмещающие высокую долю локализации комплектующих с эксплуатацией площадок, инженерными услугами и серийным выпуском аппаратуры; такой комплексный подход повышает самостоятельность в технологической области и создаёт базу для развития машиностроения ветроэнергетики в России. Ориентация сектора на технологическое лидерство и внедрение новых решений проявилась в том, что компания «НоваВинд» внедрила новую конструкцию ветроэнергоустановок с использованием постоянных магнитов, тогда как некоторые российские ветропарки используют редукторные приводы, что подчёркивает направленность отрасли на новаторство.

Характерной особенностью ЕЭС России является соединение с энергосистемами иностранных государств; координационные функции выполняет Системный оператор ЕЭС РФ. В одновременном режиме российская энергосистема взаимодействует с энергосистемами Казахстана, Белоруссии, Балтии, Грузии и Азербайджана. По политическим причинам страны Балтии в феврале 2025 года

вышли из БРЭЛЛ – электрического кольца Белоруссии, России, Эстонии, Латвии и Литвы, предполагающего синхронную работу энергосистем-участниц.

С практической точки зрения энергетическая инфраструктура Калининградской области РФ перешла на режим самостоятельного энергоснабжения. По казахстанской энергосистеме проходят магистральные связи; помимо ЕЭС России, через указанные связи функционируют энергосистемы Центральной Азии – Киргизии и Узбекистана. Линии электропередачи, принадлежащие ЕЭС России, используются для поставок электроэнергии в энергосистему Южной Осетии и в энергосистему Абхазии. Функционирование энергосистемы Китая обеспечивается ЕЭС Востока.

Россия получает явные преимущества от координации деятельности ЕЭС РФ с энергетическими системами соседних государств, синхронизация расписаний электрических нагрузок и резервных мощностей отражает результат согласованных действий. Достигнутая согласованность позволяет осуществлять взаимный обмен электроэнергией между упомянутыми сетями. Интеграция дополнительно укрепляет политическое и экономическое влияние России.

По планам на период 2024–2029 годов суммарная установленная мощность генерирующих объектов в России должна составить 15 734,3 мегаватт. Заявленный объём указан в документе «Схема и программа развития электроэнергетических систем России»<sup>65</sup>, действительном на период 2025–2030 годов и утверждённом Минэнерго РФ. Примерно две трети прироста предполагается обеспечить электростанциями на газовом топливе и станциями, использующими возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Прогноз отражает приоритеты отечественной отрасли – поддерживать преобладающую долю газовой генерации и развивать новые технологические решения. На рисунке 9 показан сценарий развития ВИЭ<sup>66</sup>, из него видно, что ведущую роль занимает ветроэнергетика.

---

<sup>65</sup> 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).

<sup>66</sup> 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).



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

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

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

Действия недружественных стран на фоне санкций послужили стимулом для создания производственных цепочек внутри отраслевого объединения по энергомашиностроению. На текущем этапе проектируются отечественные решения для ветроэнергетики, что позволяет ввести на территории России 3 ГВт ветровых мощностей до 2030 года.

Обновлённая энергетическая концепция России направлена на увеличение доли возобновляемых источников энергии, в том числе ветроэнергетики (ВЭУ); причиной служит приближение исчерпания традиционных энергоносителей, а продолжение эксплуатации традиционных энергоносителей приводит к росту издержек.

### **1.3. Анализ методик мониторинга экономических показателей промышленного предприятия**

В условиях функционирования национальной экономики роль эффективности деятельности отдельного хозяйствующего субъекта выделяется как одна из приоритетных задач, с которыми сталкивается общество сегодня. Рост результативности операций компании ведёт к увеличению рентабельности и укреплению позиций по отношению к соперничающим организациям; такой эффект поддерживает стабильное развитие и ускоряет темпы роста национального хозяйства, даёт фирме шанс длительного удержания на рынке. Поэтому регулярная оценка и постоянный мониторинг показателей результативности производственных организаций промышленного сектора являются обоснованной необходимостью в условиях геополитической неопределённости.

В основу аналитических процедур положена платформа мониторинга в реальном времени, дающая оперативный доступ к достоверным данным о финансовом и экономическом положении субъектов, осуществляющих хозяйственную деятельность.<sup>67</sup> При обнаружении угроз платформа должна позволять немедленное применение комплекса мер, направленных на восстановление финансовой устойчивости.

Комплекс средств наблюдения за хозяйственной активностью и оценки результатов предназначен для предоставления пользователям экономических сведений независимых экспертных заключений о работе предприятия. Функция набора – раннее выявление признаков кризиса с последующим предотвращением, что снижает риски эскалации неблагоприятных ситуаций. Инструментарий помогает корректировать приоритетные показатели операционной работы предприятия и ускорять реагирование при негативных сдвигах в индикаторах результативности.

---

<sup>67</sup> Экономика и анализ деятельности промышленного предприятия: учебное пособие / Н. Е. Калинина, Н. А. Кузнецова, О. С. Норкина [и др.]. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 124 с.

Перечисленным категориям адресатов требуются сведения, получаемые в ходе оценки результативности производственно-хозяйственной деятельности. Внутренними пользователями указанных сведений являются менеджеры холдингов и руководители промышленных комплексов, отвечающие за выработку стратегий, и собственники соответствующих предприятий. Внешний круг адресатов составляют органы исполнительной власти (ФНС, Департаментов промышленности, префектур), консалтинговые и рейтинговые агентства, аудиторские компании и иные заинтересованные организации.

В настоящее время разработано довольно много разных методик исследования и мониторинга экономических показателей деятельности предприятий и организаций (рис.10); они различаются по назначению. Рассмотрим методы исследования, распространённые на промышленных предприятиях.

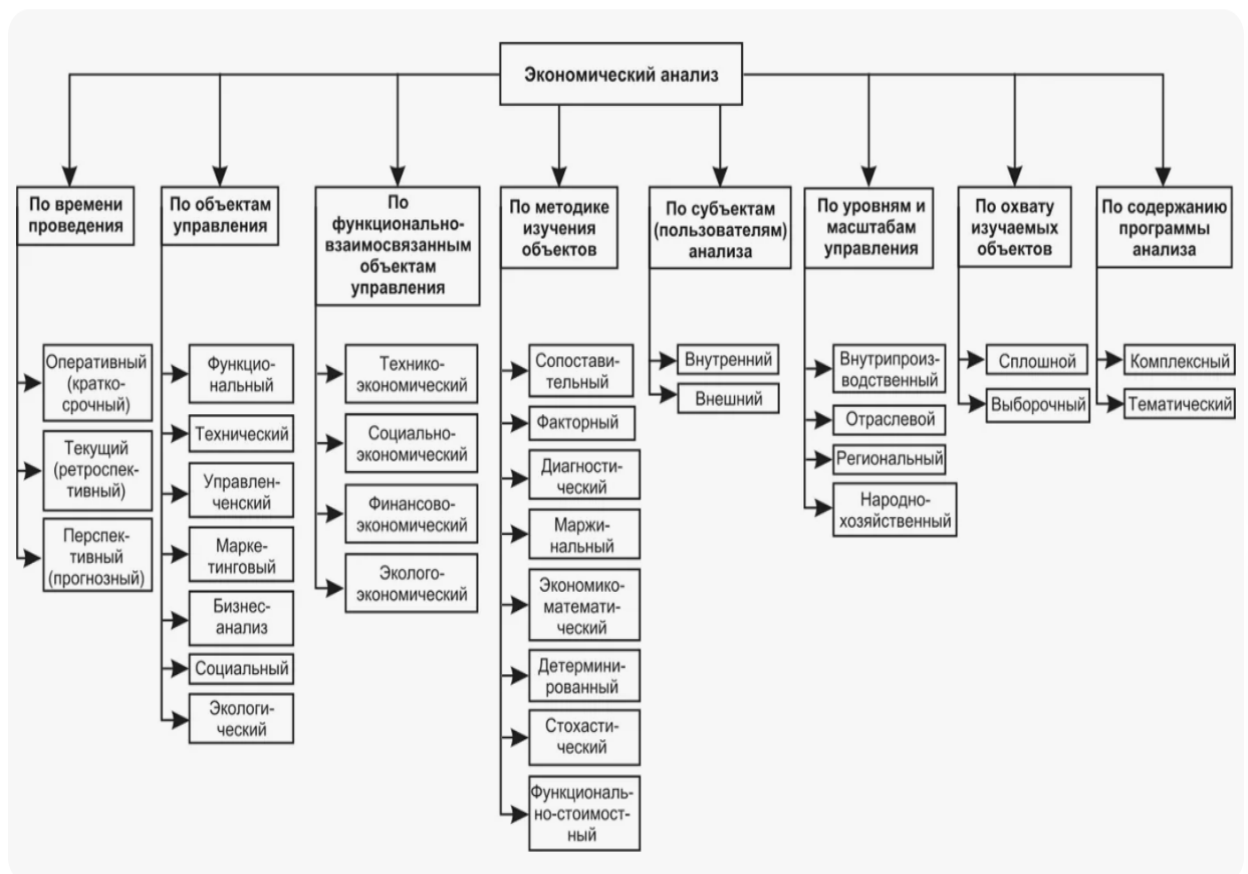


Рисунок 10. Классификация видов экономического анализа.

Источник: Управления хозяйственных субъектов. <https://immunocap.ru/photo/upravleniya-xozyaystvenniyx-subektov/>

Комплексное исследование экономических процессов<sup>68</sup> служит инструментом выработки целостных, систематизированных сведений о производственно-хозяйственной активности. Исследование обеспечивает получение практических сведений о ведении бизнеса и проясняет сущность операций, выполняемых экономическим участником.

При реализации комплексного исследования методическую базу составляют положения, вытекающие из принципов актуальной системной аналитики. Упомянутые руководящие начала получили широкое распространение в сфере экономического анализа<sup>69</sup>.

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).

Таблица 6. Основные требования к экономическому анализу

Рассматривать и изучать каждый отдельно взятый показатель во взаимосвязи и единстве с другими показателями, участвующими в едином процессе.	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

<sup>68</sup> Комплексный экономический анализ: учебное пособие / Л. Н. Бондарева, И. В. Климентьева, М. М. Микушина [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2018. – 152 с.

<sup>69</sup> Шеремет, А. Д. Теория экономического анализа / А. Д. Шеремет. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 365 с.

Согласно методике исследования объектов, комплексно-экономическая оценка реализуется в различных вариантах, маргинальном, экономико-статистическом, диагностическом, факторном, функционально-стоимостном, экономико-математическом, сравнительном и прочих.

Рассмотренные в таблице базовые требования к изучению экономических показателей – необходимость изучать каждый показатель во взаимосвязи и единстве с другими показателями, участвующими в общем процессе, и учитывать изменения показателей во времени – формулируют фундаментальные принципы, которыми должен руководствоваться исследователь при оценке экономической эффективности промышленного предприятия. Изолированное изучение метрики – в частности прибыльности – ограничивает аналитический вывод лишь подтверждением или опровержением соответствия фактического уровня запланированной величине. Только при всестороннем сопоставлении параметра с объёмом продаж, показателями издержек производства, ассортиментной политикой и прочими метриками удаётся выявить совокупность причин, приведших к итоговой величине, и на основе полученных данных подготовить пакет мероприятий для повышения данного показателя. Необходимость учитывать временные тренды показывает, оценка одного показателя в пределах единственного отчётного интервала не даёт оснований для вывода о том, улучшилась ли или ухудшилась результативность деятельности предприятия; сопоставление данных, собранных за ряд последовательных интервалов, позволяет обнаружить тенденции в эффективности, определить источники подобных сдвигов и спланировать соответствующие меры. Указанные подходы напрямую связаны с целями данного исследования, наблюдение за экономическими индикаторами ветряных электростанций предполагает комплексную оценку взаимозависимых показателей и исследование поведения указанных показателей во временном разрезе с учётом сезонных колебаний и климатических особенностей.

В ходе сопоставления отчетные сведения об операционных и финансовых результатах компании соотносятся с годовыми плановыми величинами на

настоящий год; дополнительно принимаются во внимание архивные данные предыдущих лет и показатели деятельности ведущих предприятий.

Задача факторного исследования – выявить совокупность причин, влияющих на рост показателей эффективности, используемых при оценке результатов. Фактически цель – создание стратегии, направленной на увеличение прибыли и сокращение операционных затрат предприятия.

Диагностика (экспресс-диагностика) – метод выявления причин отклонений в нормальном функционировании бизнес-процессов; опирается на типичные индикаторы, характерные для конкретного нарушения. Например, при превышении темпов прироста валовой продукции над темпами прироста товарной продукции такое соотношение служит признаком роста остатков незавершённого производства. Наличие подобного индикатора даёт возможность оперативно установить причину отклонений без прямых измерений и, тем самым, без дополнительных временных и материальных затрат.

Термин «Анализ маржинальности» обозначает методику, применяемую для оценки эффективности и обоснования управленческих решений путём исследования причинно-следственных связей между величиной реализации, себестоимостью продукции и уровнем прибыли; при этом затраты подразделяют на фиксированные и переменные категории. Опираясь на инструменты экономико-математического моделирования, выбирают наиболее рациональную альтернативу при разрешении конкретной экономической задачи. Параллельно обнаруживают потенциальные резервы повышения производственной эффективности, достигаемые посредством максимально возможного вовлечения наличных ресурсов.

Процедуры оценивания вероятностного характера – в частности дисперсионное исследование, корреляционные методы, разложение на компоненты и прочие подходы – используются для обнаружения вероятностных связей между исследуемыми феноменами и операциями повседневной хозяйственной деятельности предприятия.

Функционально-стоимостный метод – инструмент для обнаружения внутренних резервов, направленных на повышение эффективности производства. Подход опирается на детальный разбор функций, возложенных на исследуемый объект, с акцентом на выборе рациональных способов реализации функций на каждом этапе жизненного цикла изделия (научно-исследовательские работы, конструирование, производство, эксплуатация и утилизация). Задача метода – не только выявлять, но и предотвращать появление избыточных расходов за счёт исключения ненужных узлов и деталей, упрощения конструкций, замены материалов и иных мер.

Каждый вариант изучаемых способов, нацеленных на всестороннее изучение экономических вопросов, обладает собственной комбинацией отличительных черт по объёму содержательной части, по порядку организации, по приёмам, используемым в работе, и по целевым ориентирам. К примеру, при использовании многофакторного подхода для расчёта издержек на выработку электроэнергии по источникам различной природы, как правило, учитывают следующие показатели:

Оценка финансовых параметров рассматривает капитальные вложения и эксплуатационные издержки, разделённые на фиксированные и переменные статьи расходов. На объектах ВИЭ-станций переменные статьи расходования практически отсутствуют вследствие использования бесплатных источников энергии; у тепловых электростанций (ТЭС) расходы на топливо достигают 80% и более от совокупных эксплуатационных издержек.<sup>70</sup>

Выведение техники из эксплуатации выделено в качестве самостоятельного оперативного этапа. В отношении генерирующих установок на базе ВИЭ технология выведения техники из эксплуатации отточена, благодаря чему работы могут быть выполнены в сжатые сроки.<sup>71</sup>

---

<sup>70</sup> 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.

<sup>71</sup> Дзедик В., Усачева И., Моткова А. Анализ эффективности применения накопителей энергии в различных типах электроэнергетических систем // Энергетическая политика. [Электронный ресурс]. 03.04.2023. URL: <https://energy-policy.ru/analiz-effektivnosti-primeneniya-nakopitelej-energii-v-razlichnyh-tipah-elektroenergeticheskikh-sistem/energoperehod/2023/04/03/> (дата обращения: 21.12.2025).

КИУМ – индекс, показывающий степень использования установленной мощности. У ТЭС значение индикатора составляет около 80–90%. По сравнению с электростанциями на ВИЭ показатель у ТЭС примерно в четыре раза выше (коэффициент 4). У ветровых и солнечных объектов КИУМ заметно варьируется, география и характеристики природной среды места размещения влияют на показатель.

Расчетный срок эксплуатации. Издержки, возникающие при осуществлении строительных работ и подготовке объекта к началу эксплуатации. Участок размещения и выбор конкретного типа электростанции и др. При разработке национального плана электроснабжения необходимо учитывать индивидуальные характеристики каждого типа электростанции.

Ранее используемые подходы к изучению экономических явлений позволяли прогнозировать и системно оценивать ряд показателей. Сюда входили оценки объёмов ВВП, характеристики выпуска продукции, способы распределения продукции и мониторинг семейных бюджетов. Исследование касалось положения сектора реальной экономики в целом и по ведущим направлениям деятельности, состояние инфляционных процессов, поведение номинальных и реальных обменных курсов валюты страны и тенденции инвестиционной активности на территории государства.

При повышенной неопределённости экономической конъюнктуры, находящейся в стагнации и усугубляемой геополитическими потрясениями, одной совокупности мер явно недостаточно. Требуется комплексная, достоверная и детализированная оценка того, в какой мере и с каким уровнем результативности функционируют используемые монетарные инструменты и сопряжённые механизмы вместе с набором мер прочих элементов государственной экономической политики, оказывая влияние на микроэкономические процессы, протекающие на уровне отдельного промышленного предприятия.

Необходимость модернизации исследовательской платформы возрастает при добавлении в неё комплекса для мониторинга функционирования промышленных организаций. Такой комплекс создаёт оценочную базу и организует канал обмена

данными между производственным звеном экономики и финансовыми институтами; на основе базы принимаются обоснованные управленческие решения и мероприятия, направленные на регулирование деятельности хозяйствующих субъектов с учётом государственной политики в сфере денежно-кредитных отношений и в условиях эволюции экономического курса в широком масштабе.

Наблюдательный комплекс, внедрённый на производственном предприятии, позволяет почти мгновенно выработать самостоятельные выводы о направлениях изменения экономического положения предприятия. Он аккумулирует сведения о конъюнктуре в сегменте реальной экономики и о вариантах её преобразования. Система проводит оперативную оценку финансового состояния организации и главных факторов, влияющих на объём инвестиционной активности с учётом мер по регулированию денежного обращения и кредитования.

На промышленном предприятии действует мониторинг на трёх уровнях<sup>72</sup>. Первый уровень посвящён экономическому блоку, проводятся исследования рыночной конъюнктуры и заполняются анкеты по вопросам финансов и инвестиций. Второй уровень ведёт учёт параметров состояния предприятия, показателей деятельности и маркетинга. Третий уровень относится к подразделениям и предполагает сбор данных о закупках, остатках на складах, производительности и объёме использования ресурсов.

Для всесторонней проверки эффективности требуются четыре подхода к обработке данных, сравнительный, факторный, структурный и трендовый.<sup>73</sup>

Исследование тенденций сопоставляет значения индикаторов, полученные за заданные интервалы времени, и фиксирует направление изменений показателей. Подобный подход позволяет прогнозировать, каким образом показатели будут изменяться в последующие периоды. При оценке эффективности предприятия при помощи данной методики проводят сравнения, реальные итоги отчётного периода

---

<sup>72</sup> Болквдзе, И. Р. Концепция системы мониторинга экономического состояния промышленного предприятия [Электронный ресурс] / И. Р. Болквдзе // Корпоративный менеджмент: [сайт] – Режим доступа: <https://www.cfin.ru/bandurin/article/sbrn05/03.shtml> (дата обращения: 19.06.2025).

<sup>73</sup> Оценка эффективности предприятия: критерии и методики [Электронный ресурс] // Bitcop: [сайт]. – Режим доступа: <https://bitcop.ru/blog/ocenka-jeffektivnosti-predpriyatija-kriterii-i-metodiki> (дата обращения: 25.04.2023).

соотносят с плановыми величинами за тот же интервал, затем реальные итоги сравнивают с данными предшествующего периода, и дополнительно сверяют показатели по разным временным отрезкам.

Исследование тенденций помогает прогнозировать темпы и векторы изменений показателей коммерческой деятельности. Дополнительно на основе собранных данных можно оценить продуктивность отдельных производственных операций.

Метод, опирающийся на изучение структуры, предусматривает сначала получить общее представление о системе, затем разделить её на отдельные части для детального изучения. Каждая часть исследуется самостоятельно; в отношении компании речь идёт о проверке направлений деятельности, приносящих прибыль. Проводится расчёт доходов по видам продукции и по оказываемым услугам, отслеживается изменение активов предприятия. В завершение выполняется обзор способов распределения и распоряжения прибылью организацией.

Приём сопоставления применяется для параллельного изучения различных объектов с целью выявления общих черт и различий между ними. Его используют для оценки показателей, доходности, объёма выручки и размера операционной прибыли.

В упомянутом виде исследования проводится сравнение по крайней мере двух компонентов на основе соответствующих показателей.

Факторный метод – способ выявления связей между переменными на основе значений переменных. Метод опирается на предпосылку, что наблюдаемые показатели объясняются более компактным числом скрытых факторов. При оценке эффективности предприятия учитывают объём выручки фирмы, величину прибыли, степень задействования трудовых ресурсов и использование производственных фондов.

При факторном исследовании все связанные между собой переменные объединяют в один фактор. Один из вариантов содержания функционала модели мониторинга<sup>74</sup> экономических показателей предприятия показан на рис.11.

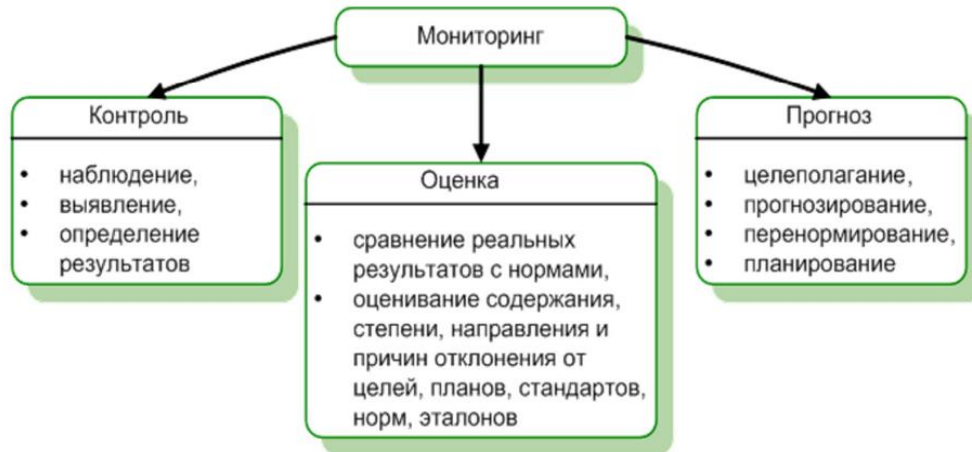


Рисунок 11. Цели и содержание мониторинга

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

Чтобы мониторинговая платформа промышленного объекта функционировала, требуется определить главные параметры программного обеспечения, необходимого для её работы. Схема архитектуры данной платформы мониторинга показана (см. рис.12).

<sup>74</sup> 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.



Рисунок 12. – Принципиальная схема системы мониторинга промышленного предприятия

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

Когда предприятия ведут хозяйственную и производственную деятельность в цифровой среде, возникает необходимость перевести контроль процессов в электронный формат. В ответ создают цифровые модели, содержащие подсистему мониторинга экономических показателей и комплект средств для выработки адаптивных интеллектуальных решений, применяемых в управлении и при моделировании работы предприятия. Параллельно разворачивают отдельный блок на базе интеллектуальной платформы – многофункциональный комплект средств, ориентированный на реинжиниринг.

Программные системы оценки показателей работы предприятия (САЭП) помогают руководителям принимать обоснованные решения на основе обработанных фактических данных.

Программное обеспечение должно содержать необходимые функциональные модули.<sup>75</sup> Набор инструментов для проверки результативности компании должен

<sup>75</sup> 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).

покрывать финансовые, операционные и стратегические направления, прочие области контроля и предполагать применение различных методик и подходов. Организация сбора и обработки сведений должна гарантировать получение сведений из разных источников, в том числе бухгалтерских систем и решений CRM и ERP, и предусматривать этапы подготовки этих сведений для последующей обработки.

Набор функций системы должен создавать дашборды и отчёты с наглядной визуализацией результатов оценки производительности предприятия; необходимо отображать показатели KPI, выявляемые тенденции и сравнительные оценки. Программное обеспечение должно содержать средства прогнозирования будущих показателей предприятия и инструменты для планирования мероприятий по повышению показателей, с акцентом на оптимизацию ресурсов и процессов. Платформа должна предоставлять механизмы поддержки управленческих решений на базе обработки данных о деятельности предприятия; предусмотрены инструменты оценки рисков и выявления возможностей.

В практике цифровой проработки инженерных решений на промышленных площадках, в том числе на предприятиях российской Единой энергетической системы (ЕЭС), широко применяют метод вейвлет-анализа.<sup>76</sup> Под вейвлет-анализом понимают класс линейных преобразований, предназначенных для обработки сигналов и извлечения отображённых ими физических характеристик и параметров, описывающих процессы и свойства естественных сред и исследуемых объектов.<sup>77</sup>

См. табл.7, список отдельных программных продуктов различного профиля в сфере энергетики и варианты, ориентированные исключительно на эксплуатацию ВЭС.

#### Таблица 7. Программные продукты для энергетической отрасли

---

<sup>76</sup> 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.

<sup>77</sup> Болдырев, С. В. Использование вейвлет-преобразования в системах обработки и анализа сигналов / С. В. Болдырев // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 7. – С. 93–94.

Программный продукт	Функционал	Назначение
Программное обеспечение для ветроэлектростанций		
Siterra	В программах ветроэнергетики множество сторон, совместно работающих для развертывания ветроэнергетической инфраструктуры. Большой объем документации, ведение арендных операций, отслеживание активов и контроль гарантий – примеры элементов, помогающие надлежащему исполнению программы и её сопровождению.	Управление программой использования энергии ветра
Vestas PowerPlus; General Electric; Siemens Gamesa;	GE сообщает, что модель Haliade-X, самая крупная в парке компании, имеет отношение фактической выработки к теоретическому максимуму на уровне 60%–64%. Vestas, со своей стороны, указывает на показатель свыше 60% и подчёркивает, что итоговый результат зависит от условий эксплуатации. На глобальном уровне суммарная установленная мощность ветряных установок с турбинами Siemens Gamesa превышает 132 ГВт; эквивалент выработки 132 АЭС.	Производство ветротурбин для суши и моря
Комплекс от NovaWind (дивизион Росатома)	Проект является наглядным примером успешной практики импортозамещения, в нём реализован контроллер отечественной разработки, работающий автономно в полностью автоматизированном режиме.	Программный комплекс для контроля за станциями ветрогенерации.
GH Bladed	Приложение главным образом эксплуатируют компании-изготовители турбин, использующие ветровую энергию, и специалисты, оказывающие консультации. GH Bladed признан отраслевым эталоном и выступает ориентиром для изготовителей турбин ветроэнергетики и производителей комплектующих во всех регионах планеты.	Конструкция ветряной турбины. GH Bladed был одобрен Germanischer Lloyd для расчета нагрузок ветряных турбин при проектировании и сертификации
Windographer; WindRose	Программное обеспечение для обработки сведений о ветре помогает пользователю исправлять ошибки в наборах замеров ветра и проводить специализированную статистическую обработку.	Анализ данных о мощности ветра
WAsP	ПО служит для оценки параметров, характеризующих ветровые условия в тех районах, где недоступны эмпирические замеры. Программа WAsP была создана Национальной лабораторией Рисо (Дания). В расчётах WAsP применяется теория безвихревых потоков, что позволяет прогнозировать распределение ветра по рельефу на конкретном участке.	Моделирование ветрового потока
WindSim	По сравнению с WAsP, WindSim решает сходные задачи через CFD-моделирование вместо традиционных подходов, что нередко даёт лучшие расчетные результаты.	Моделирование ветрового потока
OpenWind; WindPRO; WindFarmer; WindFarm	Программные решения моделируют работу проектируемых или действующих ветроэнергетических установок; цель программного обеспечения – оценка объёма генерируемой электроэнергии. Оператор вводит сведения о поле ветра, высотных характеристиках и параметрах поверхности, задаёт технические параметры турбин, подключает картографические слои базового уровня и обозначает территории либо элементы с природоохранными ограничениями. С учётом введённых данных создаётся проект ветропарка, спроектированный для получения максимального энергетического выхода с учётом ограничений и	Моделирование ветряных электростанций

	технологических сложностей строительного процесса.	
WP	Для действующих ветряных электростанций разработано несколько программных систем; они составляют краткосрочные и среднесрочные прогнозы выработки электроэнергии (для отдельных электростанций или целых регионов) на основе имеющихся данных численного прогнозирования погоды. В качестве примеров моделей используются 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 обеспечивает сбор данных и управление исполнительными механизмами (диспетчеризацию), обработку и отображение (визуализацию), архивирование и передачу сведений об объекте мониторинга и управлении в реальном времени.	Программное обеспечение для прогнозирования работы электростанций.
SDM; Управление электростанцией; Global-Energy	Ряд решений предоставляет возможность создавать разные конфигурации сети и задавать входные параметры, выбирать варианты проведения оптимизации; реализованы функции оптимизации положения источников энергии (актуально при планировании новых сетей и освоении новых территорий), оптимизации положения и ёмкости накопительных батарей (актуально при планировании новых сетей и при улучшении существующих сетей), просмотр и сравнение результатов работы выбранного алгоритма с целью отбора наилучшего результата.	Программа оптимизации конфигурации электросети с целью снижения потерь
1С:ERP Энергетика 2	1С:ERP Энергетика 2 – ERP-продукт, создан для повышения производительности и автоматизации управленческих процессов на предприятиях энергетического сектора. Набор функций обеспечивает учет нормативов выдачи электроэнергии; планирование мероприятий по энергосбережению; мониторинг использования ресурсов; в том числе комплексное сопровождение финансовых и бюджетных операций, кадровых вопросов, закупочной деятельности и техобслуживания оборудования.	
EMAS.ТЭП	Решение, созданное АО "НБИ", вычисляет реальные эксплуатационные нагрузки и задаёт режимные параметры работы техоборудования; параллельно обеспечивает автоматизированное составление внутренней отчётной документации производственного подразделения генерирующих предприятий. Программный комплекс содержит модуль построения мнемосхем, предназначенный для наглядного выявления узких мест в процессах выработки тепла и электроэнергии.	Модуль расчета технико-экономических показателей ТЭЦ, (ТЭП) ТЭС
IndorPower	Геопространственная платформа электроэнергетических систем предназначена для оперативного учёта технических и эксплуатационных данных по электрическим сетям классов напряжения от 1150 кВ до 0,4 кВ.	Объединяет технические и эксплуатационные данные по электрическим сетям.

База аварийности в электроэнергетике	Система формирует документы по установлению причин аварий и повреждений объектов электрических сетей напряжением 0,4-35 кВ; в случае надобности в сами документы вносятся коррективы, после чего материалы передаются в АО «СО ЕЭС». Модуль управления обеспечивает отбор указанных документов и выполнение поиска с учётом контекста, что повышает оперативность и качество управления данными. Одно из направлений работы – подготовка аналитических сводок и оформление отчётных материалов в установленной форме.	Решение позволяет оформлять, сохранять и передавать в единую базу данных Системы акты расследования причин аварий в электроэнергетике.
1С: АРМ ОРЭМ и РРЭ	Программный продукт создан АО «Атомэнергосбыт» (входит в АО «НоваВинд» – ветроэнергетический дивизион Росатома). Программное обеспечение предназначено для автоматизации взаиморасчетов за электрическую энергию и мощность на оптовых и розничных рынках и обслуживает как отраслевых участников, так и внешних контрагентов.	Программа клиентского обслуживания потребителей электроэнергии.

Источник: составлено автором

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

Сопоставление моделей показало, для получения экономических индикаторов целесообразно применять преднастроенные цифровые платформы, рассчитанные на обработку больших массивов данных. В практических рекомендациях автор предлагает интегрировать Vestas PowerPlus либо Siemens

Gamesa EM в качестве средств для всесторонней оценки и повышения эффективности эксплуатации ветроэлектростанций. Дополнительно выполнен обзор зарубежных подходов к измерению эффективности функционирования ветроэлектростанций и перечня показателей, использованных в указанных исследованиях (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 <sub>2</sub>	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

Сравнение выявило различия методологических ориентиров между регионами. Россия делает упор на вычисление КИУМ; отдельно вычисляют период возврата инвестиций. Международная практика, помимо экономических показателей, традиционно предусматривает оценку воздействия на окружающую среду и изучение надёжности энергетических систем. В странах ЕС показатель LCOE подвергают корректировке с учётом расходов, связанных с эмиссией CO<sub>2</sub>. Для США характерен учёт в LCOE дополнительных сумм, направленных на компенсацию расходов при подключении ВИЭ к сетевой инфраструктуре. На международной арене больше внимания уделяют экологическим последствиям и надёжности энергетических систем.

Автор предлагает внедрить в практику российских показателей методику расчёта LCOE с учётом CO<sub>2</sub> и провести оценку экологической стабильности, что будет соответствовать «зеленой повестке» по сохранению климата на планете.

В главе 2 описаны программные средства мониторинга показателей экономической эффективности эксплуатации ветроэлектростанций.

По результатам оценки стоит подчеркнуть, универсального подхода к измерению результативности деятельности предприятия не существует – такую проблему нельзя свести к одному программному инструменту. На практике используют разные наборы индикаторов; они настраиваются с учётом актуальных оперативных приоритетов компании.

Завершая рассмотрение систем мониторинга экономических показателей промышленного предприятия, приведённых в данном разделе, можно выделить ряд моментов, критично влияющих на достижение целей диссертационного исследования. Обзор литературы показал, что нынешняя экономическая наука располагает широким набором методологических подходов и аналитических инструментов для оценки результативности деятельности предприятий – среди них трендовый, структурный, сравнительный и факторный методы; каждый подход обладает собственными преимуществами и ограничениями. Для того чтобы мониторинговая система функционировала надлежащим образом, требуется, чтобы программные средства соответствовали набору критериев. В перечень требований входят, обеспечение применения различных подходов к оценке; наличие механизмов сбора и последующей обработки данных из множества источников; возможность вывода результатов в визуальной форме через отчёты и интерактивные панели; предоставление инструментов для построения прогнозов и составления планов; кроме того – поддержка при реализации решений органов управления. Исследование цифровых платформ для энергосектора показало наличие хорошо развитого набора инструментов; одновременно выяснилось, что указанные решения нуждаются в целевой доработке для задач учёта экономических параметров ветроэнергетических комплексов с учётом климатических особенностей и сезонных вариаций интенсивности ветра.

## Выводы по главе 1

На историческом отрезке люди неоднократно меняли виды топлива; в настоящий момент происходит переход к четвертому витку энергетики. Изначально использовались дрова, позже доминировал уголь, а с техническим прогрессом распространилось жидкое топливо – нефть. Текущий этап смены энергетической парадигмы вызван осознанием вреда для климата от сжигания ископаемого топлива, ограниченностью и высокой стоимостью ископаемых запасов и развитием технологий выработки электроэнергии из возобновляемых источников. Среди перспективных ВИЭ традиционно выделяют солнечную, ветровую и гидроэнергетику.

Ветровые ресурсы являются большим резервом для генерации электроэнергии на международном уровне и в пределах России. По прогнозам, в связи с глобальными климатическими мероприятиями по развитию зелёной энергетики планируется ввод мощностей ВИЭ объёмом 15 ГВт до 2035 года. Указанная ситуация подчёркивает необходимость повышения эффективности преобразования ветровой энергии в электричество, снижения удельных затрат на единицу выработки и гарантии стабильной подачи мощности от ветроустановок. Для реализации указанных задач требуется постоянный мониторинг физических характеристик ветрового режима и ведущих показателей работы электростанций в качестве масштабных промышленных объектов.

Показатель, отражающий продуктивность и рациональность использования ресурсов, занимает одно из центральных мест в системе рыночных отношений. Сопоставление зарубежных и российских экономических публикаций показало, что термины «экономическая эффективность», «эффект» и «результативность» взаимно связаны и дополняют друг друга.

Определение понятия «экономическая эффективность» представляет меру результативности экономической деятельности организации, расчёт основан на сравнении достигнутых итогов и ресурсов, затраченных на получение результатов. Показатель имеет сложную структуру и содержит набор индикаторов

эффективности, создаваемых с учётом текущих приоритетов и задач компании. Понятие связано с терминами «экономическая эффективность», «эффект» и «результативность», являясь показателем изменчивого характера, подлежащим выражению в абсолютных величинах.

Глобальное состояние электроэнергетики испытывает влияние ускоренного перехода в конечном потреблении энергоресурсов, направленного на реализацию задач «зеленой повестки», на фоне дефицита ископаемых ресурсов и высокой стоимости электроэнергии в разных странах. Появилась глобальная тенденция перехода к генерации на ВИЭ-источниках; преимущество принадлежит ветровой энергии.

Пятьдесят четыре государства задействовали ветроэнергетику в роли источника электроэнергии для бытовых потребителей и промышленных предприятий. Объёмы выработки электричества увеличились в большинстве регионов планеты, за исключением Европы и Северной Америки. В сложившейся ситуации повышение энергоэффективности становится приоритетной задачей, требующей скорого решения и напрямую затрагивающей интересы развивающихся стран.

Низкая себестоимость произведённой электроэнергии, высокая скорость возврата инвестиций и сниженный климатический риск служат основанием для масштабного внедрения ветровых технологий в энергетическую систему России. Сценарные расчёты сектора электроэнергетики, отражающие позицию РФ в интервале до 2050 года, фиксируют долгосрочную тенденцию к увеличению доли ветровой генерации. Исследования, выполненные в России, выявили коррелированную зависимость, размещать вновь создаваемые объекты целесообразно на участках, где среднегодовая скорость ветра достигает не менее 8 м/с, при проектной мощности отдельных ветроустановок от 1000 кВт.

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

Тренд развития производства энергии на ВИЭ-источниках предполагает создание и внедрение модели регулярного мониторинга набора показателей работы, организацию комплекса контрольных мер и при возникновении потребности оперативное принятие управленческих решений.

На промышленных объектах, включая предприятия Единой энергетической системы (ЕЭС), одним из часто используемых подходов цифрового проектирования является вейвлет анализ – специализированный вид линейного преобразования, предназначенный для обработки сигналов и данных, отражающих ход процессов и физические характеристики объектов. В отечественной промышленности получили широкое распространение цифровые двойники; будучи элементами умной энергетической системы, они позволяют воспроизвести сценарий аварии и принять превентивные меры для её недопущения. Тенденция развития указывает на ускорение внедрения цифрового моделирования в промышленный сектор и на постоянное улучшение типовых цифровых решений. При моделировании экономических процессов формируемый объект рассматривают во взаимосвязи с внешними и внутренними факторами, что закладывает основу для адекватного воспроизведения динамики.

В секторе энергетики приоритет – повышение экономической результативности и регулярный контроль совокупности финансово-экономических индикаторов хозяйственной деятельности; необходимость внедрения информационных продуктов с высоким уровнем автоматизации очевидна. Надёжность работы мониторингового комплекса на промышленном объекте зависит от подбора сбалансированного перечня метрик и от чёткого описания ожиданий в части структурного устройства сопутствующих программных модулей.

С высокой степенью достоверности констатируется, что функционирование планетарной энергетической отрасли к 2030-му году и в последующие периоды будет в большей степени зависеть от геополитических факторов. Геополитические условия зададут рамки для экспорта технологических решений, введения ограничительных мер в торговых операциях и выработки согласованных подходов

к нормативному регулированию внешнеэкономических связей и устранению барьеров в торговой сфере.

Представленное в настоящей главе исследование теоретических основ экономической эффективности деятельности промышленного предприятия позволяет выработать целостное представление о методологических предпосылках, лежащих в основе дальнейшего исследования. Детальное изучение сущности понятия «экономическая эффективность» показало многогранность названной категории, объединяющей различные стороны результативности хозяйственной деятельности и находящейся в плотной взаимосвязи с понятиями «эффект» и «результативность». Комплексная оценка состояния ветроэнергетики на глобальном уровне и внутри России показала наличие долгосрочной тенденции, растёт использование возобновимых энергоресурсов в ходе перехода на четвёртый этап энергетической трансформации. Исследователи сосредоточили внимание на уникальных чертах национальной системы энергоснабжения и на возможностях расширения ветроэнергетики на территории России. Изучение используемых подходов к контролю за финансово-экономическими параметрами производственного объекта выявило широкий набор инструментов, требующих адаптации под специфику ветроэнергетики. Полученные данные служат необходимым теоретическим фундаментом для проектирования цифровой платформы мониторинга и оценки хозяйственных индикаторов работы ветроэлектростанций; созданию этой платформы посвящены следующие главы диссертации.

Сравнение жизненных циклов объектов выработки энергии из возобновляемых и невозобновляемых источников приведено в приложении 1.

## **Глава 2. Принципы оптимизации работы ветроэнергетических систем и разработка системы мониторинга экономических показателей**

### **2.1. Основные показатели эффективности работы ВЭС**

Наличие развитой энергетической системы – основа функционирования национальной экономики, при её отсутствии простаивают промышленные предприятия, городская инфраструктура и механизмы технического прогресса, от которых зависят государственные перспективы. После революции 1917 года в качестве первоочередной меры для советской России был объявлен План всеобщей электрификации страны – ГОЭЛРО (Государственная комиссия по электрификации России). Реализация ГОЭЛРО (Государственная комиссия по электрификации России) обеспечила электроснабжение территории страны, суммарная выработка за 10 расчетных лет Плана оказалась почти вдвое выше плановых показателей. Советская Россия, приступив к индустриализации, одновременно занималась восстановлением экономики, разрушенной в период Гражданской войны.

Широкие ресурсы в сфере топлива и энергии, которыми располагает Россия, дают ей возможность сохранять международное лидерство по объёмам добычи и по выпуску энергоносителей. Полное самодостаточное обеспечение энергоресурсами характерно для Российской Федерации; она выступает в роли крупного международного экспортёра топлива и энергии. Складывающаяся структура потребления энергоресурсов обеспечивает стабильно высокий спрос в промышленности и для нужд населения<sup>78</sup> (рис.13), что коррелирует с прогнозом роста ВВП страны (рис.14) и предъявляет дополнительные требования к развитию Единой энергетической системы (ЕЭС) России.

---

<sup>78</sup> Киндратышин, Р. Энергетическая система России: прогноз на 2023-2028 годы [Электронный ресурс] / Р. Киндратышин // Сопому: [сайт]. – Режим доступа: <https://conomy.ru/analysis/articles/1020> (дата обращения 17.06.2025)

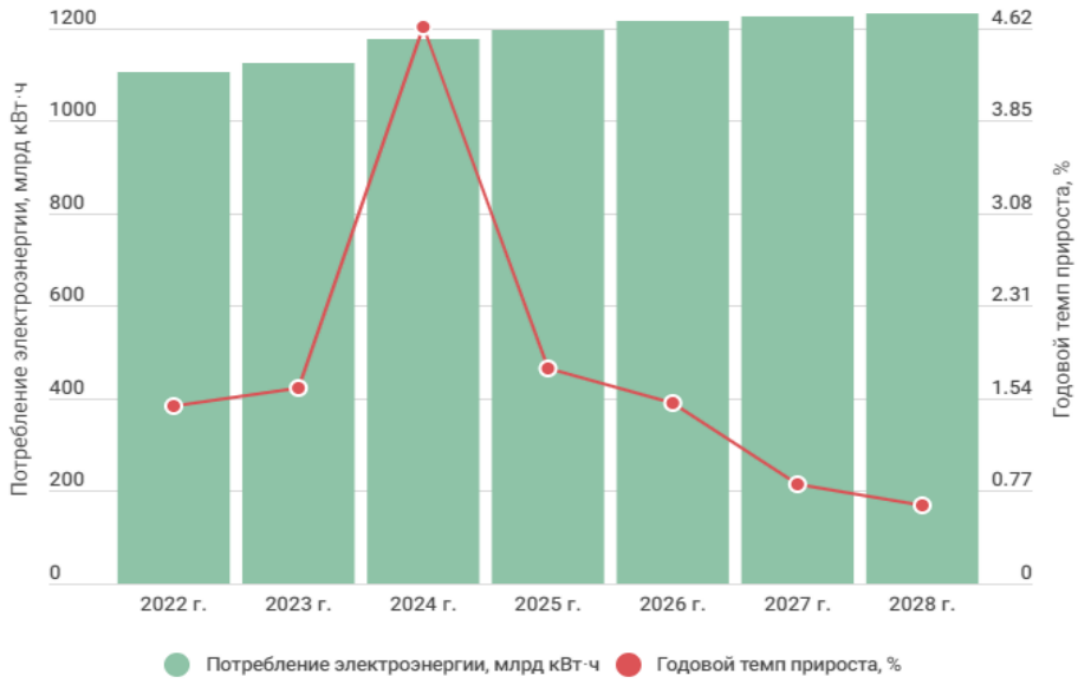


Рисунок 13. Прогноз динамики потребления электроэнергии по ЕЭС России на 2023-2028 гг

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

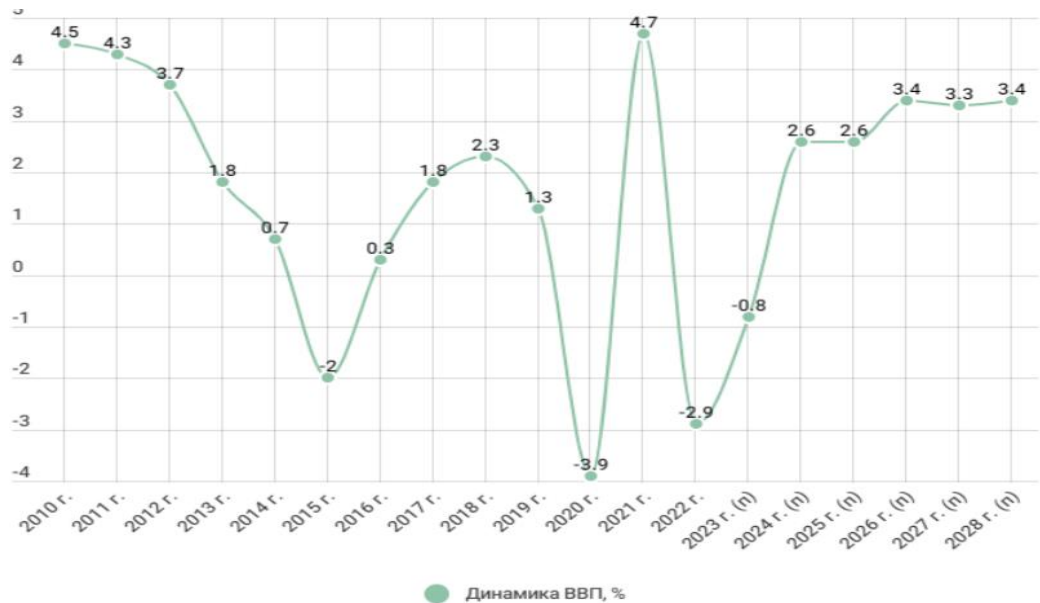


Рисунок 14. Прогноз динамики ВВП согласно социально-экономическому развитию РФ на 2010-2028 гг

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

Иллюстрации 13, 14 наглядно показывают, что объём энергетического спроса сильно коррелирует с общим макроэкономическим фоном, темпами производства и изменениями ВВП. На кривых отчётливо видно влияние геополитических потрясений, в течение 2022 года зафиксировано резкое сокращение энергетического спроса вследствие вооружённого конфликта, затронувшего территории России и Украины.

Приоритетным направлением стратегии для ЕЭС РФ на настоящий момент является внедрение новых технологических и организационных решений в области производства и распределения топлива и энергии, создающее предпосылки для её долговременной стабильности; помимо прочего требуется повысить рентабельность и сократить затраты при выработке энергии; необходимо обеспечить снижение энергоёмкости<sup>79</sup> ВВП на 40% и более<sup>80</sup>. В числе приоритетов реализации энергетической стратегии России – системная переориентация на возобновляемые источники энергии, масштабное внедрение цифровых решений в процессы выработки и распределения электроэнергии, и крупные финансовые вливания со стороны государства и ведущих промышленных групп в отрасль. На уровне кабинета министров ведутся обсуждения механизмов урегулирования корпоративных взаимоотношений с зарубежными держателями акций холдинга «Россети», что создаёт дополнительные каналы для привлечения иностранного капитала. Комплекс мер нацелен на создание стабильной инвестиционной среды при сохранении интересов национальной энергетической инфраструктуры.

Высокий спрос на электроэнергию возник вследствие технологического прогресса; сегодня спрос фактически не знает границ. На фоне прогнозируемого глобального дефицита ископаемых энергоносителей, усиления инициатив в сфере «зеленого» климата, подготовки масштабного энергетического перехода четвертого этапа и стремления к технологической самостоятельности повышение

---

<sup>79</sup> Цыбаков, В. А. Экономический рост как важнейший фактор снижения энергоёмкости валового регионального продукта / В. А. Цыбаков // Экономика региона. – 2020. – Т. 16, № 3. – С. 739–753.

<sup>80</sup> Об утверждении Энергетической стратегии 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_354840/) (дата обращения: 08.06.2025)

энергоэффективности приобрело статус одной из первоочередных задач для стран с развивающейся экономикой.

На внутреннем рынке электроэнергии (В России) внедрение ВИЭ в настоящий период связано с высокими удельными капитальными затратами и повышенной стоимостью электроэнергии; риск роста цен в пределах 3–4%. За рубежом экспертные оценки эффективности и стремительный рост сопутствующих проектов создают основания для поэтапного освоения и промышленного внедрения новых инженерных решений для выработки энергии.

На территории РФ широкое внедрение технологий энергосбережения приведёт к заметной экономии ресурсов; высвобождаемые средства можно переориентировать на поддержку иных секторов. Сектор альтернативных источников энергии готов к активному росту; помимо экологических выгод, он даёт экономические преимущества по сравнению с прочими методами выработки энергии и имеет сравнительно низкие затраты.

Иллюстрация, обозначенная рис. 15, показывает изменение объёма потребления электрической энергии по категориям источников в РФ. Из графика видно, что в ряду возобновляемых генераторов доминируют ветровая и солнечная выработка энергии.

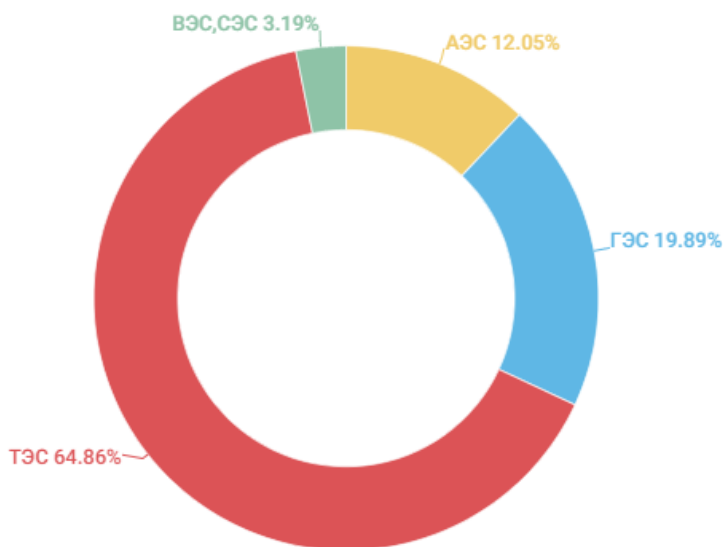


Рисунок 15. Структура установленной мощности ЕЭС по видам энергии на конец 2028 г.

Источник: Киндратышин Р. Энергетическая система России: прогноз на 2023-2028 годы.

<https://conomy.ru/analysis/articles/1020>

На данном этапе в экономическом пространстве России ветроэнергетика не рассматривается как приоритетная замена традиционной энергетики; она служит вспомогательным решением, используемым наряду с традиционными способами выработки электрической энергии<sup>81</sup>. Прогнозные расчёты структуры установленной мощности ЕЭС России на 2028 год показывают рост доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ), преимущественно ветровой и солнечной составляющих – с 1,78% до 3,19%, при одновременном сокращении доли ТЭС с 66,05% до 64,86%.

Автор поставил задачу выбрать наилучший набор критериев для измерения экономической отдачи ВЭС и сопоставил методы, применяемые в РФ, ЕС и США. Различия подходов систематизированы и приведены в табл.10. В российских расчётах делают упор на КИУМ и период окупаемости инвестиций, тогда как за рубежом дополнительно учитывают экологические последствия и показатели стабильности. В Евросоюзе при расчёте LCOE учитывают стоимость выбросов CO<sub>2</sub>, а в США в LCOE отражают расходы на интеграцию ВИЭ в энергосистему.

Общей чертой международных подходов является изучение влияния на окружающую среду и оценка стабильности систем.

Таблица 10. Методики расчета зарубежных и отечественных показателей экономической эффективности работы ВЭС

Методика	Россия	ЕС	США
КИУМ	Основной КРІ	Не используется	Не используется
LCOE	Редко применяется	Включает стоимость CO <sub>2</sub>	Учитывает интеграцию в сеть
Срок	Обязательный	Второстепенный	Интегрирован в LCOE

<sup>81</sup> Мокшин М. Ю., Путилов А. В., Римская О. Н. Рынок ветроэнергетики в России и за рубежом: проблемы и перспективы развития. — Стратегические решения и риск-менеджмент, 2024, т. 15, № 4, с. 338–347.

Окупаемости	Расчёт	показатель	
Устойчивость	Не входит	ESG и экологические эффекты	Grid reliability и интеграция

Источник: составлено автором

Параметр, задающий энергоёмкость воздушного потока, – показатель скорости движения воздуха. На территории России создан ветровой кадастр – систематизированный свод сведений о ветровых условиях конкретной местности, собираемый периодически либо в ходе длительных наблюдений, что даёт возможность количественно оценивать силу ветра и рассчитывать ожидаемую выработку мощности ветроэнергетическими установками.<sup>82</sup> В соответствии с ГОСТ Р 51237–98 технические средства ветроэнергетики подразделяются на четыре класса по мощности – от 5 кВт до более 1000 кВт.

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

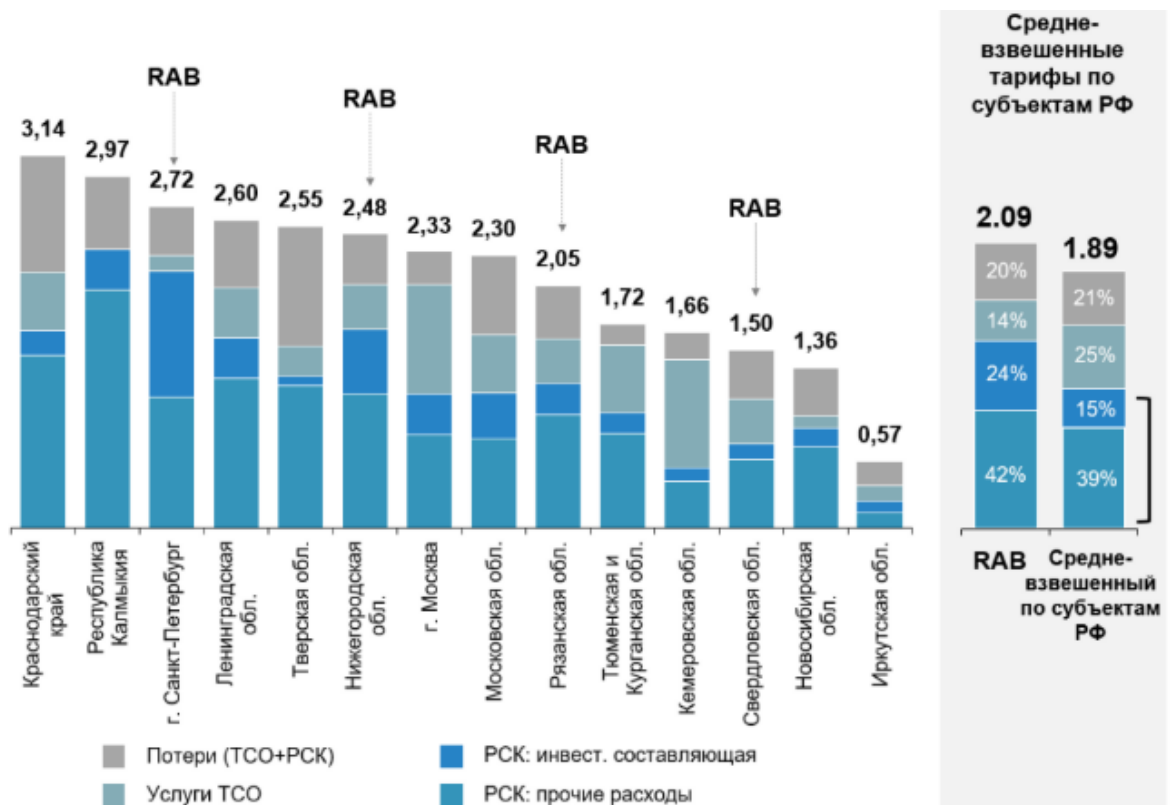
Цена единицы энергоресурса (1 кВт·ч) считается главным структурным ориентиром; параллельно проводят анализ годовых расходов, выраженных на 1 кВт мощности, установленной на объекте, а полученные величины применяют для оценки рентабельности ВИЭ – в том числе ветроэлектростанций – в практике России. За последние годы производство электрической энергии на основе ВИЭ получило повсеместное распространение на глобальном уровне, упомянутый сегмент рассматривают не только как один из самых стремительно развивающихся

<sup>82</sup> ГОСТ Р 51237–98 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. – М.: Госстандарт России, 1998. – 11 с.

с коротким сроком окупаемости, но и как центральный элемент национальных энергетических систем.

Доступные источники указывают, что в России установлен уровень вознаграждения за электроэнергию, генерируемую ВЭС, на отметке 3,5 Р/кВт·ч. Операторы ВЭС могут закреплять указанную ставку на период 15 лет<sup>83</sup>, причём это служит инструментом при формировании долгосрочных инвестиционных сценариев и при расчёте горизонтов возврата вложенных средств. В структуре тарифа выделяются отдельные составляющие, на производство (мощности) приходится до 40%; на передачу (или при применении агрегированного тарифа) – до 55%; торговая наценка поставщика, исполняющего функции гаранта, составляет 4,9%; платежи, направляемые на инфраструктуру, – 0,1%.

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



<sup>83</sup> Энергия ветра: дешевле ли она в сравнении с традиционными киловаттами? // Рамблер/Финансы (материал РИА «ФедералПресс»). [Электронный ресурс]. 23.03.2023. URL: <https://finance.rambler.ru/economics/50434678-energiya-vestra-deshevle-li-ona-v-sravnenii-s-traditsionnymi-kilovattami/> (дата обращения: 21.12.2025)

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

Источник: Российская электроэнергетика: 20 лет реформ. Аналитический отчет.  
Аналитический центр ТЭК

Регулируемые цены на электроэнергию устанавливают уполномоченные органы исполнительной власти субъектов федерации, опираясь на документы верхнего уровня. Законодательные документы, регламентирующие тарифы на передачу электрической энергии, следующие:

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 использованием метода доходности инвестированного капитала на 2025 – 2029 годы».

Предложение ПАО «Россети» о размере тарифов на услуги по передаче электрической энергии по ЕНЭС и о долгосрочных параметрах 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 установило, что государственная программа «Развитие энергетики» должна соответствовать положениям Постановления Правительства Российской Федерации от 26 мая 2021 г. № 786 «О системе управления государственными программами Российской Федерации» и иным нормативным актам.

В масштабах РФ зафиксированы разные тарифы на электричество, цены различаются по статусу потребителя – частные лица или организации – и по территориальной зоне, тарифной модели и категории цен (регулируемые и нерегулируемые); указанные факторы приводят к сложной многовариантной схеме поставки энергоносителя. Мосэнергосбыт предлагает клиентам возможность покупки «зеленой энергии», оплата превышает тарифы на традиционный ресурс,

происхождение электроэнергии документально подтверждается выдачей электронного сертификата потребителю. Инициатива призвана побудить граждан выработать осознанное и ответственное отношение к мерам по сохранению климатической среды планеты.

Московский Департамент экономической политики и развития утвердил размеры платы за электрическую энергию для физических лиц в 2025 году; конкретные размеры приведены ниже.<sup>84</sup>

Жителям домов, расположенных в границах города и оборудованных газовыми плитами, и потребителям, приравненным к населению, установлены тарифы, одноставочный тариф – с 1 января – 6,99 рубля/кВт\*час, с 1 июля – 7,87 рубля/кВт\*час. Одноставочный тариф с разделением по двум зонам суток, дневная зона – с 1 января – 8,47 рубля/кВт\*час, с 1 июля – 9,45 рубля/кВт\*час; ночная зона – с 1 января – 3,43 рубля/кВт\*час, с 1 июля – 4,08 рубля/кВт\*час. Одноставочный тариф с разделением по трём зонам суток, пиковая зона – с 1 января – 10,16 рубля/кВт\*час, с 1 июля – 11,24 рубля/кВт\*час; полупиковая зона – с 1 января – 6,99 рубля/кВт\*час, с 1 июля – 7,87 рубля/кВт\*час; ночная зона – с 1 января – 3,43 рубля/кВт\*час, с 1 июля – 4,08 рубля/кВт\*час.

В соответствии с положениями о функционировании розничных рынков электрической энергии, утвержденными Постановлением Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 (далее – Правила), электрическая энергия (мощность) продается юридическим лицам по нерегулируемым ценам при заключении договора купли-продажи, за исключением продажи электрической энергии (мощности) населению и приравненным к нему категориям потребителей. Выбор либо 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.

---

<sup>84</sup> 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)

С 2008 года в России действует схема тарифообразования, получившая наименование «котловой принцип», по которой для потребителей, размещённых на территории одного субъекта Российской Федерации и объединённых в одну группу, установлено единообразие платы за услуги по передаче электрической энергии. По состоянию на 2022 год одноставочный котловой тариф на услуги по передаче электрической энергии на территории Российской Федерации составил 1,89 руб./кВт\*ч; 54% указанной суммы приходится на оплату услуг крупнейших (котлодержателей) ТСО и ЕНЭС, а 25% – на оплату услуг прочих ТСО<sup>85</sup>.

В Иркутской области зафиксированы самые низкие тарифы на электрическую энергию среди рассмотренных субъектов. В городе Иркутск установлена ставка 1,58 рубля за киловатт-час; для сельских территорий – 1,106 рубля. Низкие расценки связаны с наличием в регионе каскада гидроэлектростанций, вырабатывающих энергию с низкой себестоимостью<sup>86</sup>. В Чукотском автономном округе РФ зафиксированы наивысшие тарифы на электропотребление. По всем населённым пунктам данного округа тариф равен 11,08 рублей за 1 кВт\*ч. Повышенные тарифы зафиксированы в Магаданской области, Камчатском крае, Республике Саха и Сахалинской области. Отдельный статус указанных субъектов по отношению к единой энергетической системе в сочетании с практически отсутствующей газификацией объясняет повышенные тарифы.

Приведённые в тексте сведения о структуре тарифа на электрическую энергию и его региональной дифференциации позволяют понять экономический контекст, в котором функционируют ветроэлектростанции; финансовый результат ветроэлектростанций находится под влиянием упомянутого контекста. Структурно стоимость единицы электроэнергии складывается из нескольких компонентов, стоимости производства электроэнергии и мощности, составляющей до сорока процентов тарифа, стоимости передачи электроэнергии и мощности или так

---

<sup>85</sup> Российская электроэнергетика: 20 лет реформ: аналитический отчет. [Электронный ресурс] // Аналитический центр ТЭК: [сайт]. – Режим доступа: [https://actek.group/russian\\_electric\\_power\\_industry/](https://actek.group/russian_electric_power_industry/) (дата обращения: 14.06.2025).

<sup>86</sup> 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)

называемого котлового тарифа, достигающего пятидесяти пяти процентов, сбытовой надбавки гарантирующего поставщика в размере четырёх целых девяти десятых процента и инфраструктурных платежей в размере ноля целой одной десятой процента. Начиная с две тысячи восьмого года действие котловой принцип тарифообразования направлено на то, чтобы в пределах соответствующего субъекта Российской Федерации потребители из одной группы получали одинаковые тарифы. Межрегиональная тарифная неоднородность остаётся высокой, в Чукотском автономном округе тариф составляет одиннадцать целых восемь сотых рубля за киловатт-час, тогда как в Иркутской области он равен один рубль пятьдесят восемь копеек – причина в наличии в регионе каскада гидроэлектростанций; работа каскада приводит к относительно низкой цене электроэнергии. Объём доходов, поступающих на баланс генератора, питаемого ветровой энергией, в большой степени зависит от локальных особенностей. При оценке рентабельности проектов ветроэнергетики нужно принимать во внимание региональные условия по всей территории Российской Федерации.

Раздел содержит разбор индикаторов функционирования ветроэлектростанций. По итогам исследования можно сделать вывод, что установление экономического эффекта эксплуатации подобных энергетических объектов представляет собой сложную многосоставную задачу; для её решения требуется учитывать широкий спектр взаимозависимых технических, экономических и природно-климатических параметров. Расчёт цены за единицу электроэнергии производится путём суммирования нескольких компонентов, затраты, связанные с производством электроэнергии; расходы на её передачу; надбавка за сбыт, вводимая гарантирующим поставщиком; и платежи, направляемые на содержание инфраструктуры. Процедуры регулирования тарифов опираются на широкий корпус нормативно-правовых актов, федеральные законы и постановления Правительства Российской Федерации. Сопоставление методов оценки экономической эффективности, используемых в России, в Европейском союзе и США, выявило заметную неоднородность методологических подходов. В российских расчётах акцент делается на расчёте коэффициента использования

установленной мощности и оценке периода окупаемости инвестиций; зарубежные методики, помимо этого, предусматривают оценку экологических последствий и параметры надёжности энергосистемы. Указанные различия подчёркивают потребность расширить перечень критериев при оценке эффективности российских ветроэлектростанций, что соответствует целям настоящего исследования.

В экономической теории традиционная мера эффективности выражается дробью, числитель отражает итоговый результат, знаменатель – объём ресурсов, израсходованных на достижение данного результата.

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.

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

где ВП — валовая прибыль, РД — результат деятельности, полученный доход,  $\mathcal{З}$  — затраты, себестоимость .

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

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

где КЭ — коэффициент эффективности (рентабельности), ВП — валовая прибыль,  $\mathcal{З}$  — затраты.

На итоговую производительность ВЭС влияет совокупность критериев, конструкционные (техническая сторона), экономические (с точки зрения результативности), вопросы эксплуатации и параметры экологического состояния;

дополнительно уровень отдачи связан с тем, насколько ВЭС способна переключаться на подходящий режим работы с учётом ориентации ветра<sup>87</sup>.

В перечень аналитических формул входят, общий показатель результативности, выражаемый как соотношение итогов работы и объёма понесённых затрат; вычисление валовой прибыли через разность между выручкой и расходами; коэффициент рентабельности, оценивающий доход на каждую рублёвую единицу вложений. Перечисленные математические модели составляют базовый комплект инструментов экономической оценки, подходящий для предприятий разных отраслей, в том числе на объектах ветроэнергетики. Оправданность экономического проекта определяется соотношением полученного результата и объёма расходов; показатель, равный единице или превышающий единицу, указывает на преобладание доходов над затратами. При расчёте показателя «валовая прибыль» применяется разница между суммарным итогом по проекту и величиной себестоимости; показатель отражает абсолютный размер, на который доходы превосходят расходы. Показатель рентабельности рассчитывают как отношение валовой маржи к общим вложениям, представленное в процентном выражении; он служит инструментом для сравнения инвестиционных альтернатив и для оценки относительной доходности капитала. В отношении ветропарков методика расчёта приобретает особые черты, структура затрат и профиль выручки складываются иначе – в себестоимости отсутствуют статьи, связанные с топливом, и капитальные вложения занимают большую долю расходов, а объёмы выработки электроэнергии подвержены колебаниям метеорологических условий.

При использовании обобщённой методики по составлению критериев экономической результативности промышленных компаний с акцентом на ветровую энергетику составляется перечень базовых параметров, описывающих эффективность эксплуатации ветроэлектростанций.

---

<sup>87</sup> Калашников, А. Е. Определение базовых свойств умной ветроэлектростанции малой мощности с наиболее эффективными характеристиками / А. Е. Калашников, Н. А. Устинов. — Текст : электронный // Молодой ученый. — 2018. — № 6 (192). — С. 36–39. — URL: <https://moluch.ru/archive/192/48337/> (дата обращения: 21.12.2025).

Показатель загрузки мощностей (КИУМ) вычисляют как отношение фактически выработанной энергии к теоретически достижимому объёму, соответствующему условному максимуму генерации при 100% загрузке. Математически КИУМ является отношением среднеарифметического значения мощности к установленной мощности электроустановки за заданный интервал времени.<sup>88</sup>

Удельная мощность ветрового потока – мощность, снимаемая ветроколесом с 1 м<sup>2</sup> «ометаемой» площади. Среднегодовая удельная выработка электроэнергии на 1 м<sup>2</sup> ометаемой площади. Годовая экономия условного топлива. Объём предотвращённой эмиссии углекислого газа в атмосферу. Срок окупаемости капитальных вложений в устройство ВЭС. Удельные капитальные вложения на 1 кВт установленной мощности ВЭС. Нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений. Инвестиционные затраты. Операционные затраты. Приведённая себестоимость электроэнергии (ПСЭ). Простой срок окупаемости.

LCOE (levelized cost of electricity) в энергетике – показатель нормируемой стоимости электроэнергии, средняя расчётная себестоимость производства электроэнергии за весь срок службы электростанции с учётом инвестиций, затрат и доходов. Нормированная стоимость рассчитывается на 20–40 лет жизненного цикла и выражается в единицах стоимости на кВт·ч.

При расчёте нормированной (средней) расчётной себестоимости производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла генерирующего объекта главной характеристикой является показатель экономической эффективности работы электростанций разных типов; его рассчитывают по следующей формуле<sup>89</sup>,

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

<sup>88</sup> Мокшин М. Ю., Путилов А. В. Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования. — Энергетическая политика, 2023, № 12 (191), с. 80–91.

<sup>89</sup> Зубакин, В. А. Экономическая эффективность электростанций на возобновляемых источниках энергии на примере показателя LCOE / В. А. Зубакин // СОК. – 2024. – № 10. – С. 72–75.

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.

Показатель LCOE выражает среднюю минимальную величину тарифа реализации электроэнергии; при достижении заданного уровня производитель остаётся безубыточным в течение всего срока эксплуатации генерирующей установки.

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  $t$ ;

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

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

$C = \text{НВВ КОМ}_t$  — 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 данной работе автор опирался на российский подход к расчету LCOE.

По мнению автора, зарубежные критерии KPI, применяемые при оценке эффективности работы ветроэлектростанций, 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.

Критерии зарубежной практики, приведённые в таблице выше, служат ориентиром для экономического моделирования и оценки проектов по строительству объектов генерации на базе ветровой энергии. Для ветроэлектростанций типично значение коэффициента использования установленной мощности на уровне тридцати двух процентов; показатель отражает, какая доля теоретически возможной выработки достигается при полной загрузке оборудования. Показатель LCOE зафиксирован на уровне пятидесяти долларов за мегаватт-час (эквивалентно примерно трёх тысячам девятистам пятидесяти рублям при действующем курсе) с ожидаемым разбросом от сорока пяти до пятидесяти пяти долларов – усреднённая оценка затрат на выработку электроэнергии за весь срок эксплуатации электростанции, служащая сравнительной метрикой при выборе технологий генерации. Рынок инвестиций в ветроэнергетику ориентируется на рентабельность активов в размере восьми процентов как минимально допустимый уровень доходности для вложений в ветроэнергетические проекты. Набор показателей служит опорой при оценке рентабельности отдельных ветроэлектростанций и при выработке решений по инвестициям. При планировании проектов необходимо учитывать, что фактические значения индикаторов показывают заметные колебания, вызванные местоположением объекта, ресурсом ветра на участке, используемыми техническими средствами и параметрами финансового обеспечения проекта.

Аналитическую работу выполнили российские специалисты Дегтярев К.С., Залиханов А.М., Соловьев А.А. и Соловьев Д. А.; в ней сопоставлены конструкционные и эксплуатационные параметры электростанций по различным видам топлива, а себестоимость одного кВт·ч вырабатываемой энергии рассчитана (табл.12). Опираясь на полученные данные, авторы сформулировали главные выводы. Станциям, использующим ВИЭ, свойственно низкое значение показателя загрузки установленной мощности. Переменные эксплуатационные расходы фактически отсутствуют, большая часть затрат сосредоточена на стадии капиталовложений. При длительной эксплуатации генерация на ВИЭ обеспечит более высокую экономическую отдачу. Объём инвестиционных вложений для газовых ТЭС остаётся наименьшим даже при реализации экологически усовершенствованных решений.

Интерпретация данных таблицы 12 даёт основание для следующих выводов, в интервале от 5 до 15 лет после ввода станции в эксплуатацию суммарные накопленные расходы, вызванные высокими переменными операционными издержками, превышают затраты на ГЭС, геотермальные, атомные станции и ВЭС на суше. При рассмотрении горизонта от 5 до 25 лет по критериям инвестиционных и общих затрат более конкурентоспособными оказываются гидравлические, геотермальные, атомные электростанции и ВЭС на суше.

Обновлённые угольные электростанции требуют умеренных капитальных вложений; при сроке службы свыше 15 лет конкурентные преимущества уменьшаются по отношению ко многим иным видам генерации. Объекты, работающие на биомассе, PV-решения, прибрежные ветровые установки и солнечно-термические комплексы характеризуются повышенными эксплуатационными расходами при горизонте 25 лет и более.

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
		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

Ветровые станции на суше оказались дешевле, чем АЭС и усовершенствованные ТЭС в течение срока эксплуатации от 5 до 10 лет.

Табличные сведения о капитальных и эксплуатационных расходах для электростанций разных типов позволяют сделать главные выводы по сравнительной экономике ветроэнергетики. Прежде всего стоит указать, что установки, работающие на возобновляемых ресурсах, характеризуются особой структурой расходов, доля капитальных вложений гораздо выше операционных затрат. В итоге получается принципиально иная картина, для тепловых электростанций большую часть бюджета составляют затраты на топливо. Удельный вес капитальных вложений в совокупных затратах наземных ветроэлектростанций за 25-летний срок эксплуатации составляет 69% (шестьдесят девять процентов), что приводит к усиленной привязке экономических показателей проекта к условиям финансирования и уровню дисконтной ставки. В интервале 5–10 лет эксплуатации

наземные ветряные установки показывают более высокую экономическую привлекательность по сравнению с атомными и модернизированными тепловыми электростанциями, указывая на конкурентные преимущества данной технологии. Полученные выводы обосновывают необходимость создания методических инструментов для систематического мониторинга показателей экономической эффективности ветропроектов, что позволит улучшить управление ветропроектами на каждом этапе реализации.

Электростанции на базе ВИЭ достигают ценовой конкурентоспособности с технологически и экологически усовершенствованными станциями, работающими на ископаемом топливе.

Увеличение доли ВИЭ с непостоянной выработкой в энергосистеме усилит колебания стоимости газа и угля и потребует наращивания резервных мощностей и средств хранения электрической энергии.

Сведения, подготовленные сотрудниками ИНЭИ РАН – А.А. Макаровым, В.А. Кулагиным, Д.А. Грушевенко и А.А. Галкиной, содержат данные<sup>90</sup>. К 2050 году для солнечных станций прогнозируют дополнительное снижение затрат примерно на 30%, а за период 2010–2022 гг. средневзвешенная себестоимость выработки электроэнергии опустилась с 0,43 до 0,08 долл. 2023/кВт·ч. Аналогично, для береговых ветровых станций в 2010–2022 гг. затраты сократились с 0,11 до 0,07 долл. 2023/кВт·ч; к 2050 г. прогнозируется ещё приблизительно 10% снижения. Что касается шельфовых ветровых установок, то за 2010–2022 гг. себестоимость снизилась с 0,20 до 0,11 долл. 2023/кВт·ч, а к 2050 году прогнозируется дальнейшее сокращение порядка 30%.

Крупные гидроэлектростанции предлагают очень низкую цену выработки электричества; стартовый тариф равен 0,01 долл. 2023/кВт·ч. Объём доступных ресурсов гидроэнергии ограничен, и строительство малых, средних и микро-ГЭС требует крупных инвестиций. В атомной отрасли снижение издержек на производство достижимо. Во многих странах эксплуатация АЭС обходится дороже

---

<sup>90</sup> 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.

угля и газа при выработке энергии. ВИЭ характеризуются переменной выработкой; энергоблоки АЭС дают стабильную и равномерную подачу электроэнергии.

Расходы ТЭС на газе и на угле снижаются из-за улучшения работы оборудования, а итоговая сумма затрат складывается из стоимости поставок газа и угля. Из-за этого сначала увеличатся объёмы выработки электроэнергии на подобных станциях, а к завершению прогнозного горизонта абсолютные значения генерации уменьшатся. К тому же мощности всё шире используются в роли резерва из-за нестабильной выработки ВИЭ-электростанций.

Данные Renewable Energy Agency (IRENA) за 2023 показывают, что 81% вновь введённых генерационных мощностей, функционирующих на ВИЭ, оказались экономически выгоднее сопоставимых объектов, работающих на ископаемом топливе. Данное обстоятельство создаёт убедительные экономические и инвестиционные основания для трёхкратного увеличения мощности ВИЭ к 2030.

На текущем этапе фотоэлектрические и ветровые установки фиксируют максимальное улучшение экономических показателей наряду с ростом КИУМ. По прогнозам, АЭС и далее будут сохранять положение самого затратного источника по показателю LCOE (рис.17).

При сравнительной оценке затратной эффективности электростанций разных конфигураций по индикатору LCOE обнаружен пробел, отсутствует единый регламент с перечнем нормативных позиций для учёта при вычислении LCOE.

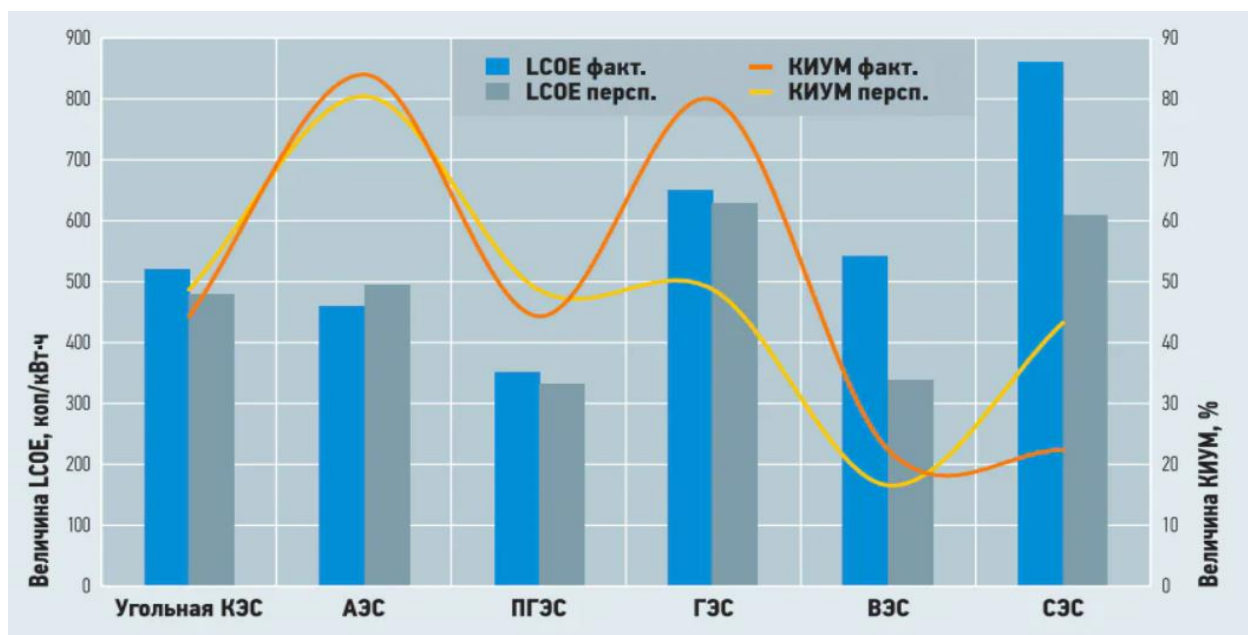


Рисунок 17. Сравнение величин LCOE по технологиям генерации по данным АО «СО ЕЭС»

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

Производительность ВЭС подвержена явлению «ограничение генерации (curtailment)»<sup>91</sup>, когда объёмы вырабатываемой электроэнергии принудительно ограничиваются в моменты превышения потребительского спроса. В рыночной среде встречается эффект, называемый ценовым каннибализмом<sup>92</sup>, наличие ВЭС понижает цену равновесия и приводит к сокращению доходов ветроустановок и других электростанций.

Инициативу, направленную на развитие «зеленой энергетики», модернизировало Министерство энергетики РФ; постановление Правительства РФ от 21 сентября 2021 года №1587 утвердило систему критериев поддержки «зеленых проектов» и инициативных решений в целях долгосрочного развития.<sup>93</sup> Критерии

<sup>91</sup> Ланьшина, Т. Прогноз развития ВИЭ в России до 2035 года / Т. Ланьшина // Научный вестник ИЭП им. Гайдара. – 2019. – № 9. – С. 40–47.

<sup>92</sup> 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.

<sup>93</sup> 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_396203/) (дата обращения: 08.06.2025).

идентификации экопроектов в России – в том числе в области ветроэнергетики – закреплены в «Национальной методологии социальных финансов<sup>94</sup> (Таксономия зелёных проектов)».

Автор исследования оценил степень задействования мощностей ВЭС разных типов. В работе рассмотрены два показателя, коэффициент использования установленной мощности (КУИМ) и структурный коэффициент использования мощности.

Метрикой КУИМ для ВЭС служит отношение фактической генерации к теоретическому максимуму выработки электрической энергии. Исследование показало, что рост экономической отдачи на единицу мощности, эксплуатируемой ВЭС, связан с сезоном и с интенсивностью ветрового режима в рассматриваемом периоде (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

Результаты численного анализа прироста экономической эффективности ветрогенерации, систематизированные в таблице выше, наглядно показывают заметное влияние сезонных климатических факторов на производственные

<sup>94</sup> 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)

показатели ветроэлектростанций и обосновывают необходимость учёта данного фактора при разработке системы мониторинга экономических показателей. Для ветроэлектростанции в Иссyk-Кульской области мощностью сто мегаватт прирост экономической отдачи составляет от девятнадцати целых восьми десятых процента в летний период до двадцати девяти целых одной десятой процента в зимний период; промежуточные значения – двадцать одна целая шесть десятых процента в осенний период и двадцать три целых семь десятых процента в весенний период. У Марченковской ветроэлектростанции в Ростовской области мощностью сто двадцать мегаватт прослеживается яркая закономерность. Прирост экономической эффективности варьируется по сезонам, летом – от семнадцати целых трёх десятых процента; осенью достигает двадцать пять целых восемь десятых процента; весной составляет двадцать семь целых девять десятых процента; зимой достигает пика в размере тридцати четырёх целых семи десятых процента. В холодный сезон фиксируется максимальное увеличение экономической отдачи из-за усиления ветрового режима. В тёплые месяцы выработка энергии на ветряных установках оказывается минимальной. Зафиксированная сезонная связь имеет значение при установлении режимов работы ветроэлектростанций и при создании адаптирующихся систем управления, ориентированных на метеорологические прогнозы.

Опираясь на накопленные представления о рентабельности ветровой энергетики и желая всесторонне осветить предмет исследования, исследователь выделил 4 индикатора для оценки и создания модели наблюдения за экономикой ВЭС.

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

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

Где  $\text{Э}_i$  – годовая фактическая выработка электростанции  $i$ -го типа, млн кВт·ч;  $M$  – установленная мощность электростанции  $i$ -го типа, ГВт. NPV показывает величину «чистых денег», получаемых от проекта сегодня с учётом будущих

доходов и расходов. При  $NPV > 0$  проект приносит прибыль с учётом стоимости денег; когда  $NPV$  превышает стоимость капитала, проект выгоден. LCOE (себестоимость) показывает, какая стоимость выработки 1 МВт\*ч энергии за весь срок эксплуатации. Учтены все затраты (строительство, эксплуатация), после чего проводится сопоставление с тарифом. Чем ниже LCOE, тем дешевле проект.

Выбранные показатели результативности работы предприятия в области ветроэнергетики не передают полной картины и не позволяют получить единое окончательное суждение о работе ВЭС. Вместе с тем регулярный контроль указанных показателей позволяет отслеживать повседневное функционирование станции и предоставляет руководству возможность незамедлительно вводить управленческие меры при возникновении нештатных событий.

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

В России, в секторах передовой технологической экономики, получили широкое распространение технологии виртуальных реплик реальных объектов. Упомянутые решения выступают связующим звеном между разнородными цифровыми инструментами и повышают долгосрочную стабильность компаний, работающих в области передовых технологий. В составе интеллектуальной энергосети виртуальные модели помогают прогнозировать аварийные ситуации и принимать превентивные меры, в том числе при внеплановых отключениях электроэнергии.

Функция цифрового аналога – отображение процесса, изделия или услуги в виртуальной форме. С помощью численных методов моделирования становятся доступными инструменты мониторинга работы систем и обработки с последующей интерпретацией накопленных данных. В действующих стандартах национального уровня понятие цифрового аналога изделия описывают как систему, совмещающую цифровую репрезентацию с каналами передачи сведений, связывающими

репрезентацию и материальный объект. Дополнительно такой объект принято рассматривать как аппаратно-программное решение, предоставляющее модель для обработки данных и управления функционированием социально-технических систем.<sup>95</sup>

В отечественном промышленном сегменте цифровое моделирование показывает стабильный рост и повышение зрелости коммерчески доступных цифровых платформ. Перед формализацией каждой модели в цифровой форме требуется предварительное создание 3D-объекта, учитывающего наружные и внутренние конструктивные элементы. Затем виртуальная конструкция дробится на элементные блоки; для каждого узла вычисляют выбранные физические параметры – напряжение, температура, скорость потока и прочие показатели<sup>96</sup>. Расчётные схемы опираются на численные приёмы, конечно-элементный анализ, вычислительная гидродинамика и моделирование дискретных элементов. В итоге получается виртуальная реплика, обладающая теми же физическими характеристиками, что и её реальный прототип.

При построении цифрового описания экономической системы элемент изучают с учётом внешних воздействий и внутренних характеристик. В таком симуляторе задают различные режимы функционирования и проводят расчёты при больших вариациях параметров внешней среды и внутренней конфигурации. Такая модель позволяет выявить главные свойства системы, оценить производительность, установить предельные нагрузки и вероятность отказа. В энергетическом секторе данные средства оказываются крайне полезными, поскольку высокая доля сложного оборудования превращает периоды простоя в источник серьёзных убытков для предприятий и общества и повод для наложения штрафов.

---

<sup>95</sup>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)

<sup>96</sup> 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)

На основе рассмотренных положений о влиянии моделирования в цифровой среде на энергетический сектор можно сделать сводные выводы, подчёркивающие роль такого набора средств для повышения производительности производственной деятельности. Надо особо отметить, что распространение решений, опирающихся на виртуальные аналоги объектов в передовых секторах национального хозяйства, выступает логичным продолжением государственной ориентации на цифровизацию, зафиксированной в Стратегии развития информационного общества России до 2030 года. Платформа, объединяющая разноплановые цифровые продукты, служит связующим элементом и укрепляет эксплуатационную и стратегическую устойчивость организаций в энергетической отрасли. Благодаря комплексному подходу совершенствуются инструменты мониторинга и обработки данных, что отражается в росте показателей стабильности предприятий. Программная реплика процесса, изделия или сервиса – цифровая репрезентация в виртуальном пространстве – открывает принципиально иные средства для обработки данных и контроля состояния систем посредством численных расчётов. В энергосистемах с высокой насыщенностью сложной техники критично, чтобы цифровые реплики воспроизводили аварийные сценарии и предотвращали возникновение аварий. При разработке в цифровом формате сначала создают объёмную трёхмерную модель, учитывающую наружные и внутренние конструкционные элементы; затем её разбивают на отдельные фрагменты для расчёта физических параметров каждого узлового компонента. Комбинация численных приёмов – метод конечных элементов, расчёт гидродинамики и дискретно-элементное моделирование – используется для создания цифровых аналогов, воспроизводящих физические характеристики материальных систем. В области экономического моделирования нужно учитывать, что построение исследуемой модели происходит в условиях взаимного влияния внешних факторов и внутренних условий; такая ситуация даёт возможность запускать различные режимы функционирования и проводить количественную оценку режимов при высокой вариативности управляющих параметров.

В условиях цифровой среды при работе с экономикой проявляются характерные особенности построения моделей.<sup>97</sup> Необходимо учитывать составной показатель, он показывает, насколько широко цифровизация охватила конкретную территорию или регион, задаёт весовой коэффициент для цифровых решений и оценивает пригодность таких решений для практического применения. Одновременно рассчитывают влияние внедрения цифровых решений на конкретные отрасли и на производственные процессы организации. Затем создают симуляционную структуру хозяйственных процессов с опорой на платформы цифровых услуг. В завершение принимают решение о направлении цифровизации – реализовать проекты силами внутренней команды либо с привлечением внешних подрядчиков.

Учёт композитного индикатора, показывающего уровень цифровой зрелости региона или территории и задающего весовой коэффициент цифровым технологиям вместе с оценкой возможностей использования цифровых технологий, предоставляет инструмент для корректной оценки готовности территории к освоению цифровых решений в области возобновляемой энергетики. Опираясь на выявленные характеристики построения моделей изменений в экономике при цифровом хозяйствовании, создаётся методический фундамент, дающий возможность проектировать и внедрять цифровые модельные инструменты на предприятиях ветроэнергетики. Количественная оценка влияния цифровых решений на работу сектора экономики либо на производственные процессы компании служит фундаментом для обоснования вложений в цифровую трансформацию, позволяя увязать предполагаемые расходы по проектам с прогнозируемыми экономическими преимуществами. Проведённый расчёт таких эффектов даёт инструмент для соотнесения затрат на реализацию инициатив и ожидаемой отдачи от использованных цифровых средств. Модель, построенная методом имитации экономических взаимоотношений и основанная на цифровых платформах, даёт возможность прогнозировать результаты управленческих шагов

---

<sup>97</sup> Хемраев, М. Специфика моделирования экономических процессов в условиях цифровизации / М. Хемраев // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2022. – № 8. – С. 234–236.

и тонко настраивать главные параметры функционирования предприятия при высокой степени неопределённости внешних условий. Решение о внедрении цифровых инструментов силами собственной команды или с привлечением внешних подрядчиков зависит от множества факторов, наличия профильных специалистов и материально-технической базы у компании, объёма и технологической сложности задач, сжатых сроков реализации и характера финансовых ресурсов, доступных организации. Для компаний сектора ветроэнергетики перечисленные факторы оказывают заметное влияние, проекты здесь требуют крупных капиталовложений, сроки окупаемости нередко удлиняются, а результаты работы во многом зависят от погодных условий, находящихся вне прямого управленческого контроля.

Необходимо, чтобы цифровой двойник энергетической системы соответствовал установленным требованиям.<sup>98</sup> При создании цифрового двойника требуется учитывать процессы старения реального объекта, опираясь на комплексное физическое моделирование и обработку эксплуатационных данных, сведения об отключениях, показатели нагрузок и параметры состояния окружающей среды на площадке цифровой подстанции. Система обязана проводить оценки изменения параметров по времени и осуществлять корректировку модели. В практической эксплуатации требуется использовать характеристики оборудования ВЭС, относящиеся к энергетическим показателям. Указанные параметры требуются для множества операций, связанных с производством и сбытом у ВЭС; необходимо периодически обновлять параметры, чтобы они адекватно отражали реальное состояние оборудования и пределы допустимых режимов работы.<sup>99</sup>

Сформулированные требования к цифровому двойнику энергетической системы отражают сложный набор задач, решаемых через использование

---

<sup>98</sup> 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.

<sup>99</sup> 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).

технологии в ветроэнергетическом секторе. Регулярные оперативные переоценки и адаптация алгоритмов позволяют корректировать параметры виртуального аналога в ответ на изменения режимов эксплуатации. Вдобавок модель подлежит корректировке по результатам получаемых наблюдений о реальных проявлениях функционирования системы. Сведения об энергетических показателях, установленных на ветроэлектростанции, являются обязательным ресурсом для ряда операционных процедур в области производства и сбыта. Важно периодически обновлять указанные показатели для соответствия реальному техническому состоянию и предельным ограничениям рабочих режимов оборудования. Набор изложенных требований задаёт проектную структуру цифровой модели энергетической системы и очерчивает перечень функциональных возможностей, подлежащих внедрению ради готовности к эксплуатации в реальных условиях. Выполнение указанных требований создаёт предпосылки для рационального использования модели, корректировка рабочих режимов ветроэлектростанции с целью повышения показателей, составление прогнозов объёмов производства электроэнергии, планирование графиков технического обслуживания и ремонтных работ оборудования и поддержка аргументированных управленческих решений на различных уровнях управления предприятием.

Анализ упомянутых положений, определяющих критерии цифровой модели энергосистемы, даёт основание сформировать единое понимание совокупности задач, реализуемых при внедрении этой технологии в области ветряной генерации. Собранные требования свидетельствуют о том, что разработка такой цифровой модели является комплексной многосторонней работой, объединяющей инженерно-технические решения и организационные практики, обеспечивающие эксплуатацию ветропарков. Требование учитывать эффект старения физического объекта, достигаемое посредством объединения физико-математического моделирования и анализа сведений о реальной эксплуатации, исключает трактовку цифровой реплики как неизменной конструкции; её целесообразно рассматривать как эволюционирующую систему, способную перестраивать поведение под новые режимы работы техники. Периодические оперативные проверки и модификация

вычислительных процедур создают возможность оперативно изменять настройки виртуальной копии при смене рабочих режимов, что в итоге способствует повышению точности симуляций и надёжности прогнозных выводов.

Практическая ценность виртуальных моделей, имитирующих работу ветровых установок, проявляется в том, что достоверные данные о параметрах выработки и режимах эксплуатации выступают основой для выполнения широкого круга операционных задач в сфере генерации и реализации электроэнергии и тем самым становятся неотъемлемой частью ежедневной работы компаний ветровой энергетики. Чтобы такие цифровые реплики могли надёжно выполнять роль инструмента при принятии решений руководства, требуется систематическая проверка и обновление их входных параметров в соответствии с фактическим состоянием техники и установленными эксплуатационными пределами режимов работы.

Алгоритм построения математической модели состоит из этапов. Первый этап – построение графа, отражающего структуру объекта; в ходе первого этапа получается математическая модель. На следующем этапе модель объекта уточняют путем параметризации математической модели. Завершающий этап – установка режима работы объекта через ввод параметров режима и запуск расчетов моделирующей программы.

Рассмотренный алгоритм процесса создания математической модели трактуется как ряд взаимно связанных стадий; каждая из них вносит вклад в создание надёжного инструмента для симуляции поведения энергетической системы. На первом этапе проводится формализация объекта с помощью графовой репрезентации, при этом создаётся структура, используемая как основа для последующей работы с моделью и задаётся топологическое описание связей между компонентами моделируемой системы. На втором этапе, посвящённом параметризации математической модели, производится наполнение структурной схемы конкретными количественными характеристиками, отражающими физические свойства реального объекта и условия функционирования объекта. На третьем этапе проводится установление режима работы объекта путём ввода

параметров и выполнения расчётов моделирующей программой, что даёт результаты, описывающие поведение системы в заданных условиях эксплуатации. Данный набор процедур универсален и пригоден для построения моделей широкого спектра энергетических систем, в том числе ветровых электростанций. Корректная установка начальных параметров сильно влияет на правдоподобность результатов моделирования. Предложенная методика построения количественных моделей выверена по критериям, принятым при оценке систем. Она нацелена на воспроизведение взаимосвязей между составными элементами энергосистемы. Данный подход создаёт возможность всесторонней проверки отдачи в процессе эксплуатации и контроля показателей работоспособности в различных режимах.

По итогам промежуточного анализа порядка действий при конструировании формального математического описания рассматриваемая последовательность операций может быть расценена как методически выверенная платформа для разработки набора средств, предназначенных моделировать динамику работы энергосистем различных типов и масштабов. Первичная формализация исследуемого объекта путём отображения его в виде сети узлов и рёбер формирует конструктивную основу, необходимую для следующего этапа отработки описания. Такое сетевое представление позволяет топологически отразить взаимосвязи между компонентами системы и создаёт условия для адекватного воспроизведения взаимодействий внутри парка ветровых установок. Последующая параметризация математической модели, в ходе которой структурная схема наполняется конкретными количественными характеристиками, отражающими физические свойства реального объекта и условия его функционирования, обеспечивает переход от абстрактного представления к модели, способной генерировать практически значимые результаты.

Финишная стадия включает установку режима функционирования через параметризацию и проведение расчётов в среде численного моделирования; в результате формируется набор сведений о реакции системы в конкретных эксплуатационных режимах, годный для планирования и повышения эффективности работы ветровых комплексов. Доказанная пригодность этих

процедур для построения моделей самого разного класса энергетических объектов – от единичных турбин небольшой мощности до крупных ветропарков с различной архитектурой – превращает предложенный подход в полезный методический ресурс для специалистов по ветроэнергетике и смежных направлений энергетического сектора.

В реальной деятельности по изучению производственных процессов моделирование поведения системы показывает высокую результативность. Серии моделирующих испытаний позволяют просчитать, как изменение отдельных параметров влияет на функционирование комплекса и затем обосновать наилучший вариант решения. Подобные подходы уже длительное время используются российскими предприятиями, ориентированными на технологические разработки.

Симуляционные модели служат инструментом, помогающим руководству вырабатывать управленческие решения, снижать расходы и выявлять скрытые ресурсы для роста продуктивности производственной деятельности. При модернизации или перестройке организационной структуры предприятия подобная модель даёт возможность в короткие сроки сравнить альтернативные сценарии развития производственных процессов и выбрать целесообразный вариант действий.

При анализе вклада моделей, построенных методом имитации, в процессы менеджмента промышленных предприятий необходимо отметить широкий спектр сфер использования и очевидную прикладную ценность. Подходы имитационного моделирования являются полезным инструментом для разработки и тестирования решений по различным управленческим вопросам в приближённых к реальности условиях производства. Внедрение имитационных методов повышает обоснованность и качество принимаемых управленческих решений на предприятиях. Модели, воспроизводящие процессы предприятия, позволяют вычислять метрики деятельности цехов и линий. Среди показателей – время прохождения производственных циклов для конкретных изделий и величина с направлением колебаний объёма незавершённой продукции. Моделирование предоставляет доступ к прочим характеристикам технологической цепочки,

полезным для юридически корректной и комплексной оценки эффективности работы фирмы. Важно подчеркнуть, моделирование методом имитации основано на принципе дискретных событий. При таком описании функционирование участка производства фиксируется в виде упорядоченного во времени ряда событий – от этапа расчёта объёмов производства до выпуска готовой продукции. Данный подход предоставляет инструменты для детального изучения временных параметров технологических циклов; при изучении результатов моделирования выявляются проблемные участки процесса, ограничивающие производительность. Выявленные ограничения служат основанием для принятия решений, направленных на повышение эффективности предприятия. Имитационные модели служат прежде всего для обоснования управленческих решений, сокращения затрат и обнаружения скрытых резервов, чтобы повысить производственную результативность. Когда предприятие проходит модернизацию или меняет организационную структуру, цифровая имитация процессов даёт возможность оперативно сопоставить альтернативные сценарии развития и выбрать наилучший вариант, уменьшая вероятность ошибочных управленческих шагов. Высказанные положения полностью соответствуют организациям сектора ветроэнергетики, у предприятий запутанная организация технологических операций и сильная зависимость от внешних воздействий.

В результате анализа использования моделей-имитаторов в практике управления предприятиями промышленного профиля становится очевидно, предлагаемые методики могут быть эффективно внедрены в отрасль ветровой энергетики. Эта сфера отличается высокой технологической сложностью, и её итоговые показатели во многом зависят от внешних условий, которые не поддаются оперативному руководству. Способность моделей-эмуляторов процессов воссоздавать рабочие процессы элемента производства как хронологически организованную цепь операций, охватывающую стадии от проектирования и организации выпуска до реального вывода продукции в обращение, представляет собой особую ценность для субъектов ветроэнергетического сектора, деятельность которых характеризуют значительные во времени колебания показателей генерации

электроэнергии. Предоставляемая такими моделями возможность измерения продолжительностей и переходных состояний между стадиями производственного процесса позволяет обнаруживать слабые звенья технологических последовательностей и формировать аргументированные меры по оптимизации эксплуатационной эффективности ветроэнергетических комплексов.

Опыт применения симуляционного моделирования в масштабных организациях – в частности в АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», в Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» и в нескольких ведущих зарубежных фирмах – подтверждает прикладную значимость этих подходов. На основании таких внедрений следует констатировать, что технология достигла необходимой зрелости и годится для широкого использования в разнообразных промышленных секторах, включая ветроэнергетику. Накопленные в перечисленных секторах практики применения симуляционных методов формируют методический фундамент. Он предназначен для приспособления и транспозиции релевантных методик на предприятиях ветроэнергетики. При этом учитываются характерные свойства этого сектора, прежде всего проявляющиеся во влиянии метеоусловий на технологические операции и в переменчивости генерации электрической энергии.

Моделирование методом имитации на уровне предприятия позволяет выявить показатели работы отдельного производственного звена – например продолжительность производственных циклов, объёмы и направление изменений незавершённого производства, плюс другие характеристики технологического процесса. Стоит учитывать, что в используемой системе имитационные модели строятся по дискретно-событийному принципу, функционирование звена представлено временной цепочкой событий, с этапами от планирования производства до фактического выпуска изделий. Применяемый подход даёт возможность оценивать временные интервалы и переходы между этапами производственного процесса.

Имитационное моделирование производственной системы внедрено в деятельность крупных отечественных компаний<sup>100</sup>, 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.

Составленный перечень организаций, внедривших в практику моделирование методом имитации производственных систем, наглядно показывает масштаб практической востребованности данной технологии; реализации зарегистрированы в различных промышленных секторах в Российской Федерации и за рубежом. В указанный перечень вошли АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Челябинский металлургический комбинат, АО «Первоуральский новотрубный завод» и завод по производству ячеистого пенобетона. Наличие перечисленных организаций в данном перечне подтверждает признание российским промышленным сообществом эффективности методов имитационного моделирования. Глобальные масштабы цифровизации производственных операций на основе имитационного моделирования очевидны. Подтверждение можно найти среди признанных на международной арене лидеров, Tata Steel – крупнейший поставщик и производитель в металлургической отрасли, судостроительная компания Fincantieri и группа компаний Airbus. Широкий круг отраслей – металлургия, авиастроение, судостроение и атомная энергетика – подчёркивает практическую универсальность подхода к моделированию методом имитации и пригодность подхода для разных производственных сред. С точки зрения данного исследования вывод состоит в том, что накопленный в

---

<sup>100</sup> 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/](https://up-pro.ru/library/information_systems/automation_project/cifrovoe-imitacionnoe-modelirovanie/) (дата обращения: 01.06.2025).

перечисленных секторах опыт использования указанных методик можно применить на предприятиях ветроэнергетики. В процессе переноса нужно учитывать специфические черты, прежде всего вызванные воздействием погодных условий на технологические процессы и нестабильностью выработки электроэнергии.

Сегодня промышленный сектор ориентируется на массовую оцифровку процессов и перевод управления и производства в цифровую среду. В ходе курса создаются гибридные кибернетико-материальные платформы, объединяющие слои данных с материальными узлами и сокращающие время от концептуальной проработки до серийного выпуска передовой техники.

Концептуальная модель «цифрового завода»<sup>101</sup> является передовым подходом к разработке «цифрового двойника» производственного предприятия (рис.18). Концепция предусматривает создание комплексных технологических решений, позволяющих разрабатывать и использовать в составе единого объекта организационные, технологические, логистические процессы и процессы управления производственной средой за счет интеграции виртуальных моделей и киберфизических систем.

---

<sup>101</sup> 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.



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.

Связать цифровые двойники отдельных модулей в единый координированный комплекс, что критично для энергосистем, оказывается технически и организационно сложной задачей. Для решения задачи в виртуальной среде требуется воспроизвести этапы построения энергосистемы на базе моделей, оперирующих данными, и установить корректные связи между компонентами. Для поддержки указанных моделей и прочих базовых элементов цифрового двойника энергетической системы создан российский программный комплекс Njtrack.

Работа над программным обеспечением для ветроэнергетических установок (ВЭУ) малой мощности велась группой исследователей, Тихоновой О.Б., Русяковым Д.В., Лариной Л.В. и Давыдовым Я.С. Переход от физических экспериментов к виртуальной имитации становится реальным благодаря численному моделированию ветроэнергетической установки при допустимой

достоверности результатов<sup>102</sup>, а необходимые расчёты выполнялись в пакете ANSYS Fluent.

Исследователи из разных стран объединились для создания цифрового двойника морских ветроэнергетических установок с целью снижения операционных расходов (ОРЕХ). Проект преследует цель повышения надёжности турбин<sup>103</sup>, внедряется предупредительное техническое обслуживание. Указанные мероприятия опираются на потоки оперативных данных и дают возможность предвидеть и устранять вероятные отказы в работе системы.

Виртуальная модель под именем Aerosense<sup>104</sup> создана для наблюдения за аэродинамическим состоянием лопастей ротора ветряной турбины. Проект реализован международным коллективом инженеров, Марыковского Ю., Кларка Т., Депарлье Ж., Хази Э. и Барбера С. В конструкции используются легко монтируемые датчики MEMS с простой установкой; они регистрируют параметры воздушного потока и акустические характеристики поверхности лопастей. Накопленные сведения пересылаются на облачную платформу, где данные обрабатываются оперативно и строятся прогнозные модели в реальном времени.

Цифровой комплекс моделирования энергосистем в реальном времени (КМРВ)<sup>105</sup> – программно-аппаратный комплекс; вычисления выполняются в реальном времени и распределяются между несколькими процессорными модулями; число модулей подбирается под тип модели энергосистемы. Главное достоинство КМРВ – возможность интегрировать реальные устройства в модель энергосистемы при замкнутой петле взаимодействия по входным и выходным электрическим сигналам.

---

<sup>102</sup> Применение компьютерного моделирования ветроэнергетической установки / О. Б. Тихонова, Д. В. Русяков, Л. В. Ларина, Я. С. Давыдов // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2016. – № 3 (37). – С. 36–38.

<sup>103</sup> 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).

<sup>104</sup> 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).

<sup>105</sup> 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.

SCADA фиксирует широкий набор эксплуатационных показателей ветряных агрегатов, величину скорости воздушного потока, частоту вращения ротора, выход преобразователя на генераторной стороне и выход преобразователя на сетевой стороне<sup>106</sup>. Операторы получают возможность контролировать парковую инфраструктуру как единый комплекс, поскольку платформа объединяет каждую турбину, подстанцию, метеостанцию и прочие подсистемы с центральным пунктом управления. Предложено техническое решение для построения реальной зависимости выходной мощности от рабочих условий генератора. В составе решения предложены методы обработки нулевых и пропущенных записей в массивах SCADA; оценивается влияние скорости воздушного потока на вырабатываемую мощность; устраняется смещение между регистрируемой скоростью воздушного потока и реальным значением скорости. С учётом параметров такой зависимости и условий технического обслуживания планируется проработать планы эксплуатации и регламенты ТО для турбин ветроэнергетических парков.

АО «Росатом Автоматизированные системы управления» (АО «РАСУ») разработало перспективную платформу управления электроэнергетикой под названием «цифровая подстанция». Планируется интеграция платформы в программно-техническую инфраструктуру Кармалиновской ветроэлектростанции<sup>107</sup> (Ветроэнергетический дивизион «Росатома»). Для ветроэнергетики данная платформа будет первой практической реализацией цифрового решения, способного заменить обширный комплект оборудования. Интеграция такого решения повысит надёжность и устойчивость работы комплекса и снизит эксплуатационные расходы. Система создаст предпосылки для перехода к концепции «безлюдного» обслуживания вспомогательных систем за счёт использования безопасной технологии, направленной на управляемую деградацию

---

<sup>106</sup> 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).

<sup>107</sup> «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-elektroenergiy-n> (дата обращения: 06.05.2025).

оборудования. По завершении опытно-промышленной эксплуатации предусмотрено тиражирование предложенного решения на всех строящихся ветроэлектростанциях в соответствии с стратегией внедрения передовых цифровых технологий.

Система управления энергосетью с виртуальными цифровыми репликами оборудования и процессов функционирует как цифровая подстанция с компонентами Smart Grid. Подобные решения служат фундаментом энергетических комплексов, ориентированных на будущее. По сравнению со стандартными сетями такие решения повышают надёжность и уровень безопасности; улучшенная стойкость к эксплуатационным и внешним стрессам снижает вероятность отказов. Под термином Smart Grid понимаются сети распределения электроэнергии с повышенным коэффициентом полезного использования энергии; виртуальные цифровые реплики представляют собой программные модели отдельных звеньев интеллектуальной инфраструктуры.

Сводный обзор по цифровым инструментам для ветроэнергетики показывает, что отрасль применяет широкий спектр методических подходов в процессе цифровой трансформации. На практике проявляются многочисленные способы внедрения цифровых технологий в работу сектора. Перечисленные восемь векторов развития подтверждают всесторонний и взаимосвязанный характер изменений. Программный комплекс Ntjраск, созданный отечественными специалистами, решает задачу объединения цифровых двойников составляющих компонентов многокомпонентных объектов в единое целое, фактически воспроизводя процесс строительства энергосистемы на математических моделях и цифровых данных. Программные комплексы проектирования ветроэнергетических установок малой мощности, созданные российскими исследователями, позволяют заменить физические эксперименты виртуальными, сохраняя допустимую достоверность получаемых результатов. Группы учёных из разных стран объединяют усилия для создания виртуальных двойников офшорных ветровых парков с целью снижения эксплуатационных расходов и повышения надёжности турбин через плановое техническое обслуживание. Платформа Aerosense проводит аэродинамический

контроль состояния лопастей с помощью микроэлектромеханических сенсоров и облачных средств; потоковая обработка поступающих данных выполняется на платформе без перерывов. Комплекс моделирования энергосистем в реальном времени представляет собой программно-аппаратный комплекс с возможностью включения реальных устройств в модель энергосистемы. Система SCADA обеспечивает регистрацию множества рабочих параметров ветровых турбин и соединяет отдельные турбины, подстанции и метеорологические станции с центральной станцией управления. Передовая система управления энергетической инфраструктурой – «цифровая подстанция» – создана для интеграции в механизмы управления ветроэлектростанций; её использование направлено на повышение надёжности работы при одновременном снижении эксплуатационных расходов. Технологии Smart Grid служат основой проектирования интеллектуальных электросетей будущего, придавая сетям более высокую эффективность и усиленную стойкость к стрессовым нагрузкам.

Ранее представленные IT-инструменты и прочие разработки содействовали развитию ветроэнергетики, но акцент сделан на решении производственно-технических задач. В указанных моделях отсутствует полноценная оценка экономической ситуации в отрасли, а проверка экономической эффективности предприятий не проводится. Поэтому необходимо внедрить специализированные платформы для расчёта и визуализации финансовых параметров работы компании. Ниже приведён пример одного из решений.

С 2021 года в ходе модернизации энергетической инфраструктуры был реализован проект по созданию интегрированной системы хранения и обработки показателей, что упростило сбор и интерпретацию данных.

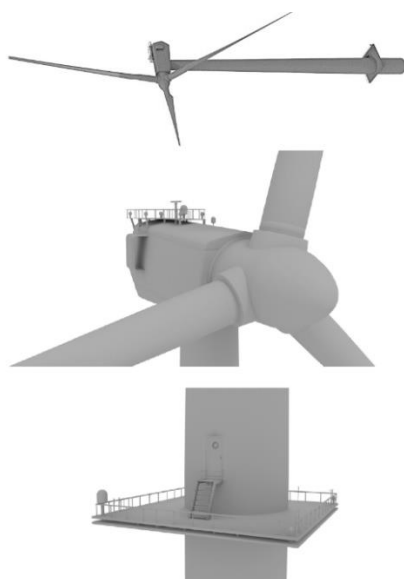
Год реализации проекта, 2021. В эксплуатацию введена интегрированная платформа для накопления и последующей обработки показателей высшего уровня (ЦСОД АИИС КУЭ АО «Атомэнергопромсбыт»). Пользователи получили доступ к единой централизованной архитектуре автоматизированного сбора, преобразования, накопления, передачи и визуализации данных, связанных с коммерческим и техническим учётом электроэнергии, в форматах, удобных для

подготовки отчётов. Платформа создаёт технические основания для подготовки и внедрения инициатив, рассчитанных на снижение затрат на электрическую энергию и мощность. Целесообразно сочетать модель с набором инструментов DG/DM («Data Governance»/ «Data Management»), что позволит выстроить механизм действенного управления процессом развития компании в энергетической сфере.

Для использования вышеописанной модели предложено применять комплекс инструментов DG/DM («Data Governance»/ «Data Management»), что позволит создать механизм результативного управления развитием энергетического предприятия.

В интересах АО «Новавинд» Мокшин М.Ю. и Путилов А.В. создали целостный инструмент, объединяющий источники данных и алгоритмические решения для мониторинга и оценки экономических индикаторов в отрасли ветроэнергетики.

Оценка интенсивности использования мощности ВЭС и экономической эффективности ветрогенерации проводится с учётом климатических условий регионов с помощью цифрового двойника (рис.19), что обеспечивает широкое внедрение решений в разные климатические зоны и учитывает эксплуатационные характеристики оборудования.



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

Источник: подготовлено автором.

Для определения степени задействования установленной мощности ветроэнергетических систем разных конструкций, выпускаемых АО «НоваВинд», изучены 4 показателя.

1) коэффициент использования установленной мощности (КИУМ). КИУМ выражается в процентах и показывает, как часто и насколько полно ветровая установка (в МВт) фактически работает по отношению к её «максимуму» мощности. По мере роста процента увеличивается доля задействованной установленной мощности. КИУМ рассчитывается как отношение фактической годовой выработки ( $E$ ) к произведению установленной мощности ( $M$ ) и количества часов в году (8760), причём полученное значение отражает максимально достижимый объём генерации при работе оборудования на полной нагрузке без остановок:

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

где:

$E$  — годовая фактическая выработка электроэнергии, кВт·ч;

$M$  — установленная мощность генератора, кВт;

8760 — общее число часов в календарном году.

Индекс КИУМ даёт числовое выражение уровня эксплуатации ветроустановки и помогает выявлять обстоятельства, мешающие достижению её номинальной мощности. LCOE обозначает расходы на производство 1 МВт\*ч электрической энергии за весь период эксплуатации электростанции. Сюда входят все статьи затрат – от возведения до обслуживания, и показатель сравнивают с тарифной ставкой. Меньшее значение LCOE означает более выгодную экономику проекта по созданию электростанции. IRR, выражаемая в процентах, – «ставка», при которой дисконтированные поступления и оттоки сводятся к нулю; когда IRR превышает стоимость привлечённого капитала, проект признаётся экономически

оправданным. NPV отражает объём чистого текущего дохода от проекта после дисконтирования предстоящих поступлений и выплат; положительная NPV означает прибыль с учётом временной ценности денег, отрицательная – убыточность.

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

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

В выражении (11):  $\text{Э}_i$  – 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 <sup>108</sup>	2021	2022 <sup>109</sup>	2023 <sup>110</sup>	2024
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

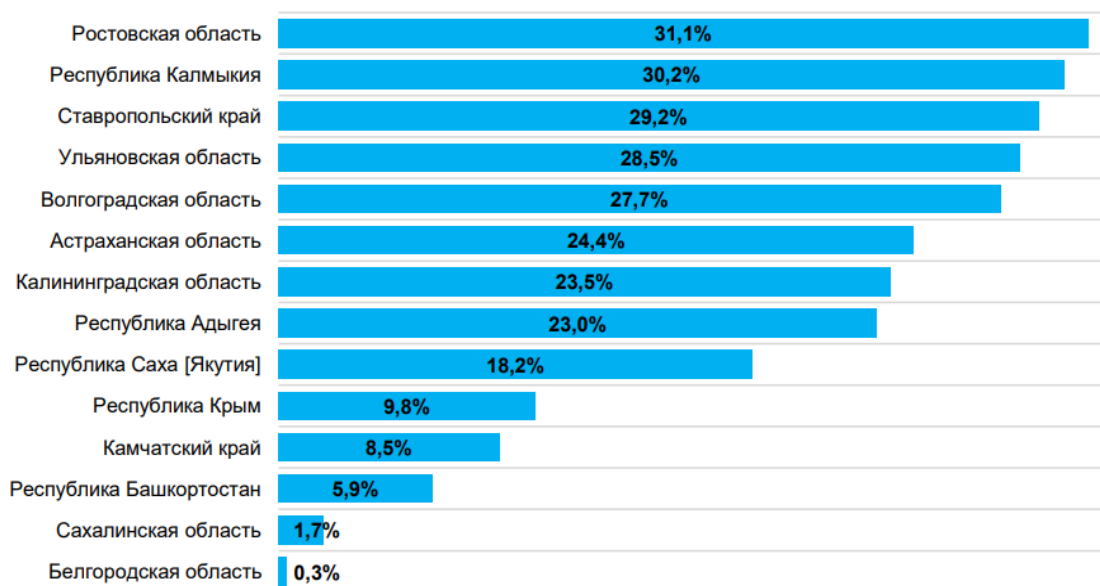
Источник: Составлено автором

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

<sup>108</sup> Бушукина, В. И. Особенности развития возобновляемой энергетики в мире и в России / В. И. Бушукина // Финансовый журнал. – 2021. – Т. 13, № 5. – С. 93–107.

<sup>109</sup> 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).

<sup>110</sup> 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/ck53fh9u065bliilscovlumxq02gqvkcx/202408\\_RREDA\\_annual\\_RES\\_report.pdf](https://rreda.ru/upload/iblock/c86/ck53fh9u065bliilscovlumxq02gqvkcx/202408_RREDA_annual_RES_report.pdf) (дата обращения: 13.06.2025).



Источник: ФГБУ «РЭА» Минэнерго России

Рисунок 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

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

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

В выражении (2)  $\Delta \mathcal{E}_i$  показывает долю, приходящуюся на электростанцию типа  $i$  в общем объёме выработанной электроэнергии, %.  $\Delta N_{yi}$  задаёт процентную долю, приходящуюся на электростанцию типа  $i$  от суммарной номинальной 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 выражении (3) установлены условные наименования, масса единицы объёма перемещаемого воздуха  $\rho$ ; коэффициент преобразования мощности ветровой установки  $\eta$ ; модуль скорости перемещения воздушной массы  $V$ ;

характерный диаметр рабочего обода установки ВЭС *D*. Следует отметить, что картирование преобладающих направлений и интенсивности ветра в глобальном масштабе определяется климатическими особенностями и географической зоной, где эксплуатируется ВЭС.

Происходит активное расширение ветроэнергетики на международном уровне и на территории России, на конец 2024 года в России насчитывается около 1200 ветроэлектростанций; среди них выделяются шесть ветропарков, сосредоточенных в Ростовской области, считающейся лидером в развитии возобновляемых источников энергии. Параллельно в Иссык - Кульской области Кыргызстана инициируются первые проекты по освоению возобновляемых источников энергии, в том числе ветровой энергии.

Сектор ветроэнергетики в России расширяет своё присутствие; отдельные субъекты федерации выделяются как приоритетные для развертывания ветропарков благодаря стабильным ветровым режимам и другим климатическим характеристикам. В числе названных территорий – Краснодарский край, Республику Калмыкия, Республику Адыгея, Кольский полуостров и остров Русский в Приморском крае. В ряде регионов с выраженными скоростями ветра, в том числе на прибрежных участках, имеется обширный ресурс для освоения энергии ветра<sup>111</sup>, в числе – Краснодарский край и Ростовская область на юге России; Ленинградская и Калининградская области; Якутию на Дальнем Востоке России; Архангельскую область; и Камчатский край на Дальнем Востоке России.

Развитие ветровой генерации в Кыргызстане остаётся на ранней стадии. Сейчас в республике функционируют лишь 3 малые ветроэлектростанции. При сотрудничестве с правительством России и компанией «Росатом. Возобновляемая энергия» планируется строительство ветропарка мощностью 100 МВт вблизи озера Иссык-Куль.

Для установления целесообразности и оценки эффективности размещения ВЭС проведено комплексное исследование природно-территориальных

---

<sup>111</sup> Ветроэнергетика в возобновляемой энергетике [Электронный ресурс] // Renwex 2026: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.renwex.ru/ru/ii/vetrochenergetika/> (дата обращения: 03.06.2025).

особенностей, климатических условий и социально-экономических показателей территорий Иссyk-Кульской и Ростовской областей.

Суть гипотезы такова, на территории Ростовской области возникли сочетания факторов, заметно улучшающие перспективы освоения ветровой энергии и возведения объектов ветроэнергетики.

Для обоснования дальнейшего развития ветроэнергетики выполнено сопоставление социо-экономических характеристик Ростовской области и Иссyk-Кульской областей. В Приложении 2 приведены расчеты показателей экономической эффективности проектов ВЭС для каждого региона.

**Ростовская область Российской Федерации.** Донской регион в России оказался одним из пионеров по реализации проектов «зеленой энергетики». По итогам комплексного инвестиционного регионального рейтинга 2023 года в отрасли возобновляемых источников энергии (далее - ВИЭ) лидером в третий раз признана Ростовская область. Параллельно Ростовская область заняла первое место в специальной номинации «Самый индустриальный ВИЭ-регион».

На территории Ростовской области выявляются 3 типа природных ландшафтов – степной, сухостепной и полупустынный; при переходе от западных районов к восточным очередность типов отчетливо прослеживается. По показателям ветрености Ростовская область относится к числу самых ветреных регионов России. В северных и центральных частях области и на площади Манычской низменности преобладают слабые ветры со скоростью 4,0 м/сек, тогда как в юго-восточной зоне региона регистрируются более интенсивные ветровые потоки – около 5 м/сек. Сезонная динамика проявляется так, скорости уменьшаются от февраля к июню августу – с 5,6 до 3,5 м/сек – и затем восстанавливаются в интервале от сентября к февралю, достигая 5,6 м/сек.

В документе под названием «Стратегии социально-экономического развития Ростовской области на период до 2030 года»<sup>112</sup> зафиксирован запас, позволяющий

---

<sup>112</sup> Об утверждении Стратегии 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:

расширить использование возобновляемых источников энергии, прежде всего солнечной и ветровой. Начинается внедрение регионального плана адаптации к изменениям климата в Ростовской области<sup>113</sup>, предусматривающего приоритетные направления деятельности; в числе назван топливно-энергетический комплекс. Параллельно проводятся работы по подготовке паспорта климатической безопасности региона. В целях 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 2050 года<sup>114</sup>, региональные органы создадут пакет правовых, организационных и ресурсных мер, необходимых для перехода экономики к низкой углеродной интенсивности. Для достижения поставленной цели предусмотрен перевод ведущих промышленных предприятий региона на наилучшие доступные экологические технологии и последовательное увеличение инвестиций в инициативы по долгосрочному развитию, 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

<https://www.consultant.ru/regbase/cgi/online.cgi?req=doc&base=RLAW186&n=91972#QiUHsoUquvGUnCMm2> (дата обращения: 08.06.2025).

<sup>113</sup> 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).

<sup>114</sup> 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_399657/) (дата обращения: 08.06.2025).

Доля энергии на базе возобновляемых источников энергии и распределенной электроэнергии от общей мощности потребленной энергии в Ростовской области, %								
Ростовская область	–	–	–	–	–	–	5,2	6,8

Источник: составлено автором

Энергосистема Ростовской области характеризуется профицитным электробалансом. Средняя совокупная выработка в регионе превышает совокупное потребление более чем в 2 раза, причём разрыв усиливается в последние годы.

Начиная с 2018 года в Ростовской области осуществлены масштабные инвестиционные проекты, предусматривающие возведение ветроэлектростанций. Инвесторами и исполнителями указанных проектов выступили ООО «УК «Ветроэнергетика», ООО «Энел Рус Винд Азов» и АО «НоваВинд».

Внедрение мер, направленных на сокращение энергопотребления, привело к последовательному уменьшению объёмов потребляемой тепловой энергии государственными и муниципальными учреждениями Ростовской области; соблюдается федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности»<sup>115</sup>.

Документ Стратегии -2030 Ростовской области фиксирует ряд приоритетных мероприятий. Одним из приоритетов – расширение производства энергии на основе возобновляемых источников. В 2040 году лидирующими станут гидроэнергетика (1 731 ГВт), ветроэнергетика (1 130 ГВт) и солнечная энергетика с применением фотоэлектрического преобразования. Для энергетического сектора предусмотрено ужесточение экологических требований; ожидаются проблемы, вызванные изменением климата.

В Стратегии Ростовской области до 2030 года (табл.16) приведены показатели электроэнергетической отрасли, запланирован рост производства электроэнергии при одновременном снижении потребления за счёт энергосбережения.

<sup>115</sup> 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/) (дата обращения: 18.06.2025).

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

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

Источник: составлено автором

На текущий момент в Ростовской области эксплуатируются шесть объектов ветроэнергетики совокупной мощностью 610 МВт. Продление проектной реализации, направленной на строительство ветровых комплексов, находится на стадии рассмотрения у инвесторов. В границах региона намечено возведение ветроэлектростанций суммарной проектной мощностью до 750 МВт. В регионе уже действуют промышленные предприятия, производящие башни для ветроэнергетических установок, модульные стальные башни и комплектующие для парков ветрогенерации (гондолы, генераторы, ступицы)<sup>116</sup>.

Ростовской области придан приоритет планомерному расширению мощностей ВИЭ; большая часть работ сосредоточена на создании и эксплуатации ветропарков. Материалы обзора и накопленные эмпирические данные подтверждают, что регион располагает высоким ресурсом для увеличения ветроэнергетических мощностей.

Изучение сведений о Ростовской области в контексте развития ветроэнергетики показывает наличие благоприятных условий для реализации проектов по использованию возобновляемых источников энергии. Донской регион удерживает ведущие позиции в комплексном инвестиционном рейтинге отрасли возобновляемых источников энергии, трижды подтверждённый лидерский статус сопровождался присуждением первого места в номинации «Самый

<sup>116</sup> Ростовская область в третий раз стала лидером среди регионов по ветрогенерации // Официальный портал Правительства Ростовской области (donland.ru). [Электронный ресурс]. 12.10.2023. URL: <https://www.donland.ru/news/24263/> (дата обращения: 12.10.2023).

индустриальный ВИЭ-регион». Ландшафт региона представлен степью, сухой степью и полупустынями; такие природно-климатические условия создают благоприятную базу для использования ветровой энергии. Средние скорости ветра составляют 4,0 м/сек в северных и центральных районах и достигают 5 м/сек на юго-востоке. В списке стратегических документов, в том числе в Стратегии социально-экономического развития Ростовской области на период до 2030 года, содержится указание на широкие возможности внедрения солнечных и ветровых генеративных решений. Мероприятия по приоритетным направлениям регионального плана адаптации к изменениям климата касаются, в частности, топливно-энергетического комплекса. Профицитный электробаланс в регионе объясняется тем, что суммарная выработка превышает суммарное потребление более чем в два раза. Начиная с 2018 года крупные инвестиционные проекты по строительству ветряных электростанций были реализованы компаниями ООО «УК «Ветроэнергетика», ООО «Энел Рус Винд Азов» и АО «НоваВинд». В регионе размещены шесть ветропарков; общая установленная мощность – 610 МВт. Параллельно работают промышленные предприятия, изготавливающие башенные конструкции для ветряных установок, сборные стальные мачты и комплектующие для парковых энергетических комплексов. Перечисленные производственные и инфраструктурные элементы создают надёжную основу для дальнейшего расширения ветроэнергетической отрасли в указанном регионе.

Тройное признание Донского региона в качестве лидера комплексного инвестиционного рейтинга сектора возобновляемых источников энергии, сопряжённое с занятием первого места в номинации «Наиболее индустриализированный ВИЭ-регион», служит выраженным показателем выстроенной институциональной среды. Приток инвестиций и успешное воплощение ветроэнергетических инициатив являются проявлением этой инфраструктуры управления и регулирования. В совокупности же Ростовская область демонстрирует набор выгодных условий, формирующих существенный ресурс для реализации проектов в области ВИЭ с приоритетом ветровой генерации. Климатические и природные характеристики территории выражены степным,

сухостепным и полупустынным ландшафтным рядом; сочетание этих морфотипов с ветровым режимом – порядка 4,0 м/с в северной полосе и центральной зоне и примерно 5 м/с на юго-востоке – формирует реальные основания для круглогодичной эффективной работы ветроэлектростанций. Документы стратегического формата на уровне региона, в том числе

Программный документ, задающий курс развития региона с завершением в 2030 году, ориентирует усилия на распространение фотоэлектрических и ветроэнергетических решений. Такая ориентация формирует устойчивую и предсказуемую линию государственной политики в соответствующей сфере и снижает степень нормативной неопределённости для инвесторов. Ситуация, при которой объёмы производства электроэнергии в регионе превышают потребление более чем вдвое, создаёт предпосылки для экспорта мощности за пределы территории и повышает коммерческую привлекательность запуска новых генерирующих объектов. В указанном районе размещены производственные мощности, изготавливающие опорные башни для ветрогенераторов, модульные стальные опоры и узловые компоненты для крупных энергетических парков. Это указывает на формирование региональной промышленно-производственной базы, имеющей ресурсы для удовлетворения технических потребностей сектора и для уменьшения зависимости от поставок из-за рубежа.

**Иссык-Кульская область.** Кыргызская республика занимает территорию в северо-восточном секторе Центральной Азии и фактически размещается в географическом центре Евразии. На её просторах расположен бессточный водоём Иссык-Куль – уникальный природный объект, по глубине занимающий седьмое место среди самых глубоких озёр планеты. В Иссык-Кульской области суммарное число солнечных дней за год достигает 300. Широкий набор ландшафтов – одна из характерных черт Кыргызстана как государства с преимущественно горным рельефом. Горные комплексы Тянь-Шаня и Памира покрывают три четверти территории страны и сдерживают воздушные потоки, что создаёт неблагоприятные условия для строительства ВЭС.

Распределение природно-географических факторов по территории страны делает нецелесообразным широкомасштабное использование ветровых генераторов для выработки электрической энергии. Коммерческий интерес к проектам по использованию ветровой энергии ограничен, средняя скорость ветра в регионе недостаточна, а капитальные затраты на строительство турбин остаются высокими. Инициативы по созданию ветровых комплексов не получают широкого одобрения со стороны инвесторов и государственных структур.

Отдельный раздел издания статистики по Иссык-Кульской области Кыргызстана<sup>117</sup> предлагает подробную разбивку данных о снабжении региона электричеством, природным газом, паровым отоплением и водоснабжением (табл.17).

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 <sup>3</sup>	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.

По данным табл.3 выявлено, что индикаторы распределения и передачи электроэнергии в 2022 году заметно снизились относительно 2021 года, что

<sup>117</sup> 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).

отразилось на промышленном секторе, в декабре 2022 года простаивало 23,4 % промышленных предприятий. Обеспеченность электроэнергией в Иссык-Кульской области носит неравномерный характер и сопровождается периодическими дефицитами, что побуждает правительство республики и администрацию области принимать меры по устранению дефицита электроэнергии.

Расположение Кыргызстана в северо-восточной части Центральной Азии и в географическом центре материка Евразия определяет климат с ярко выраженными особенностями, нехарактерными для равнинных территорий. Указанные климатические особенности оказывают влияние на определение возможностей ветряных энергоустановок для региона. Изучение параметров энергообеспечения Иссык-Кульской области Кыргызской Республики послужило основой для формулировки ряда общих положений о перспективах и направлениях развития ветроэнергетики на данной территории. Горные массивы Тянь-Шаня и Памира, покрывающие три четверти площади страны, выступают природными преградами для движений воздуха, что сильно ограничивает перспективы широкого развития ветровой энергетики. В Иссык-Кульской области регистрируется до 300 солнечных дней в году, указывая на большие возможности использования солнечной энергетики в качестве альтернативного направления для развития возобновляемых источников энергии. По сведениям статистики фиксируются перебои с подачей электроэнергии в регионе. В декабре 2022 года 23,4% предприятий производственной сферы полностью простаивали из-за нехватки доступной электрической мощности. Показатели распределения и передачи электроэнергии за 2022 год заметно уменьшились по сравнению с 2021 годом; снижение негативно повлияло на функционирование промышленной отрасли. На территории республики запланировано развитие ветроэнергетики путём монтажа компактных автономных ветряных агрегатов мощностью 1–10 кВт. Установки предназначены для снабжения электроэнергией отдельных хозяйств, не подключённых к единой энергосети, в пригорных и удалённых горных местностях, где средняя скорость ветра достигает 10–12 м/сек. Экономическая оценка указывает, что при действующих тарифах типовой прибор номиналом 2 кВт окупается в среднем за 19

лет. Указанный срок заметно превышает сопоставимые показатели в других регионах и обосновывает необходимость государственной поддержки инициатив по развитию ветроэнергетики.

Планируется установка маломощных ветряных генераторов мощностью в диапазоне 1–10 кВт для производства электрической энергии и питания отдельных потребителей. Генераторы рассчитаны на размещение в распределённых предгорных участках и удалённых горных зонах, где фиксируются ветровые скорости порядка 10–12 м/сек; подобные условия чаще встречаются в перевальных местах и узких каньонах. Максимальное число дней с интенсивным ветром достигает примерно 120 в году в окрестностях Балыкчы, тогда как в других районах показатель варьирует и не превышает 40 дней. При действующих базовых тарифах на электроэнергию в размере 2,16 сома<sup>118</sup> (или 2,60 рублей по курсу на 25.11.2024) установка номиналом 2 кВт при суточном потреблении 26 кВт окупается за 19 лет. В России же стоимость традиционной электрической энергии для населения во втором полугодии 2024 года, применяемая к домам с газовыми плитами, повысилась на 8,9% – на 60 копеек – и достигла 7,33 руб. за кВт\*ч.

Укрепление энергетической безопасности и сокращение экологических рисков, наряду с ролью снабжения электроэнергией, влияют на экономическую эффективность ветровой энергетики. В Таблице 18 собраны отборные официальные статистические показатели Ростовской и Иссyk-Кульской областей с целью выявления факторов, благоприятствующих развитию ветроэнергетики (табл. 18).

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

Название региона	S Территория, тыс. км	Численность населения на 1 января	Валовой региональный продукт в 2022 г.	Средняя заработная плата в регионе,	Средняя заработная плата в сфере обеспечения электроэнергией,	Индекс производства по виду деятельности «Обеспечение	Инфляция за год, %
------------------	-----------------------	-----------------------------------	--	-------------------------------------	---	---	--------------------

<sup>118</sup> 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](https://movegreen.kg/wp-content/uploads/2022/09/research_redo_29_august_final-1-1.pdf) (дата обращения: 12.06.2025).

		2023 г., тыс. человек	млрд руб.	тыс. руб.	газом, паром и кондиционирова нным воздухом, тыс. руб.	электроэнергие й газом и паром; кондиционирова ние воздуха» по итогам 2022 по сравнению с 2021 <sup>119</sup> , %	
Ростовс кая область 120	101,0	4 164,5	2325,8	44,8	54,5	107,9	7,4
Иссык- Кульска я область	43,7*	0,54	0,8	18,1	27,0	57,3	15
Отноше ние	2,3	7712,0	2907,3	2,5	2,0	1,9	0,5

Источник: составлено автором

Обменный курс от 25 ноября 2024 использован для пересчёта показателей, относящихся к Иссык-Кульской области, 1 киргизский сом = 1,20 рубля.

Изучение рельефа и географических характеристик исследуемых районов даёт основание полагать, что наибольшие возможности размещения ветровых энергоустановок сосредоточены в Ростовской области. Факторы, подтверждающие данное утверждение, – высокая интенсивность и стабильность ветров, преобладание равнинного ландшафта, большая площадь региона и высокая численность населения.

Сопоставив экономические и социальные показатели двух изученных субъектов, исследователи получили базу для подробного заключения о перспективах внедрения ветроэнергетики по регионам. Дальнейшая сверка ведущих индикаторов выявила, что большинство критериев, влияющих на способность проектов привлекать капитал в сектор энергетики, использующий возобновляемые ресурсы, складываются в пользу Ростовской области. По итогам оценки совокупных параметров сделан вывод о наличии у Ростовской области

<sup>119</sup> 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).

<sup>120</sup> 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](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2023.pdf) (дата обращения: 06.05.2025).

конкурентных преимуществ при реализации проектов, ориентированных на использование энергии ветра. Площадь Ростовской области в 2,3 раза больше площади Исык-Кульской области; численность населения Ростовской области превышает население Исык-Кульской области в 7 раз, из-за чего спрос на электроэнергию в Ростовской области в разы выше. Разрыв по показателю «Валовой региональный продукт» между Ростовской областью и Исык-Кульской областью составляет 2907,3 раза, что указывает на коренное несоответствие масштабов экономик Ростовской и Исык-Кульской областей. Межрегиональное соотношение средних выплат по регионам составляет 2,5 раза. Вознаграждение в сфере электроэнергетики в каждой из областей оказывается вдвое выше регионального среднего, что подтверждает вклад отрасли в промышленную структуру регионов. Сопоставление значений индекса производства по виду деятельности «Обеспечение электроэнергией, газом и паром; кондиционирование воздуха» показывает 107,9% для Ростовской области и 57,3% для Исык-Кульской области – указывая на разнонаправленные тенденции в развитии энергетического сектора. Годовая инфляция в Исык-Кульской области оказалась вдвое выше соответствующего уровня в Ростовской области; разница в таком масштабе повышает риски, присущие проектам с долгосрочным горизонтом инвестирования. По суммарным данным можно с уверенностью заключить, что в Ростовской области в большей степени сложились благоприятные условия для развития ветроэнергетики.

Сравнительный разбор социально-экономических данных по Ростову и Исык-Кулю даёт основание для подробного вывода о том, какие относительные преимущества и ограничения характерны для каждого из этих регионов в контексте развития ветровой энергетики. Ростовский регион показывает многократное превосходство по ключевым показателям – по площади, численности жителей, объёму регионального ВРП и среднему уровню оплаты труда; совокупность этих факторов формирует реальную базу для повышения спроса на электрическую энергию. При наличии увеличенного потребления ожидаемый экономический эффект от внедрения проектов ветровой генерации в Ростове, по всей видимости,

окажется более значимым, чем тот, который прогнозируется для территории Иссyk-Куля.

Межтерриториальный разрыв в величине средних вознаграждений достигает 2,5-кратного уровня; при этом в сегменте электроэнергетики размер оплаты в каждом случае в два раза превосходит соответствующую региональную среднюю. Из этих фактов вытекает, что энергетический сектор занимает значимую позицию в промышленной конфигурации каждого из анализируемых районов и что в них присутствует подготовленный кадровый потенциал, способный обеспечить надёжную эксплуатацию ветровых энергетических установок. В регионе Ростов отраслевой индекс производства в сегменте «поставка электричества, газоснабжение и паровое обеспечение; системы климат-контроля» достиг 107,9%, тогда как в регионе Иссyk-Куль он равнялся 57,3%. Такое соотношение отражает кардинально отличающиеся траектории развития энергетического комплекса в указанных территориях. В связи с этим целесообразно формировать отдельные стратегические подходы при проектировании и внедрении программ по возобновляемой энергии, адаптируя решения под характерные для каждой местности условия.

При проектировании и осуществлении ветроэнергетических инициатив на территории Иссyk-Кульского региона следует учитывать, что годовой индекс инфляции здесь примерно вдвое выше, чем в Ростовском регионе. Такое соотношение повышает уязвимость вложений с длительным горизонтом окупаемости и обязывает применять специальные инструменты хеджирования и меры по сохранению покупательной способности инвестированного капитала.

По итогам сопоставления по ряду показателей установлено, что социально-экономические характеристики Ростовской области многократно превосходят показатели Иссyk-Кульской области. Примечательно, средняя заработная плата в рассматриваемых регионах, с учётом оплаты труда в электроэнергетике, в обоих случаях в 2 раза выше региональной средней, что подчёркивает роль отрасли в промышленном секторе. Особое беспокойство вызывает уровень годовой инфляции

– в Иссык-Кульской области на дату проведения исследования показатель оказался в 2 раза выше.

Для гарантии стабильного электроснабжения промышленных объектов и населения республики Минэнерго Кыргызстана и Росатом согласовали перспективную программу строительства ветроэлектростанций с общей проектной мощностью до 500 МВт<sup>121</sup>. В 2024 году при участии компании «Росатом. Возобновляемая энергия» в Иссык-Кульской области Кыргызстана введена в эксплуатацию ветроэлектростанция мощностью 100 МВт; выработка составила около 290 млн кВт\*ч электроэнергии.

В таблице 19 приведены средние региональные показатели скорости ветра, оказывающие влияние на генерацию электроэнергии. Проведённая автором оценка выявила, что Ростовская область характеризуется более выгодным ветровым режимом, что увеличивает её способность к генерации электроэнергии. Выводы спектрального исследования позволяют экономически обосновать оптимизацию режима работы ВЭС с учётом периодов сезонных нагрузочных максимумов.

Применение вейвлетных подходов при изучении параметров ветра в обследуемых районах породило прикладные выводы, представляющие ценность для улучшения эксплуатации ветроэнергетических объектов. Исследование с опорой на вейвлет-преобразования выявило скрытые закономерности в поведении ветра, пиковая ветровая нагрузка приходится на январь-март, а ослабление ветровой активности проявляется в июль-сентябрь. Установлено, что зимние пики скорости ветра обеспечивают до 30% годовой выработки электроэнергии, влияя на планирование эксплуатационных режимов. Сравнение усреднённых скоростей ветра показало, что Ростовская область характеризуется более благоприятными ветровыми условиями со средней скоростью 7,5 м/с против 6,3 м/с в Иссык-Кульской области. Зимний пик скорости ветра достигает 8,5 м/с в Ростовской области и 7,2 м/с в Иссык-Кульской области. В Ростовской области амплитуда

---

<sup>121</sup> Шевченко, А. 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).

сезонных флуктуаций выражена сильнее и достигает  $\pm 20\%$ , тогда как в Иссyk-Кульской области она равна  $\pm 15\%$ . Исследование розы ветров установило доминирующие вектора, для Ростовской области – юго-юго-восточное, для Иссyk-Кульской области – западно-северо-западное. Полученные эмпирические сведения используются для экономической настройки режимов работы ветроэнергетических станций в соответствии с региональными сезонными проявлениями ветров и необходимы для обеспечения максимальной эффективности генерации электроэнергии (табл. 19).

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

Параметр	Ростовская область	Иссyk-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 Иссyk-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.

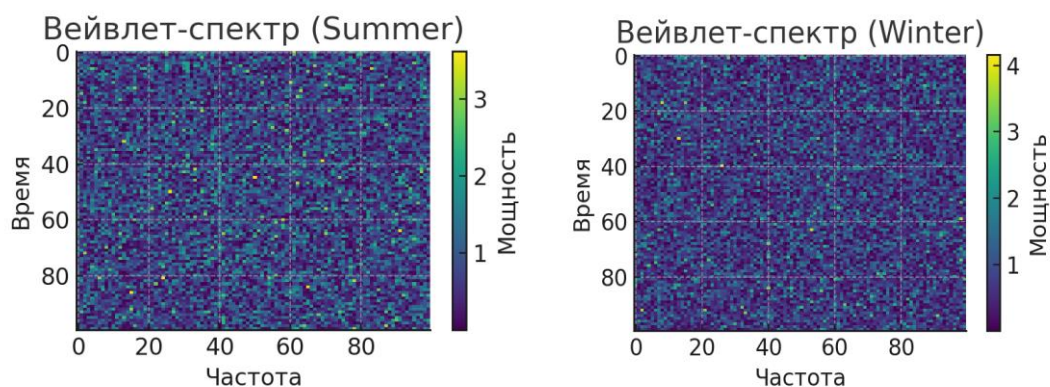


Рисунок 21. Вейвлет – спектры лето-зима для выявления закономерностей скорости ветра.

Источник: составлено автором.

С помощью вейвлетного разложения выявлены скрытые закономерности ветровой активности; выделены периоды высокой ветровой нагрузки (январь-март) и пониженной скорости ветра (июль-сентябрь). Показано, что зимние пики скорости ветра обеспечивают до 30% годовой выработки электроэнергии. Полученные спектральные результаты 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 в указанном порядке (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%

Источник: составлено автором

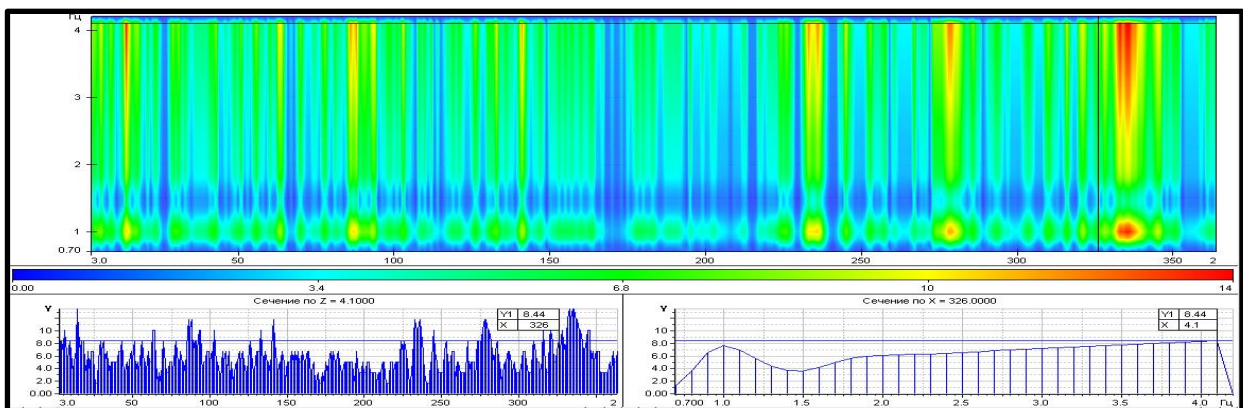
Таблица 21. Роза ветров в Иссык-Кульской области в декабре 2022 года

↓	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

Сведения о розах ветров по Ростовской области и по Иссык-Кульской области за 2022 год содержатся в таблицах №5 и №6. рис.22.А иллюстрирует вейвлет-спектр распределения скоростей потоков воздуха; рис.22.Б приводит сопоставимый спектр.

А.



Б.

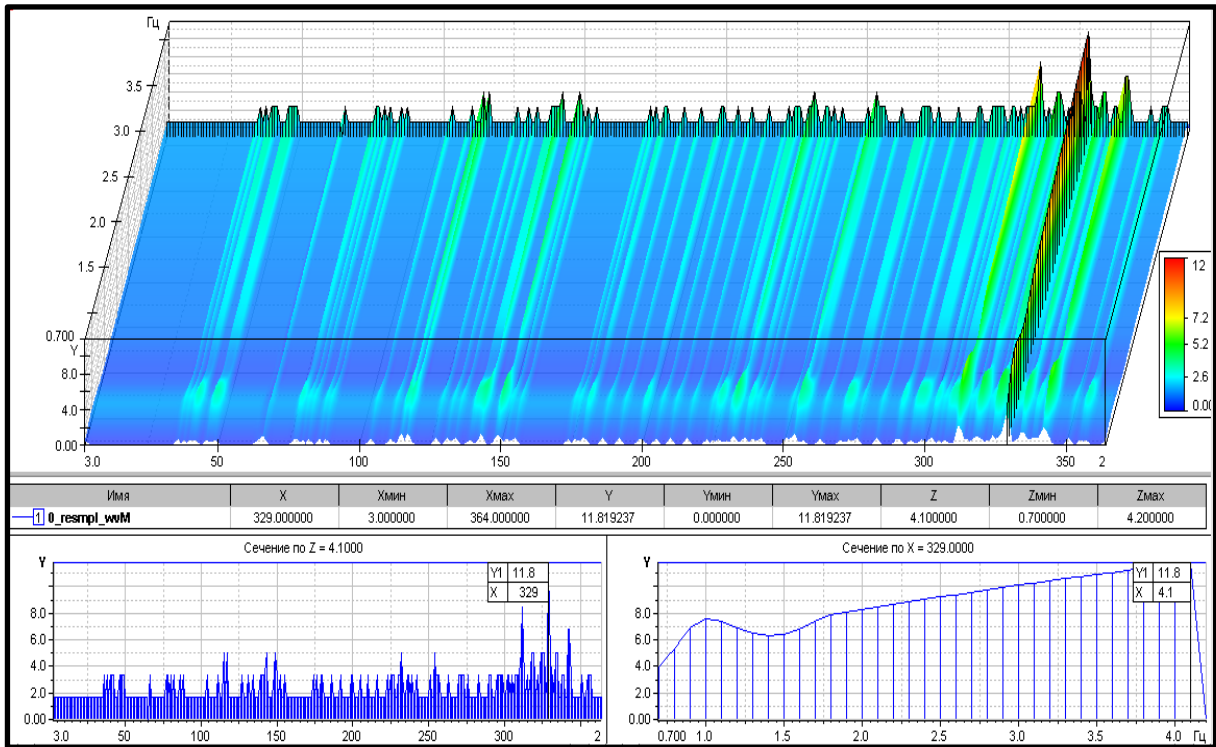


Рисунок 22. Вейвлет-спектр поля скорости воздушных потоков за 2022 год: А.

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 (МВт·ч)
Зима	7,5	35	3100
Весна	6,0	30	2800
Лето	5,2	25	2200
Осень	6,8	32	2900

Источник: составлено автором

Зимой ветер в среднем достигает 7,5 м/с, поэтому коэффициент использования установленной мощности КИУМ равен 35%, а суммарная годовая генерация составляет около 3100 МВт·ч. Летом средняя скорость ветра – 5,2 м/с, поэтому КИУМ опускается примерно до 25%, и годовой объём выработки составляет порядка 2200 МВт·ч.

Сезонные ряды замеров ветра служат основой для совершенствования расчётов эксплуатационных параметров ВЭС (КИУМ, объёмы генерируемой электроэнергии). Выполняется оценка влияния ветрового режима на рентабельность ВИЭ.

Посредством имитационного моделирования влияния климатических условий на работу ВЭС была установлена зависимость (табл.23),. при температуре ниже  $-10^{\circ}\text{C}$  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

Было сформулировано заключение, установлены поправочные множители, подлежащие интеграции в экономическую модель оценки эффективности ВЭС. Для повышения экономической отдачи ВИЭ требуется корректировка рабочих режимов ВЭС с учётом сезонных колебаний. Было сформулировано заключение, установлены поправочные множители, подлежащие интеграции в экономическую модель оценки эффективности ВЭС.

Автор просчитал алгоритм управления работой ВЭС с учётом сезонных колебаний скорости ветра и температуры. График представлен на рис. 23.

Использование динамического программирования привело к росту выработки электроэнергии и к улучшению характеристик работы ВЭС.

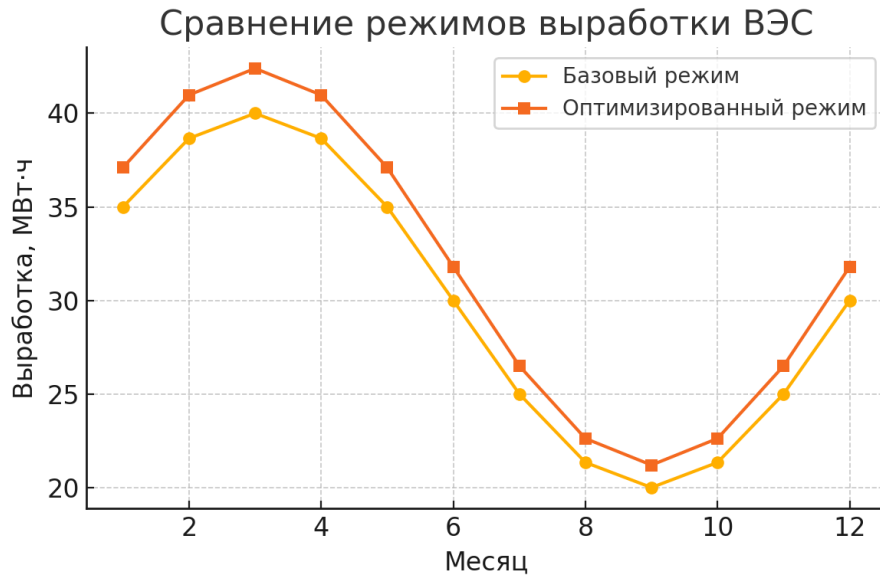


Рисунок 23. Сравнение режимов выработки по месяцам года.

Источник: составлено автором.

Построение вариантов эксплуатации ВЭС при разных режимах ветровой активности и расчет экономического эффекта позволили получить результаты адаптивных 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 Исык-Кульской областях установлено, в зимний период (декабрь–март) скорость ветра увеличивается на 15–20% относительно среднегодового. В летние месяцы скорость ветра снижается на 10–15%. Рекомендуемый режим, Зимой – работа на полной мощности, максимальная загрузка ВЭУ. Летом – частичное ограничение мощности для сохранения оптимального КИУМ и предотвращения перегрузок. 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 влияния адаптивного режима работы ВЭС на снижение рисков при нестабильном ветре автором построены сценарии эксплуатации ВЭС при различных вариантах изменения ветровой активности и произведён расчёт экономического эффекта для каждого варианта (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	$\Delta$ Выработка (%)	$\Delta$ КИУМ, (п.п.)	$\Delta$ Рентабельность (%)
Зима	Полная загрузка	6	3	4
Лето	Ограниченное	4	2	3

Источник: составлено автором

Автор подготовил базовый и адаптивный сценарии работы энергоблоков, в базовом сценарии КИУМ равен 28% (2600 МВт·ч в год), в адаптивном – 31% (2900 МВт·ч в год), вследствие чего выработка увеличивается на 11,5%.

Сравнение результатов создания двух вариантов функционирования блоков на ветряной станции – адаптивного и исходного – показало наличие резервов для увеличения объёма и повышения производительности генерации электрической энергии за счёт внедрения адаптивных алгоритмов управления мощностью. Исходный вариант предусматривает эксплуатацию ветряных агрегатов в привычном режиме, при котором сезонные флуктуации ветровых параметров игнорируются. Показатель загрузки номинальной мощности достигает 28%, суммарная годовая выработка равна 2600 МВт·ч. Сценарий адаптации режимов, предполагающий регулярную переналадку рабочих параметров с учётом сезонного

поведения воздушных масс, приводит к увеличению значения КИУМ до 31%; годовой объём генерации равен 2900 МВт·ч. Прирост электроэнергии по отношению к базовому варианту фиксируется на уровне 11,5% – данный запас обеспечивает возможность увеличения экономической отдачи проекта без привлечения дополнительных капитальных вложений в оборудование. Исследование сезонных вариаций ветрового режима в Ростовской и Иссykk-Кульской областях показало, что выработка мощности должна осуществляться по разным режимам в каждом сезоне. В холодный период средняя ветровая скорость превышает среднегодовой уровень на 15-20%, а в тёплый период она снижается в районе 10-15%. Предлагаемый режим эксплуатации предполагает работу на полной мощности с максимальной загрузкой ветроэнергетических установок в зимний период и частичное ограничение мощности в летний период с целью поддержания заданного КИУМ и недопущения перегрузок. Экономический эффект введения сезонных режимов проявляется в росте среднегодовой выработки на 4-6% и увеличении коэффициента использования установленной мощности на 2-3 процентных пункта.

На основе сезонной оценки ветровой активности в Ростовской и Иссykk-Кульской областях установлено. В зимний период (декабрь–март) скорость ветра увеличивается на 15–20% относительно среднегодового. В летние месяцы скорость ветра снижается на 10–15%. Предлагаемая схема эксплуатации, зимой – работа на полной мощности с максимальной загрузкой ВЭУ. Летом – частичное ограничение мощности для поддержания подходящего уровня КИУМ и предотвращения перегрузок. Экономический эффект (приложение 2). Введение сезонных режимов повышает среднегодовую выработку на 4–6%. Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) увеличивается на 2–3 процентных пункта.

Приращение генерации в объёме 11,5 % приводит к увеличению NPV в ходе программ по внедрению ВИЭ на 12 %. Сценарий с адаптивной логикой, оптимизируя режимы эксплуатации, даёт инициативам по возведению ВИЭ-установок до 11,5 % дополнительной экономической отдачи. Регулирование мощностных режимов по сезонам у ВЭУ увеличивает объём генерации,

способствует росту КИУМ и укрепляет рентабельность проектов, связанных с ВИЭ.

Автор создал вычислительную модель для количественной оценки выгод размещения ВЭУ в пределах местной энергосети; модель опирается на параметры относительной выработки электроэнергии и на показатели покрытия дефицита.

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

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

Результаты численных расчетов представлены в сводной таблице 26.

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

Спектральное разложение данных о скоростях ветра показало, что режим функционирования ВЭС можно подстраивать под сезонные пики нагрузки. Авторы изучили расчеты и результаты обработки мониторинга скоростей ветра по исследованным регионам и на основе полученных данных предложили практические рекомендации. Для повышения прибыли нужно скорректировать режимы эксплуатации мощности ВЭС АО «НоваВинд» в зимний период, когда

скорости воздушных потоков достигают максимума. В Ростовской области целесообразно развернуть парк ВЭУ с наибольшим диаметром рабочего колеса турбины – при таком решении выработка электроэнергии возрастет, при учёте характерной теплофикационной электрической мощности, вырабатываемой турбоагрегатами ТЭЦ. В Иссyk-Кульской области целесообразно ввести в эксплуатацию ВЭС, способные развивать номинальную мощность при относительно невысоких скоростях воздушных потоков.

Сооружаемая ВЭС в Ростовской области создает надежную основу для стабильной выработки электроэнергии; напротив, инициатива в Иссyk-Кульской области потребует целенаправленных технических и оперативных мер, чтобы нивелировать дефицит ветровой мощности в зимние месяцы. В совокупности проекты на базе ВИЭ могут покрыть большую долю потребности экономики в выработке электроэнергии, что для Иссyk-Куля критично в холодный период года.

По итогам сопоставимого исследования условий развития ветроэнергетики в Ростовской и Иссyk-Кульской областях выявлены кардинальные различия в наборе факторов, отражающихся на рентабельности и обоснованности внедрения проектов в сфере возобновляемых источников энергии. Для каждого из двух регионов выполнены экономические расчёты, в качестве исходных приняты климатические параметры, технические характеристики ветроэнергетических установок и действующие региональные тарифы на электроэнергию, что позволило численно сопоставить различия в инвестиционной привлекательности проектов. Интегральный индекс, отражающий степень загрузки ветрового генератора, заметно меняется по сезонам и регионам, в Ростовской области зимой он достигает 35%, а летом снижается до 25%. В Иссyk-Кульской области колебания менее выражены – значения находятся в диапазоне 20–24%. Указанные расхождения объясняют сочетание природно-климатических условий – прежде всего усреднённой скорости ветра и величины сезонной амплитуды – и факторов социального и экономического характера; последние влияют на тарифную политику и объём спроса на электрическую энергию. В двух рассматриваемых регионах проекты на основе возобновляемых источников способны обеспечить

большую долю спроса экономики на выработку электроэнергии; для Иссyk-Кульской области ситуация остра ввиду существующей нехватки энергоснабжения. Для Ростовской области предпочтительна сезонно адаптируемая модель управления, нацеленная на увеличение генерации в зимние месяцы; реализация ВЭС в регионе обеспечивает надёжную генерационную базу. В Иссyk-Кульской области, напротив, делают ставку на классическую схему эксплуатации ветроэлектростанций; местный проект предусматривает специальные меры для компенсации снижения ветровой мощности в зимний сезон. При грамотно спроектированных решениях ВЭС способны заметно сократить разрыв между производственными возможностями и потребностями экономики в электроэнергии в указанных регионах.

Создана схема универсального интегрированного решения для систем данных и алгоритмической поддержки, предназначенная для отслеживания базовых экономических индикаторов подразделения Росатом – АО «Новавинд» и рассчитанная на масштабирование для сопоставимых организаций сектора. Для единой корпоративной платформы по управлению данными предложено внедрить модель совместно с набором средств DG/DM («Data Governance» / «Data Management»).

Исследование зафиксировало, при текущей технологической гибкости энергосистем допускается интеграция переменной генерации в годовом исчислении на уровне 25-40%. С инженерной и экономической точек зрения возникает задача объединить объёмы колеблющихся ВИЭ в единую сеть энергоснабжения. Авторы указывают, что при существенно высокой гибкости системы доля ВИЭ может превысить 50% при допуске вынужденных остановок малых объёмов генерации на базе возобновляемых источников<sup>122</sup>.

Интеграция больших объёмов ВИЭ требует трансформации энергосистемы в целом. Данный факт создаёт условия для широкого размещения станций на ВИЭ-

---

<sup>122</sup> 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).

источниках и подключения указанных установок к энергетической сети, что стимулирует развитие зелёной энергетики. Системные издержки, связанные с трансформацией сети, зависят от различных обстоятельств, иногда они достигают высоких величин при единовременном подключении новой ВЭС к сети; при поэтапном вводе в сеть новых энергообъектов рост расходов принимает нулевое или даже отрицательное значение. Системные издержки влияют на себестоимость единицы произведённой электроэнергии.

В исследовании воспользовались вейвлет-преобразованием для обработки данных по регионам с целью выявления скрытых закономерностей изменения скорости ветра и оценки влияния обнаруженных зависимостей на КИУМ ВЭС. Вейвлет-преобразование позволило обнаружить скрытые закономерности ветровой активности и периоды повышенной ветровой нагрузки (январь-март) и пониженной скорости ветра (июль-сентябрь). Установлено, что зимние пики скорости ветра составляют до 30% годовой выработки электроэнергии.

Внедрение цифровых технологий в компаниях топливно-энергетического комплекса ускоряет переход отрасли к стабильному и экологически взвешенному росту. Одновременно такое внедрение расширяет технологические возможности России в международном технологическом сотрудничестве и повышает её узнаваемость на глобальном уровне.

Цифровые модели обеспечивают снижение расходов на аппаратную часть и инфраструктурные издержки, рост главных производственных метрик и возможность моделировать варианты работы при колебаниях внешних факторов. В роли ускорителя перехода к цифровому укладу в электроэнергетике выступают цифровые двойники, открывающие путь к переводу электроэнергетической системы на новую технологическую платформу – интеллектуальную электроэнергетическую систему с активно-адаптивной сетью. В вопросах инвестирования, корректировки объёмов производства или выведения на рынок новых продуктов и услуг цифровые технологии улучшают качество управления, предоставляя инструменты для снижения рисков и подбора подходящих решений.

### 2.3. Оптимизация работы ВЭС на основе алгоритмического анализа

Научные программы в сфере возобновляемых источников энергии в эпоху 21 века ориентированы на создание работоспособных методов эксплуатации неиссякаемых и экологически безопасных ресурсов с целью достижения нулевого уровня выбросов. Растёт роль финансовых параметров, главными показателями выступают отдача от деятельности ВЭС и величина затрат на производство одного условного объёма выработанной энергии. В масштабах национального хозяйства экономическая значимость энергетического комплекса занимает одно из ведущих мест – изделия, выпускаемые сектором, служат базой для промышленных производственных циклов.

Сегодня экономический фактор в большой мере задаёт направление развития сектора энергоснабжения на территории России; для оценки работы ВЭС главным показателем служит себестоимость вырабатываемой электроэнергии. Материалы Росстата (2024) приводят сведения об изменении средних цен на 1 МВт электроэнергии<sup>123</sup>, подготовленные без разграничения по источникам генерации; соответствующие показатели для производителя и потребителя приведены 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)  
(на конец года; рублей за единицу измерения)

	2020	2021	2022	2023
Электроэнергия, отпущенная различным категориям потребителей, за тыс. кВт·ч	3924	4041	4243	4572

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

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

<sup>123</sup> Цены в России – 2024 [Электронный ресурс] // Росстат: [сайт]. – Режим доступа: [http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Cena\\_2024.pdf](http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Cena_2024.pdf) (дата обращения: 18.06.2025).

	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

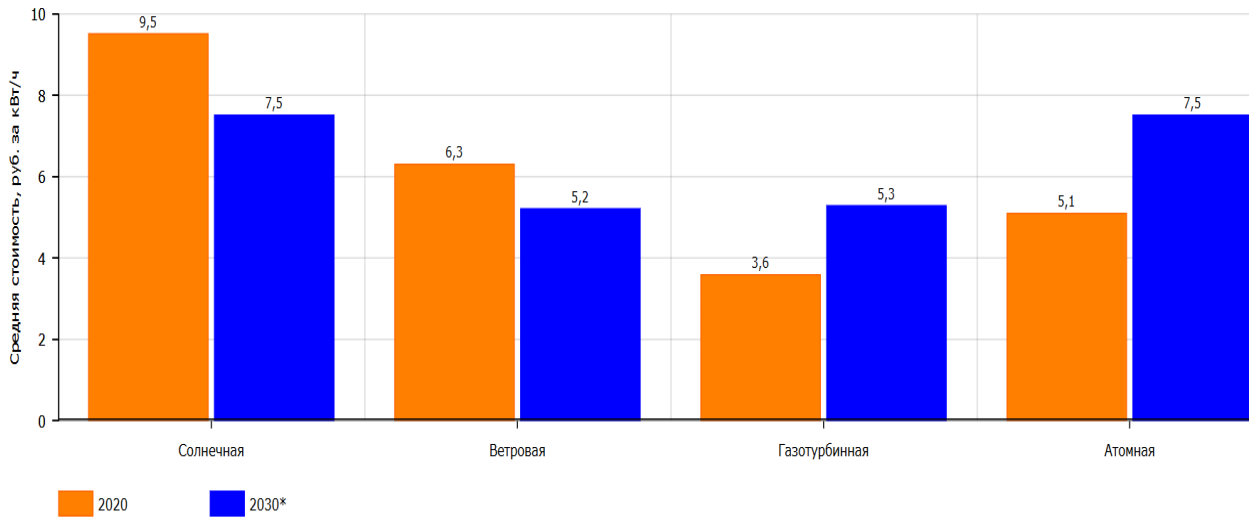


Рисунок 24. Себестоимость производимой электроэнергии

Источник: Средняя стоимость электроэнергии в России, по типам энергоустановок.

<https://topic.ru/statistics/energy/energy/srednyaya-stoimost-elektroenergii-v-rossii-po-tipam-energoustanovok/>

За главный критерий оценки функционирования ВЭС принимают расход на одну единицу выработанной энергии при генерации на базе ископаемых энергоносителей и при работе ВИЭ. Оценки данного показателя различаются; в целом данный показатель рассматривают как комплексный критерий эффективности. В каждом конкретном проекте такой критерий составляют из набора отдельных показателей. Среди них главными являются инвестиционные и операционные затраты. Инвестиционные затраты (капитальные вложения, инвестиции) направляют на создание объекта. Как правило, большая часть вложений идёт на приобретение оборудования, возведение зданий и сооружений, покупку земельного участка и обустройство инфраструктуры. Операционные затраты (текущие затраты, эксплуатационные затраты) связаны с производственным циклом, в рассматриваемом случае они относятся к выработке

электроэнергии на действующей электростанции. Под операционными расходами понимают затраты на сырьё, материалы и комплектующие для производства, оплату труда персонала и различные сопутствующие платежи.

Классификация эксплуатационных расходов представлена двумя категориями. 2.1. Расходы постоянного характера – суммы, не зависящие от масштаба выпуска продукции; подобные обязательные платежи остаются актуальными в том числе в случае полного прекращения производства. 2.2. Расходы переменного характера – суммы, величина сумм варьирует вместе с объёмом выпуска, при расширении производства суммы увеличиваются, при сокращении выпуска – уменьшаются.

В составе постоянных затрат присутствуют расходы на оплату труда управленческого персонала, обслуживание оборудования, охрану и меры безопасности предприятия. К переменным затратам относятся в первую очередь сырьё, материалы и комплектующие для производства продукции, плюс большая доля расходов на оплату труда производственного персонала. Главное и достаточно очевидное различие в структуре затрат между станциями на ископаемом сырьё и станциями на ВИЭ состоит в том, что в первом случае переменные затраты высоки, во втором – практически отсутствуют.

Большая часть затрат при эксплуатации станций, использующих ископаемое сырьё, приходится на энергоносители, газ, нефть, уголь, ядерное топливо. Цена топлива достигает 80 % и более от общих операционных затрат предприятия; при изменении конъюнктуры рынка энергоносителей стоимость претерпевает резкие колебания. Для возобновляемых источников энергии (за исключением станций, работающих на биоресурсах) первичное сырьё – воздух (ветер), солнечная энергия, текущая вода, приливные волны, геотермальная энергия и т.д.; такие источники практически бесплатны или рассматриваются как «условно бесплатные».

Сегодня указанное обстоятельство выступает главным источником экономической выгоды для ВИЭ и служит основанием для вывода о превосходстве экономической результативности ВИЭ на длительном горизонте.

Наряду с преимуществами имеются и недостатки, связанные прежде всего с природой самого энергоносителя – малой плотностью энергии на единицу площади и недостаточной стабильностью. Интенсивность солнечного освещения резко колеблется в течение суток и сезонов; скорость ветра является непредсказуемой, а речной сток иногда меняется резко и не всегда поддаётся прогнозированию.

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

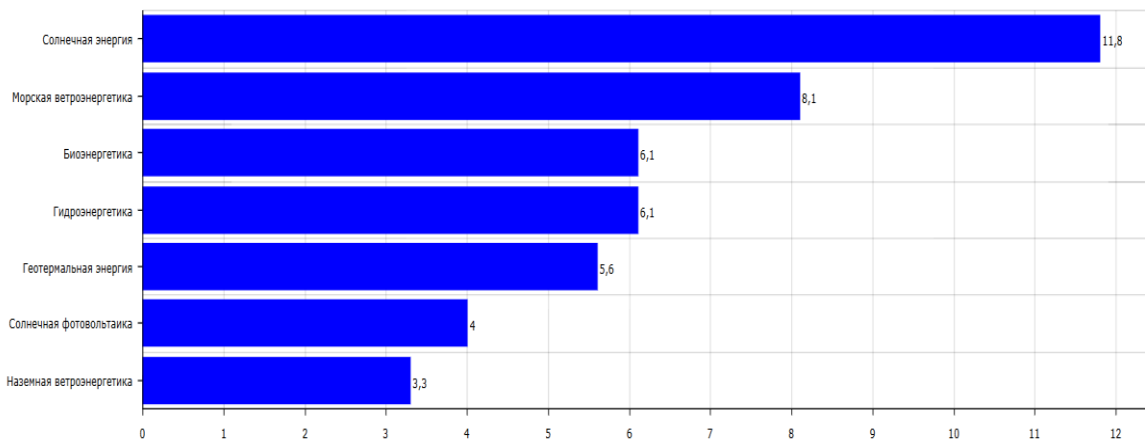


Рисунок 25. Средняя стоимость производства электроэнергии из возобновляемых источников, по видам.

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

По затратам на производство электроэнергии среди возобновляемых способов генерации за 2022 год первенствовали установки концентрированной солнечной генерации – 11,8 цента/кВт·ч; на втором месте оказалась морская ветроэнергетика – 8,1 цента/кВт·ч. Напротив, выработка на наземных ветропарках обходилась значительно дешевле – 3,3 цента за кВт·ч, что приблизительно соответствует 3,0 рубля за киловатт/час в отчётном 2022 периоде. На рис.26 приведён прогноз снижения себестоимости электроэнергии для ВИЭ-источников.

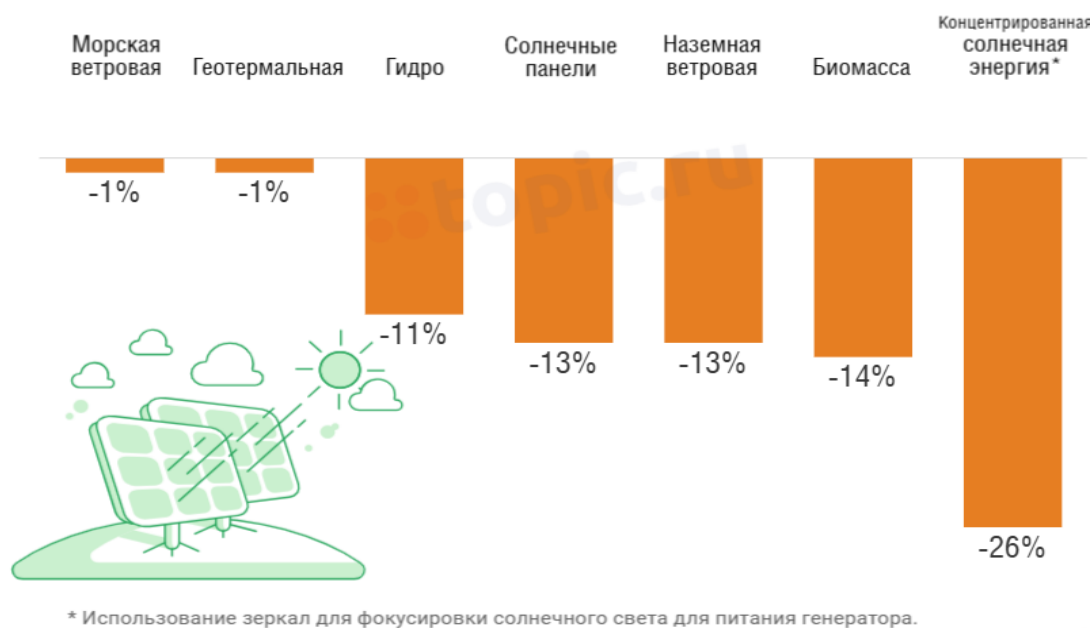


Рисунок 26. Прогноз снижения себестоимости энергии

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

По результатам выполненных расчётов установлено, что затраты на производство электроэнергии при классическом сжигании топлива на тепловых станциях нового строительства, на электростанциях атомного типа и при реконструкции действующих объектов связаны со сроками окупаемости инвестиций, во много раз превышающими эксплуатационный ресурс базового технологического оборудования. В ряде случаев срок окупаемости вложенных средств отсутствует.

В последние годы ввод в эксплуатацию или модернизация генерационных объектов, при которых уровень возврата инвестиций считается удовлетворительным, выполняется лишь при наличии финансового обеспечения со стороны государственной казны в договорах предоставления мощности (ДПМ). Расширение использования источников возобновляемой энергии выдвигает ряд требований по оценке рентабельности работы ВЭС и по выбору целесообразных режимов эксплуатации ВЭС.

Очевидно, что расчет производительности и оценка работы ветроэнергетических установок (ВЭУ)<sup>124</sup> являются этапами при изучении работы и повышении отдачи ВЭС. Работу ветроэлектростанций измеряют по ряду методик и показателей; на результаты влияют многочисленные факторы. Скорость и стабильность ветра имеют значение. Чем быстрее дует ветер, тем больше энергии генерируется. Учет времени года необходим, потому что скорость ветра на разных территориях меняется по сезонам. Плотность и температура воздуха влияют на массовый расход воздуха через турбину и выходную мощность.

На повышенных отметках атмосферный поток усиливается, и опоры большой высоты собирают больше энергии ветра. Увеличение диаметра рабочего круга лопастей расширяет область взаимодействия с ветром, что повышает объём захваченной энергии и выработку электричества. Расположение машин внутри ветропарков влияет на суммарную отдачу и надёжность; поэтому агрегаты необходимо держать в исправном состоянии, а обслуживание проводить по плану и регулярно.

Для оценки эффективности ветроэнергетики используют несколько подходов. Один подход – обработка данных о ветровых параметрах, рассчитывают усреднённую величину ветровой скорости, анализируют её колебания в масштабе суток, месяца и года, фиксируют верхние и нижние границы показателей<sup>125</sup>. Используют методы наилучшей регулировки работы турбин, позволяющие адаптировать режим эксплуатации к переменным ветровым условиям, например путём коррекции угла установки лопастей и изменения частоты вращения ротора<sup>126</sup>. Наконец, комплексные системы мониторинга с диагностическими функциями

---

<sup>124</sup> Ветроэнергетическая установка (ВЭУ) // Neftegaz.RU. [Электронный ресурс]. 16.05.2013. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/elektrostantsii/141961-vetroenergeticheskaya-ustanovka-veu/> (дата обращения: 21.12.2025).

<sup>125</sup> ГОСТ Р 54418.12.3–2012. Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 12-3. Методы испытаний для определения количества вырабатываемой электроэнергии. — М.: Стандартинформ, 2014. — 6 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293775/4293775405.pdf> (дата обращения: 21.12.2025).

<sup>126</sup> Способы повышения эффективности работы ветроэнергетических установок // ElectricalSchool.info. [Электронный ресурс]. URL: <https://electricalschool.info/wind/2853-povysheniye-effektivnosti-vetroenergeticheskikh-ustanovok.html> (дата обращения: 21.12.2025).

служат для обнаружения и оперативного устранения неисправностей, что повышает надёжность эксплуатации ветроустановок.

Рассмотрим главные параметры эксплуатации, влияющие в большей мере на эффективность функционирования ВЭС.

Выходная мощность турбины служит базовым индикатором эффективности ВЭС<sup>127</sup>. Расчёт величины проводится на основе анализа ветровой скорости с использованием профильных метеоданных и численного моделирования. По значениям ветровой скорости вычисляют запас энергии, доступный для извлечения конкретной установкой. В соответствии с ГОСТ Р 51237–98, все ВЭУ распределены по 4 классам мощности. На разброс выработки в полевых условиях влияют изменчивость ветра, турбулентность и локальные особенности рельефа; вследствие перечисленного возникают заметные колебания. Для корректной оценки фактической отдачи используют коэффициент использования установленной мощности, отражающий реальный уровень выработки.

Второе по значимости измерение работы – коэффициент заполнения; он показывает, насколько полно установка использует доступный ресурс ветра. На величину коэффициента влияют конструктивные решения и технические параметры установки. Рост показателя приводит к увеличению общей эффективности работы установки.

При эксплуатации ВЭС собирают актуальные данные о каждом ветрогенераторе. Для этого задействованы сети датчиков, связанные между собой и с центром управления. Ветрогенераторы оснащены большим числом датчиков, объединённых в единую сеть ветропарка; данное решение подтверждает эффективность промышленного Интернета вещей (IoT) и нейронных сетей.

Предметом нашего исследования станут главные параметры эксплуатации ВЭС, оказывающие первоочередное воздействие на её эксплуатационную производительность.

---

<sup>127</sup> 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).

Мощностной параметр ветроэнергетической установки рассматривают как один из главных показателей эффективности ВЭС. При расчёте мощности изучают скорость ветра, опираясь на специализированные метеорологические данные и математические модели. По известным значениям скорости вычисляют теоретический объём энергии, извлекаемой установкой. В соответствии с требованиями ГОСТ Р 51237–98, все ВЭУ распределены по четырём классам мощности. На практике выходная производительность ВЭС заметно колеблется из-за изменений скорости ветра, турбулентности и особенностей рельефа местности. Из-за перечисленных колебаний при проектировании и оценке вводят коэффициент использования, отражающий фактическую отдачу ветроустановки.

Второй по значимости критерий результативности – коэффициент использования ветровой энергии; он показывает, насколько рационально ветряной агрегат преобразует доступный ресурс ветра. На величину коэффициента влияют конструкция оборудования и технические параметры агрегата. При увеличении значения показателя эксплуатационная отдача агрегата возрастает.

Климат задаёт режим эксплуатации ВЭС, поскольку изменения силы ветра и направления влияют на объём вырабатываемой энергии. Резкие флуктуации воздушного потока или снижение скорости ветра снижают работоспособность установки и уменьшают объём вырабатываемой электроэнергии. Поэтому для стабильной генерации необходим равномерный и предсказуемый ветровой режим.

В число приёмов улучшения выработки ветроэнергетических установок входят численное моделирование и системы контроля эксплуатации. При цифровом прогнозировании вычисляют влияние параметров, описывающих ВЭС, интенсивность ветрового потока, уровень турбулентности, форму лопастей и конструктивные характеристики генератора. Полученные численные сценарии показывают поведение установок в разных условиях и служат основанием для повышения выработки энергии. Контроль фактической эксплуатации осуществляют с помощью специализированных сенсоров и платформ накопления данных; приборы регистрируют параметры в режиме онлайн. Оперативные

сведения позволяют оценивать эффективность работы агрегата, выявлять неисправности и вводить корректирующие мероприятия.

Выбор подходящих материалов. Лёгкие и прочные материалы – например композиты – снижают массу установки и уменьшают нагрузку на подшипники и прочие компоненты. Помимо уменьшения массы, использование таких материалов повышает КПД работы, снижает износ и увеличивает надёжность системы. Совершенствование генераторов и системы передачи энергии. Внедрение новейших технологий в сфере генераторов – например постоянных магнитов или сверхпроводящих материалов – повышает КПД и общую эффективность преобразования кинетической энергии ветра в электричество.

Форма опорных конструкций, в том числе мачт и башен, и высотные характеристики подлежат целенаправленной корректировке для повышения эксплуатационных показателей. Воздушные потоки с повышенной скоростью и стабильностью, характерные для больших высот, требуют внимательного выбора уровня расположения установки. Корректный подбор соотношения между высотой опоры и размерами лопастей заметно повышает производительность установки.

Использование алгоритмов управления, нацеленных на повышение производительности. Алгоритмы адаптируют работу установок под меняющиеся ветровые условия с целью увеличения выработки электроэнергии. Варианты управления предусматривают изменение угла атаки лопастей, регулирование скорости вращения ротора и рациональное задействование режимов работы генератора. Модели прогнозирования в ветроэнергетике.

Научная дисциплина, занимающаяся прогнозированием, использует широкий спектр подходов, число превышает 150, причём предназначенные методики рассчитаны на внедрение в разных государствах и промышленных секторах. В настоящий момент не обнаружена единая методика, пригодная для универсального использования.

Автор данной диссертационной работы<sup>128</sup> входил в состав команды научных сотрудников; команда выполнила комплексный обзор международных и российских подходов к моделированию мощности ветрового потока. Исследование показало, что был собран набор различных методик предсказания ветрового режима, различавшихся по охвату временных периодов и по выбранным методам исследования.

По временным параметрам прогнозы ветра разделяют на 3 категории, краткосрочное прогнозирование – до 8 часов, среднесрочное прогнозирование – до 24 часов и долгосрочное прогнозирование – на несколько дней.

В секторе ветроэнергетики используют прогнозные методики, основанные на сочетании численных метеорологических расчётов и полевых измерений, служащих исходными данными для моделей. Лишь подобные решения дают показатель погрешности, приемлемый для практики, на горизонте 24 – 48 часов и позволяют осуществить внедрение в государствах Европы.

Исследователи европейских моделей прогнозирования Юсупов К. И. и Тажибоев С. Т. представили описание зарубежных моделей прогнозирования ветра и разбор диапазона ошибок<sup>129</sup> (табл.29).

Таблица 29. Модель прогнозирования в ветроэнергетике в странах Европы

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

<sup>128</sup> 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.

<sup>129</sup> Юсупов, К. И. Обзор методов прогнозирования в ветроэнергетике / К. И. Юсупов, С. Т. Тажибоев // Сантехника, отопление, кондиционеры. – 2022. – № 12 (252). – С. 70–73.

Для анализа данной проблемы целесообразно опираться на прогнозные модели, созданные Управлением по энергоэффективности и возобновляемым источникам энергии США (Office of Energy efficiency and renewable energy). Подходы собраны и систематизированы в документе «Руководство по экономическому развитию наземной ветроэнергетики». В руководстве в таблице 30 приведены методики расчёта экономических последствий и итогов внедрения ветроэнергетики (таблица 30).

Перед началом рассмотрения отечественных алгоритмов прогноза мощности ветровых установок необходимо внести принципиальное уточнение. На горизонте многих лет сектор ветроэнергетики России претерпит изменения под влиянием трансформаций государственной энергетической стратегии и внедрения передовых технических решений.

Аналитики Института энергетических исследований РАН подготовили Прогноз развития энергетики в России и за рубежом до 2050 года. Прогноз содержит вывод о том, что для подавляющей части энергосистем во многих государствах более вероятным сценарием является взаимное дополнение возобновляемых источников энергии и ископаемых топлив, чем функционирование возобновляемых источников энергии и ископаемых топлив в условиях прямой конкуренции.

Таблица 30. Модели для расчета экономического эффекта ветроэнергетики

Наименование	Применение	Суть	Результат
Модель воздействия на рабочие места и экономическое развитие Jobs and Economic Development Impact (JEDI)	Инструмент для оценки экономических последствий энергетических проектов. Ветроэнергетические модели описывают три типа ветра, распределённый ветер, ветер коммунального масштаба и морской ветер. Используя введённые пользователем данные о проекте или стандартные вводные (полученные из отраслевых норм), JEDI рассчитывает число рабочих мест и	Оценка выделяет 3 направления, численность занятых, объёмы выпуска и доходы. Первое направление касается подготовки проекта и изменений в трудовых ресурсах на площадке; в него входят непосредственные исполнители, в частности техники. Второе направлено на местные поступления и логистические цепочки; сюда входят комплектующие, персонал и оборудование, задействованные в создании стоимости. Примеры – изготовители лезвий,	Значения по умолчанию модели JEDI получены посредством интервью с отраслевыми экспертами и лицами, реализующими проекты. Экономические мультипликаторы в модели получены из бухгалтерского программного обеспечения IMPLAN Minnesota IMPLAN Group и из файлов государственных данных.

	экономические эффекты для местной территории; полученные оценки показывают, какое количество рабочих мест и какой вклад в экономику способно обеспечить электростанция или предприятие по производству топлива.	сталевары и бухгалтеры. Третье направление объединяет индуцированные эффекты – последствия расходов, возникающих при воплощении проекта, и отражение расходов в экономике района.	
Модель системного советника System Advisor (SAM)	Модель производительности и финансов, созданная для облегчения принятия решений людьми, работающими в сфере возобновляемой энергии, руководителями проектов и инженерами, авторами программ стимулирования, создателями технологий и исследователями. SAM прогнозирует выработку для ветровых и прочих возобновляемых источников энергии, в том числе сетевых солнечных фотоэлектрических систем, концентрированной солнечной энергии, биомассы и геотермальных установок.	Инструменты оценки притока и оттока средств применимы к децентрализованным энергетическим инициативам, осуществляющим розничные закупки и продажу электрической энергии; они пригодны для генерационных проектов, реализующих продукцию с оплатой по ставке, зафиксированной в договоре купли-продажи электроэнергии. Модель рассчитывает себестоимость выработки электрической энергии на основе сведений о географической привязке объекта, капитальных и эксплуатационных затратах, схеме финансирования, действующих налоговых преференциях и стимулирующих мерах и данных об инженерно-технических параметрах установки.	В перечень итогов SAM входят: Нормированная стоимость энергии Для масштабных коммунальных проектов центральными финансовыми метриками являются тариф на приобретаемую электроэнергию, коэффициент внутренней доходности и ряд сопутствующих экономических ориентиров. Установление адекватных значений для каждого параметра необходимо для обоснования проекта и принятия инвестиционных решений. Срок окупаемости и чистая приведенная стоимость для жилых и коммерческих проектов Прогнозы средних значений производительности системы по часам, месяцам и годам; оценки чистой выработки электроэнергии и показателей работы компонентов. Годовая таблица движения денежных средств с подробностями затрат Визуальные диаграммы, позволяющие гибко настраивать параметры отображения.
Модель для малых ветроэнергетических установок Small Wind Economic Model	Инструмент для работы с электронными таблицами.	Инструмент оценки рабочих показателей и рентабельности намеченных проектов с участием распределённых ветрогенераторов; приоритет отдан исследованию	Предложенный инструмент предназначен для финансовой оценки целесообразности использования арендных и лизинговых схем при приобретении технических средств.

		сертифицированных бытовых турбин.	
Инструмент расчёта стоимости возобновляемой энергии	Система оценки затрат проектов в области возобновляемой энергетики опирается на финансовую проекцию движения средств.	Материал рассчитан на три группы получателей, лица, готовящие политические инициативы; органы, осуществляющие регламентацию; и профессиональные объединения, действующие в области возобновляемой энергетики.	Инструмент позволяет оценивать экономические показатели проекта, создавать стимулы на основе затрат (например, фиксированные тарифы) и оценивать воздействие 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"

По мнению Алиходжина Н. В., Тягунов М. Г., Шестопалова Т. А.<sup>130</sup>, действующие методики уточнения расчетных процедур в сфере ветровой энергетики и методы построения моделей для предсказания базовых характеристик воздушного потока на месте размещения ВЭС пока недостаточно проработаны. В ответ на выявленные пробелы авторы предложили оригинальную типологию подходов к прогнозированию базовых показателей 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 и т.п. Точны для долгосрочного прогнозирования
Статистические	Временные ряды	Необходима большая выборка исходных данных. Высокая точность для краткосрочного прогнозирования.
Интеллектуальные	Искусственные нейронные сети	Тренировка искусственных нейронных сетей существенно повышает точность прогноза. Нейронные сети позволяют использовать большое количество входных параметров. Высокая точность для краткосрочного прогнозирования.
Гибридные	ANFIS и др.	ANFIS показывает хорошую точность при краткосрочном прогнозировании. Есть

<sup>130</sup> 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.

		возможность увидеть взаимосвязь между параметрами модели.
--	--	---

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

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

Проведенное Алиходжиной Н.В., Тягуновым М.Г., Шестопаловой Т.А. исследование выявило следующее. Модели для ветроэнергетических расчетов среднегодовых и среднемесячных значений скорости ветра показывают приемлемые погрешности, удобны в использовании и подходят для условий России. Для расчетов на часовые интервалы не выработана единая методология создания и построения моделей. Действующие варианты годятся лишь для места расположения конкретной ВЭС; каждая модель создавалась под определённую установку. Проблема пригодности созданных моделей получает недостаточное внимание. В частности, созданные решения базируются на зарубежных исследованиях и накопленных материалах с целью адаптации к условиям России.

На российском рынке ветровой энергетики по-прежнему задействуют зарубежные программные решения при оценке пригодности участков для установки ВЭС; те же программные комплексы служат для моделирования главных параметров ветра, что является базой для выработки режима эксплуатации ВЭС.

После детального изучения проблемы российские исследователи установили следующие факты. Модели, созданные для метеорологии и авиации, не подходят для задач ветроэнергетики. Параметры атмосферы нельзя измерить непосредственно на местах установки ВЭУ, поэтому использование приведённых моделей затруднено. Модели вертикального профиля ветра дают корректные результаты лишь при входных условиях, соответствующих исходным предпосылкам моделей. При переносе в другую географическую точку упомянутые модели выдают недостоверные данные, что снижает качество рассчитанных параметров и приводит к ошибкам при выборе площадки ВЭС и при оценке её эффективности.

Оценочные алгоритмы для краткосрочных параметров ветрового режима используют регрессионные подходы и вероятностную обработку данных; реализация посредством нейросетевых решений встречается всё шире. В российских публикациях по ветроэнергетике редко встречаются работы, посвящённые отраслевым расчётам, особенностям и проблемам отрасли и перспективам развития. Количество отечественных научных статей по прогнозам параметров ветра невелико. Имеющиеся публикации в основном ссылаются на зарубежные источники. Создание самостоятельной научной школы по ветроэнергетике в России ещё не завершено.

Исследование подходов к прогнозированию мощности ветровых установок показало, что модели, ориентированные на расчёт усреднённых годовых и месячных показателей ветрового режима, дают надёжные прогнозы, просты в эксплуатации и соответствуют климатическим особенностям России. При почасовой детализации отсутствует единая методика ни для создания, ни для построения данных моделей. Большинство решений сохраняют работоспособность лишь на определённой ВЭС, где проводилась настройка под местные условия. Вопрос о возможности использования решений на других площадках изучен слабо, а оценка переносимости проводится в ограниченном объёме.

В России при выборе площадок для ВЭС и при оценке главных параметров ветра, нужных для выработки режимов эксплуатации ВЭС, преимущественно используют программные продукты иностранного происхождения. В ходе исследования были выявлены несколько главных положений. Методики, созданные для метеорологических и авиационных задач, в целом не подходят для прикладных потребностей ветроэнергетики. Описания вертикального распределения ветрового поля корректно функционируют лишь в тех метеоусловиях, на базе расчётов для данных условий. Прогностические алгоритмы для коротких временных горизонтов, задающие базовые параметры ветра, опираются на статистические и регрессионные подходы; реализация указанных алгоритмов в последнее время осуществляется с помощью нейросетевых технологий.

Работа Зубакин В.А. содержит расширение прежней системы классификации подходов к прогнозированию и вводит уточнённую схему для оценки выработки ВЭС. К одной из выделенных групп относятся приёмы физического характера. Другая выделенная категория объединяет статистические приёмы анализа.

К числу самых результативных подходов относят синтез вероятностных моделей и алгоритмов машинного обучения, используемых вместе с числовым прогнозированием погоды и изучением рельефа территории.

Объект исследования – ветрогенератор, размещённый в Российской Федерации; моделирование проводил учёный-экономист Зубакиным В. А. При построении модели использовали параметры, извлечённые из SCADA, с 10-минутным и 60-минутным временным разрешением. Входную матрицу составили на базе записей ветровой скорости за предшествующий период. Погрешность предсказаний оценивали для горизонтов 1, 2, 3, 4, 5 и 6 часов. Результаты расчётов прогнозов 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
Скользящая средняя	6,2	11,1	17,4	20,5	25,2	27,2

Источник: составлено автором

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
Скользящая средняя	0,52	1,05	1,36	1,43	1,93	2,05

Источник: составлено автором

Рекуррентная нейросеть с архитектурой LSTM показала лучший показатель качества предсказаний по сравнению с прочими моделями для горизонта прогнозирования на 5–6 часов. По мнению исследователя Зубакина В.А., опора только на временной ряд скорости ветра не обеспечивает высокого качества прогноза скорости ветра.

На протяжении нескольких десятилетий происходит активная интеграция систем на базе искусственно созданного интеллекта. Решения объединяют комплексные многопараметрические входные показатели и характеристики иных алгоритмов прогнозирования. Среди применяемых подходов выделяют искусственные нейронные сети, групповые методы обработки данных и метод опорных векторов. Поскольку модель даёт предсказания с низкой погрешностью, можно с высокой вероятностью утверждать, что будущее принадлежит прогностическим моделям, опирающимся на интеллектуальные системы.

Исследователями Мокшиным М. Ю. и Путиловым А. В. (см. п.2.2.) предложена алгоритмическая модель прогнозирования развития отечественной энергетики с использованием технологии форсайт-проектирования. В модели применены принципы системного, комплексного, междисциплинарного и рискованного подходов. Авторы предложили форсайт-методику, опирающуюся на системное исследование и оценку текущего состояния и возможностей ветровой энергетики РФ; выполнена статистическая обработка данных по производству ветровых установок, метеорологических и экономических показателей.

Исследователи выявили зависимость величины экономических показателей российской промышленности от нелинейных изменений энергетических трендов и предложили результативный комплексно-сопряжённый подход для прогнозирования упомянутых тенденций. Подход основан на комплексной экономико-технологической модели, сопряжённой с базой данных климатических изменений.

Системы автоматизированного проектирования (САПР) уже являются неотъемлемой частью процесса проектирования ВЭС. Использование автоматизированных средств проектирования ВЭС сокращает время на создание проектов и снижает вероятность ошибок, связанных с традиционным ручным вводом параметров. Цифровые копии ветрогенерирующих установок позволяют адаптировать алгоритмы управления к текущим условиям эксплуатации и повысить качество прогнозов.

При практическом подборе и оценке результативности разнотипных моделей необходимо учитывать особенности проекта. Необходимо учитывать природно-географические характеристики площадки, временные рамки реализации и экономические показатели проекта. В качестве дополнительного критерия используется оценка перспектив проекта с точки зрения соответствия целям «зеленой» энергетики.

В России не выработаны общие принципы для описания характерных свойств ветрового режима на площадке, предназначенной для возведения ВЭС. Одновременно отсутствуют унифицированные методики, позволяющие давать надёжные прогнозы показателей ветра для краткосрочных и среднесрочных горизонтов.

Одно из перспективных направлений развития российской ветроэнергетики – создание многомодульных ветроэлектрических станций, состоящих из 100 и более небольших ветроколес диаметром до 2 метров. Мультимодульная ветроэлектростанция (ВЭС) – ветроэлектростанция, представляющая систему однотипных транспортабельных модулей небольшой мощности; конструкция и функционал модулей совпадают, управление выполняет единая система управления. Модульный принцип построения ВЭС (рис.27) позволяет путем увеличения количества модулей получить заданную мощность и повысить надежность и ремонтпригодность при транспортировке, монтаже и эксплуатации.

Каждый модуль мультимодульной ветроэлектростанции состоит из, ветроколеса, установленного на неподвижном валу и расположенного в роторе электрического генератора; электротехнического комплекса, в состав которого



электромеханический механизм, который управляет положением ротора ветроколеса. Когда скорость ветра находится в низком или среднем диапазоне, стабилизация выходного напряжения достигается посредством частотного преобразователя, выполненного на базе инвертора тока.

Для эксплуатации ВЭС необходим сбор актуальных данных о каждом ветрогенераторе. Задача решается с помощью сетей датчиков, связанных между собой и с центром управления. Ветрогенераторы оснащены множеством датчиков, объединённых в единую сеть ветропарка; промышленный Интернет вещей (IoT) и нейронные сети улучшают надёжность и работу ветряных установок.

В пределах РФ выделены территории, где скорость ветра достаточна для выработки электроэнергии на ВЭС. Благодаря реализации государственной программы поддержки возобновляемых источников энергии в России создано и введено в эксплуатацию 9 ветропарков АО «Новавинд» Росатома; объекты расположены в объединенной энергосистеме Юга – в Адыгее, Ставропольском крае и Ростовской области. Суммарная мощность указанных установок находится на уровне, сопоставимом с выходной мощностью одного энергоблока реактора ВВЭР-1000. Стоит подчеркнуть, что средняя генерация электроэнергии ветроэнергетическими комплексами уступает атомным электростанциям из-за зависимости от метеоусловий. Повышение выработки в холодный период объясняется усилением ветровых потоков. По итогам 2023 года средневзвешенный коэффициент использования мощности (КИУМ, показатель загрузки объекта) составил порядка 29%<sup>132</sup>.

Для повышения мощности ветровых установок и, соответственно, объёмов генерируемой электроэнергии применяют разные методы. Численные модели используются повсеместно. При расчётах вычислительные инструменты учитывают ряд параметров, величину ветрового потока, уровень турбулентности, форму и профиль лопастей, конструктивные особенности генераторной части. На основе подобных моделей аналитики прогнозируют поведение установок в

---

<sup>132</sup> Первый зеленый гигаватт [Электронный ресурс] // Коммерсант: [сайт]. – 2023. – 23 нояб. – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/6350608> (дата обращения: 23.05.2024)

различных климатических условиях и вырабатывают рекомендации по повышению эффективности установок.

Другой подход – измерение и мониторинг фактической работы ветроэнергетических установок, выполняющий широкий набор функций. С помощью специальных датчиков и систем сбора данных получают сведения о работе установки в реальном времени. Полученные сведения дают возможность оценивать работу установки, выявлять проблемы и вводить меры для повышения надёжности и качества её работы.

Опираясь на расчётные модели и эмпирические наблюдения, проводят тонкую подгонку рабочих параметров ВЭУ. Примерами служат угловое положение лопастей, режим оборотов ротора и конфигурация управляющего контура. Выполненная настройка даёт требуемую мощность и улучшает эксплуатационные показатели установки при переменном ветре.

NPV представляет собой приведённую к настоящему моменту суммарную оценку прогнозируемых денежных поступлений и выплат проекта. Критерий приемлемости инвестиции формулируется как требование неотрицательности NPV (0 и более). При прочих равных обстоятельствах возрастание величины NPV указывает на повышенную инвестиционную привлекательность проекта.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B - C}{(1+r)^t} \quad (16),$$

где  $B$  — выгода,  $C$  — стоимость,  $n$  — период и  $r$  — ставка дисконтирования.

$$\sum_{t=1}^n \frac{C}{(1+r)^t} = \sum_{t=1}^n \frac{B}{(1+IRR)^t} \quad (17)$$

— это значение номинальной скидки, для которой значение NPV становится равным нулю.

Интервал возврата совокупных вложений за счёт полученной прибыли называют сроком возмещения капитала. Ниже указана формула для вычисления показателя:

$$Pt = T - 1 + \left| \sum_{t=1}^{T-1} T - 1i = 1 (B - C) \right| (B - C)T, \quad (18),$$

$pt$  – срок окупаемости вложений в ветроэлектростанцию; вложенные средства возвращаются в полном объёме.  $T$  – год; в данном году накопленная прибыль впервые достигает нулевой отметки или принимает положительное значение.

Практический опыт показал, что специфические условия расчётов ветровой энергетики и степень доверия к полевым данным сильно осложняют перенос зарубежных подходов. Из-за этого большинство подобных методик оказывается неприменимым для эксплуатации ветроэлектростанций в Российской Федерации.

В последние десятилетия в энергетическую отрасль активно внедряются методы искусственного интеллекта. Они объединяют разнофакторные исходные данные и признаки встроенных моделей прогнозирования; примерами являются искусственные нейронные сети, ансамблевые методы обработки данных и метод опорных векторов. По этой причине с большой долей вероятности можно ожидать, что дальнейшее развитие будет связано с моделями прогнозирования на основе искусственного интеллекта.

Внедрение передовых цифровых решений создаёт условия для создания средств управления, нацеленных на сбалансированное развитие промышленных сфер и объединений. В числе рассматриваемых направлений – использование ветроэнергетики.

**Влияние сезонных изменений на оптимизацию работы ВЭС.** Выработка электроэнергии изменяется под воздействием климатических и природных факторов, повышение глобальной температуры; колебания объёма осадков; подъёмы уровня моря; изменение интенсивности ветров и направлений воздушных потоков; приливно-отливные циклы; магнитные возмущения, исходящие от Солнца; рост числа штормовых и ураганных явлений; прочие экстремальные природные явления.

При обосновании технических характеристик ветроэнергетических установок (ВЭУ) необходимо зафиксировать, каким образом сооружения вступают во взаимодействие с экосистемой и с населенными территориями. Изучение практики эксплуатации ВЭС выявляет главные источники негативного воздействия, отвод участков земли, шум, помехи электромагнитного характера, затрагивающие телевизионные и радиоканалы, изменение облика местности и восприятия ландшафта, и ущерб флоре и фауне.

Интенсивность и направление ветров, экстремальные атмосферные явления – ураганы на суше и шторма в акваториях – создают внешние динамические нагрузки. Конструкции ВЭС – башни, турбинные агрегаты и опоры – подвергаются нагрузке. При высоких скоростях ветра нагрузка на аэродинамические элементы турбин возрастает, ускоряя износ деталей и повышая вероятность повреждений; возрастание износа вызывает необходимость планового обслуживания и периодической замены узлов, что ведёт к росту эксплуатационных расходов. Порывистые ветры вызывают колебания корпусов и опорных конструкций ветряных установок; вызванные вибрации повышают риск структурных повреждений и снижают надёжность и безопасность работы ВЭС. При рассмотрении проектов по строительству ВЭС в регионах на территории РФ, характеризующихся различными климатическими условиями, влияние перечисленных факторов приобретает практическую актуальность.

Оценивать эффективность каждого варианта ВЭУ необходимо с учётом характеристик конкретного проекта, параметров местности (рис.1), временных интервалов, экономических показателей проекта и перспективности с позиции «зеленой» энергетики. Расчёт и аналитическая оценка производительности ветроэнергетических установок проводятся регулярно. Судя по диаграмме на рис.28, по объёму генерации ветроэнергетики в России лидируют следующие регионы, Волгоградская, Астраханская, Ростовская, Оренбургская области и Ставропольский край.

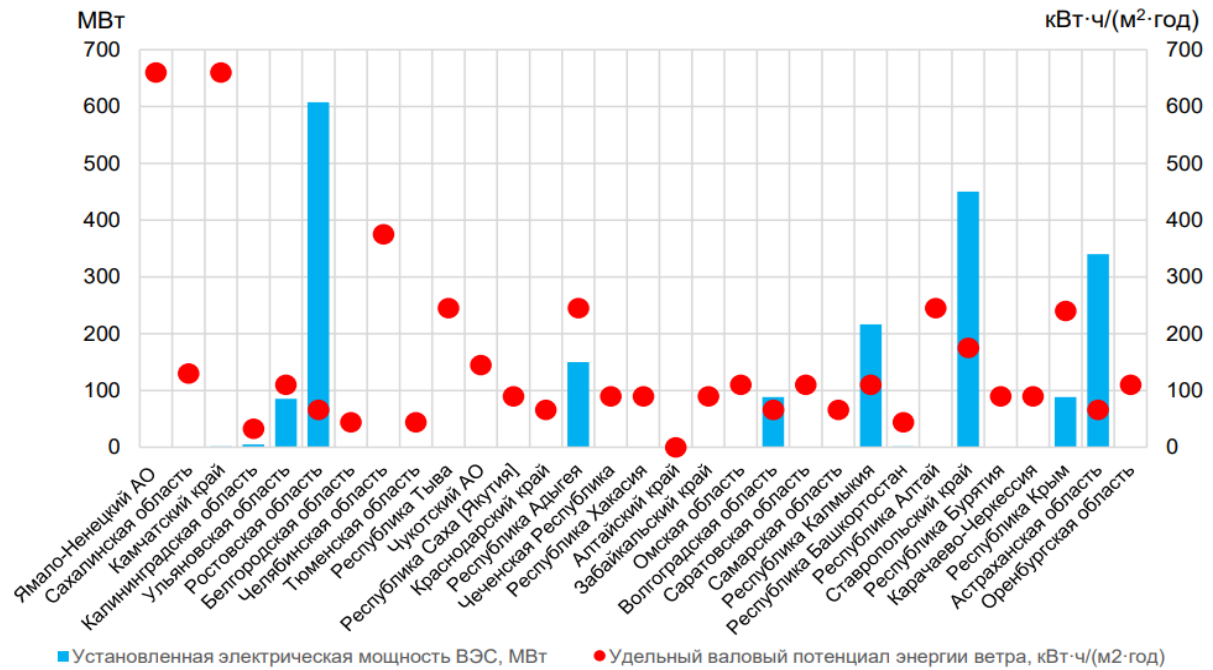


Рисунок 28. Региональное распределение установленной электрической мощности ВЭС по состоянию на 1 января 2022 г. и удельного валового потенциала энергии ветра

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

Одним из отрицательных эффектов интенсивных ветровых потоков является рост вероятности внештатных инцидентов, который, по прогнозам, приведёт к сокращению выработки электроэнергии и к вероятным финансовым убыткам. Пиковые порывы ветра ухудшают стабильность передачи энергии от ВЭС к конечным потребителям. При поступлении в систему электроснабжения большого объёма вырабатываемой мощности возникают перегрузки и резкие колебания напряжения; из-за этого оборудование выходит из строя, а корректная эксплуатация сети нарушается.

В прибрежных зонах фиксируемое усиление ветровой энергии связано с тем, что наземные участки прогреваются быстрее, чем глубокие водные массы, а возникающий температурный градиент подпитывает ветровые потоки. Особняком

выступает Арктика, там преобладает температурный контраст между Арктикой и тропиками, и ускоренное потепление региона сокращает величину контраста.<sup>133</sup>

В реальных условиях эксплуатации ветряных электростанций нередко применяют технические решения, не полностью адаптированные к особенностям конкретного региона, поскольку промышленно изготавливаемое энергетическое оборудование имеет дискретные значения нескольких параметров, а фактические режимы работы могут не совпадать с проектными. Из-за этого необходимо провести дополнительную оценку потерь, возникающих при выработке электроэнергии.<sup>134</sup>

На территории России отсутствуют унифицированные инструменты для определения базовых ветровых параметров в планируемой локации установки ВЭС. К тому же не существуют общепринятые методики, позволяющие прогнозировать указанные параметры ни в краткосрочной, ни в среднесрочной перспективе.

Каждый проект ветроэлектростанции (ВЭС) уникален, поскольку создаваемая установка должна учитывать специфику местного климата и особенности окружающей среды. При планировании энергетических объектов и отдельно ветряных станций необходим подход, рассматривающий сооружение как элемент, объединяющий природные и техногенные составляющие.

Сложность проектирования ВЭС на территории РФ связана с необходимостью решения ряда задач, вызванных вариациями природно-климатических условий. Перспективы развития ветроэнергетики в нашей стране опираются на протяжённые прибрежные полосы морей и океанов и на хорошие ветровые ресурсы; параллельно отсутствует централизованное энергоснабжение. Большая часть территорий, пригодных для использования в ветроэнергетике в

---

<sup>133</sup> 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.polesu.by/bitstream/123456789/30206/1/Vliianie.pdf> (дата обращения: 12.06.2025)

<sup>134</sup> Сидоренко, Г. И. Модель оптимизации параметров ветровой электростанции / Г. И. Сидоренко, А. Алджамил // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). – 2021. – № 1 (82). – С. 35–41.

нашей стране, расположена в зонах вечной мерзлоты, поэтому необходимо создать методику проектирования и возведения ВЭУ с учётом этих особенностей.<sup>135</sup>

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.

Росатом запланировал строительство ветропарка на острове Сахалин до конца 2025 года. Площадка, предназначенная для реализации проекта ВЭС, признана пригодной, на большей части побережья Сахалина среднегодовая скорость ветра составляет 6–8 м/с. В удалённых регионах России отсутствуют

---

<sup>135</sup> 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.

рыночные механизмы окупаемости инвестиций; ни один крупный проект ветрогенерации на основе локализованных ветротурбин не зарегистрирован. Модель окупаемости объекта предполагает привлечение государственно-частного партнёрства с использованием концессий.

Росатома объявила о реализации по масштабу беспрецедентной инициативы, развёртывание ВЭС на арктических территориях, рассчитанное прежде всего на обеспечение энергией местных предприятий. Арктика известна интенсивными ветровыми потоками и затяжным зимним периодом в климате, что создаёт благоприятные условия для ветроэнергетических проектов. В долгосрочной перспективе планируют создание вдоль Северного морского пути специального коридора для развития ВИЭ; коридор намерены назвать «Северный магистральный энергетический путь».

Процесс выбора инвестиционных решений и этапов ввода ВЭС в эксплуатацию затруднён по ряду причин, исходные данные характеризуются высокой степенью неопределённости; прогнозы условий эксплуатации на перспективу нестабильны; параметры поведения и предпочтений потребителей плохо прогнозируются; инфраструктурная поддержка недостаточна; специализированные системы для обоснования решений отсутствуют; работа ВЭС связана с климатическими факторами.

Завершая рассмотрение методических аспектов оптимизации работы ветроэнергетических станций на основе алгоритмической обработки данных, требуется подвести итоги и перечислить главные положения, изложенные в разделе исследования. Изучение эксплуатационных характеристик, оказывающих приоритетное влияние на работу ВЭС, показало, что мощность ветроэнергетической установки служит одним из показателей эффективности, в реальных условиях производительность меняется из-за колебаний скорости ветра, турбулентности и особенностей рельефа местности. Фактор наполнения показывает эффективность использования доступной энергии ветра и зависит от конструкции и технических характеристик установки. Климатические условия, изменения скорости и направления ветра, влияют на выработку электроэнергии.

Среди методов и средств повышения эффективности используются математическое моделирование, измерения и мониторинг реальной работы, подбор материалов, усовершенствование генераторов и систем передачи энергии, регулировка высоты и формы мачт и использование алгоритмов управления для улучшения контроля. Проведённое исследование методов прогнозирования позволило выделить физические и статистические подходы; сочетание статистических моделей с моделями машинного обучения на основе численного прогноза погоды признаётся целесообразным. Использование рекуррентной нейросети с архитектурой LSTM даёт возможность достигать высокой точности прогнозирования на горизонте в пять-шесть часов. Изложенные положения служат теоретико-методической основой для усовершенствования систем управления ветроэнергетическими комплексами в условиях высокой неопределённости исходных данных и под влиянием климатических факторов.

Для успешного ввода мощностей ветроэнергетики требуется развитие методологических, математических и программных средств сопровождения.

## **Выводы по главе 2**

Исследование показало, процессы цифровизации в секторе ветроэнергетики касаются широкого круга направлений развития. Среди главных направлений – создание цифровых двойников энергетических систем; разработка программных комплексов для проектирования ветроустановок; внедрение платформ диспетчерского управления совместно со средствами сбора данных; и развитие интеллектуальных электросетей, ориентированных на повышение эффективности энергоснабжения. Учитывая результаты, целесообразным выглядит систематическое представление положений, изложенных в данной главе. Используемые сегодня системы обработки данных ориентированы прежде всего на выполнение технологических производственных функций; одновременно финансово-организационные потребности компаний требуют внедрения

специализированных сервисов цифровой инфраструктуры. Сопоставление Ростовской и Иссык-Кульской областей как территорий, рассматриваемых для размещения ветроэнергетических объектов, показало заметные различия природно-климатического фона и социально-экономических параметров, влияющих на оправданность и результативность установки ветроэлектростанций. Вейвлетные методы исследования параметров ветра выявили временные циклы активности воздушных потоков и вывели поправочные множители для экономической модели расчёта, используемой для ВЭС. Симуляционное воспроизведение эксплуатации энергоблоков в исходном и адаптивном вариантах показало, что внедрение адаптивных режимов регулирования мощности способно привести к приросту генерации порядка 11,5%. В ходе изучения схем прогнозирования ветровых процессов выявлено отсутствие единого подхода к описанию характеристик воздушного потока и к составлению прогнозов на краткие и средние сроки. Полученные выводы служат методологической базой для проектирования системы контроля показателей работы установок ветроэнергетики.

Под влиянием демографического наращивания, технологического прогресса и усиления спроса со стороны населения и промышленного сектора объёмы глобальной выработки электричества продолжают расти, что усугубляется сохраняющейся нестабильностью в энергетической сфере. Из-за такой динамики стремительная электрификация оформилась как доминирующее направление при перестройке моделей конечного использования энергоносителей. В контексте выполнения климатических задач «зеленой повестки» энергетический сектор на глобальном уровне подошёл к четвертому энергетическому переходу, смещая акценты в пользу приоритетной генерации энергии из ВИЭ-источников.

Индикаторы экономического развития промышленного сектора по субъектам РФ отражают прямую зависимость от отраслевых объёмов выпуска, фиксируемых в тех же субъектах. В совокупности указанное воздействие задаёт траекторию изменения статистических индикаторов отрасли.

Затраты на производство одного кВт·ч электрической энергии считаются экономическим индикатором эффективности работы предприятий. Особенность

функционирования компаний энергосектора – прямая реализация ресурса конечному потребителю без создания товарных запасов и без отражения продукции в ходе производства; поскольку товар не накапливается, издержки, накопленные в течение отчётного срока, целиком учитываются в калькуляции произведённой электрической энергии.

Колебания главных экономических индикаторов в промышленности России проявляют стабильную связь с нелинейными сдвигами в энергетическом секторе. Исследователь предложил результативный интегрированный метод предсказания подобных явлений; он опирается на модель, сочетающую экономические и технологические компоненты и увязанную с хранилищем сведений об изменениях климата.

Для более полного рассмотрения темы исследователь выделил 4 показателя и создал модель наблюдения и изучения экономических параметров, ВЭС, КУИМ, IRR, NVP и LCOE. В РФ показатель, отражавший средневзвешенную стоимость за единицу выработки, за последние годы утратил практическую ценность; при существующих подходах к оценке эксплуатационной результативности электростанций расчёты делают акцент на операционных и переменных затратах.

Набор показателей, применяемых при оценке деятельности ветроэнергетической компании, не отражает все стороны и не даёт единой картины работы отдельной ВЭС; вместе с тем регулярный мониторинг данных параметров показывает текущее состояние объекта и позволяет руководству оперативно принимать управленческие меры при возникновении внештатных ситуаций.

На российском рынке ветро- и солнечной энергетики ныне наблюдаются высокие капитальные затраты на единицу установленной мощности и повышенная себестоимость электрической энергии; её уровень в обозримом будущем способен возрасти на 3–4%. Одновременно зарубежный опыт, подтверждённый экспертными заключениями по рентабельности и быстрыми темпами развития, указывает на целесообразность освоения с последующим промышленным внедрением новых технологий генерации энергии.

Издержки на обслуживание СЭС в России намного превышают средний глобальный уровень. Эксплуатационные расходы ВЭС в России соответствуют международным показателям и смещаются к верхней границе указанного диапазона.

Рентабельность объектов ВИЭ и обоснование размещения на конкретной территории сильнее зависят от локальных условий, чем у энергоблоков, работающих на ископаемом топливе. География местности выходит на передний план, пространственные характеристики района влияют на экономические условия ВИЭ. Оценивать отдачу без учёта климатических особенностей нельзя; первоочередная задача – выявить пригодные ниши с точки зрения физической и экономико-географической пригодности 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.

Установлено, что на срок окупаемости проектов ВИЭ (России, Кыргызстане) сильнее влияют расходы, связанные с покупкой оборудования, строительством сооружений, приобретением участка земли и созданием сопутствующей инфраструктуры.

Исследование охватывало изучение природно-климатических факторов, сопоставление социально-экономических индикаторов и проверку экономической целесообразности ветроэнергетики на изучаемых территориях; по итогам исследования сформулированы выводы. Данные показали, что в Ростовской области имеются лучшие условия для реализации проектов ВИЭ, преимущественно ветровой генерации. Одновременно природно-ландшафтные особенности Исык-кульской области больше подходят для строительства электростанций на базе солнечной и водной энергии, а энергетические возможности региона в части ветровой генерации выглядят менее выраженными.

Для оптимизации работы энергосистемы необходимо учитывать прохождение минимума электрической нагрузки; в зимний период

теплофикационная и вынужденная теплофикационная мощности оказываются соизмеримыми и даже превышают величину ночной электрической нагрузки. Чтобы сохранить стабильность режима ночью, энергосистема вынуждена останавливать конденсационные агрегаты, что приводит к дополнительным затратам, и разгружать отборы турбин, переводя тепловую нагрузку на энергетические котлы через редуционно-охладительные установки. Для функционирующей энергосистемы оправданнее сокращать объёмы приёма мощности, вырабатываемой ВЭУ, чем навязывать системе повышенную нагрузку ради поддержания ночного режима. Энергия ветра доступна в больших объёмах и пригодна для развёртывания в широком масштабе на открытом ландшафте – например, на лугах, волнистых возвышенностях и ровных просторах.

Исследование воздействия сезонных колебаний на оптимизацию работы ветряных установок позволяет создать полную картину взаимосвязи климатических параметров и эффективности производства электроэнергии из возобновляемых источников. Глобальное потепление, перераспределение осадков и колебания уровня воды; вариации скорости и направления ветров; приливно-отливные процессы; солнечные магнитные возмущения; изменения частоты и силы штормовых и ураганных явлений; прочие стихийные катаклизмы заметно отражаются на объёме производимой энергии. Поэтому при подготовке проектов и планировании режимов эксплуатации ветроэнергетических комплексов перечисленные климатические параметры необходимо учитывать в расчётных моделях и при принятии управленческих решений. Характеристики воздушных потоков – прежде всего скорость и направленность – во многом влияют на работу ветроэлектростанций. Наземные ураганы и морские штормы создают повышенные динамические нагрузки на ветряные установки, что способно ускорять износ конструкций и приводить к повреждению аппаратуры. Интенсивные порывы усиливают нагрузку на роторные лопасти генераторов; требуется выполнение плановых сервисных работ и периодическая замена изношенных узлов, что повышает расходы на содержание объектов. Сбои на линиях электропередачи, вызванные усилением ветровой активности, влияют на стабильность поставок

электроэнергии потребителям, растущая нагрузка в сети создаёт риск перегрузок и внезапных скачков напряжения. Порывы сильного ветра вызывают колебания ротора и опор ветряных турбин, что ухудшает эксплуатационную надёжность и увеличивает вероятность угроз безопасности работы ветроэлектростанций. Особую актуальность данные факторы приобретают при принятии решений о строительстве ветроэлектростанций в регионах на территории Российской Федерации, характеризующейся широким спектром климатических условий. Оценку эффективности различных моделей ветроэнергетических установок проводят с учётом особенностей конкретного проекта, характера местности, временных интервалов, экономики проекта и перспектив в области «зелёной» энергетики.

### **Глава 3. Разработка модели мониторинга показателей эффективности ветроэнергетических систем**

При создании и проверке модели использовались эмпирические наборы замеров, отражающие скорость и профиль воздушных потоков в интервале 2020–2024. Данные получены из метеонаблюдений Росгидромета; из наборов климатических данных ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»; и из отчётных материалов и статистики проектов АО «Новавинд» по эксплуатируемым ветропаркам.

Обработка и согласование данных проводились с применением вейвлетных преобразований, цифрового фильтра и нормализации, основанной на средней годовой амплитуде ветра.

#### **3.1. Методика оценки интенсивности использования мощности ВЭС**

В условиях глобальных климатических изменений и необходимости перестроить экономику ради резкого сокращения углеродных выбросов энергия ветра, получаемая из возобновляемых источников, приобретает статус стратегического приоритета. Укрепление самодостаточности энергоснабжения и повышение стабильности национальных энергосистем связывают с уменьшением эмиссии газов, усиливающих парниковый эффект; развитие ветроэнергетики тесно связано с указанным процессом.

Отдача установок ветряной генерации в большей степени зависит от климатических параметров местности, прежде всего от годового среднего показателя скорости ветра и от стабильности воздушных потоков. Лучшие участки для эксплуатации расположены в зонах с выраженным ветровым ресурсом – при показателе ветра, равном или превышающем 8 м/сек – и при ограниченной доступности иных источников энергообеспечения. Адаптация размещения к географическим особенностям позволяет совмещать ветряные станции с

аграрными землями и размещать такие площадки в горных районах, одновременно снижая экологические угрозы и уменьшая вероятность конфликтов с устоявшимися способами использования земель.

Несмотря на последние технологические достижения, распространение ветровой энергетики в России сдерживается рядом факторов, экономическая эффективность, инфраструктурные ограничения и технологические барьеры. Средний коэффициент полезного действия ветрогенераторов составляет около 40%, что связано с переменной природой ветровых потоков и ограниченной возможностью полной утилизации кинетической энергии воздушных масс. К тому же, географическая удалённость потребителей от точек генерации увеличивает капитальные затраты на строительство энергосетевой инфраструктуры и распределение электроэнергии.

Ветровая энергия, развиваемая как новый источник, расширяет круг поставщиков электроэнергии, благодаря чему доля ввозимых энергоносителей сокращается и вредное воздействие на природные экосистемы уменьшается. Объединение ветряных установок с мощностями атомной энергетики приводит к появлению гибридных энергосистем, повышающих надёжность электроснабжения и позволяющих сократить эксплуатационные расходы.

Госкорпорация «Росатом» развивает и расширяет проекты по сочетанию ядерной и ветровой генерации с целью заметного усиления стабильности функционирования энергосистемы страны. Технологическая работа сосредоточена на повышении надёжности электроснабжения, снижении выбросов углерода и укреплении стратегической энергетической безопасности РФ. Интеграция описанных подходов ведёт к созданию надёжной и экологически ориентированной модели поставок энергии.

Для 2022 года зафиксированы следующие показатели, удельный вес ВИЭ без крупной гидроэнергетики в общей выработке электроэнергии составляет примерно 11% в ЕС, 7% в США, 7% в Японии и 8% в Австралии. Эксплуатация наземных ВЭС и СЭС требует обширных незанятых площадей, сложных и дорогостоящих

систем накопления энергии и ведёт к увеличенному расходу цветных металлов.<sup>136</sup> Metallургический сектор традиционно характеризуется интенсивным спросом на энергоресурсы и воду и сопровождается выделением загрязняющих веществ в окружающую среду. Вопросы вторичной переработки элементов ВИЭ и аккумуляторных систем для электромобилей остаются нерешёнными. Для решения дилеммы предлагается внедрить новый комбинированный метод выработки энергии, отличающийся более щадящим воздействием на климат планеты.

На протяжении долгих лет международные эксперты изучали способы интеграции переменных источников энергии в общесистемное энергоснабжение государств; речь касалась ВИЭ. Выбор первоочередных мер для практической реализации в отдельных условиях остается сложной задачей и требует принятия решений.

Интеграция атомной и ветровой энергетики открывает новые перспективы для создания гибридных энергосистем, сочетающих высокую мощность традиционных атомных станций с переменной генерацией ветроустановок. Интеграция ведёт к росту доли возобновляемых источников в суммарном энергобалансе и снижению рисков, связанных с колебаниями генерации.

Устойчивость электроснабжения проявляется чаще в системах, объединяющих различные источники энергии и одновременно уменьшающих зависимость от ископаемых энергоносителей<sup>137</sup>. Для достижения такого результата необходимо масштабное внедрение вычислительных средств и моделей прогнозирования, повышающих согласованность процессов выработки и передачи электрической энергии.

На рентабельность ветроэнергетической отрасли влияют разные факторы, климат, новые технические решения, меры государственной поддержки и общие

---

<sup>136</sup> 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-znachitelnyimi-problemami/> (дата обращения: 07.11.2024).

<sup>137</sup> 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.

тенденции глобального энергетического рынка. Использование форсайт-методов<sup>138</sup> при прогнозировании направлений развития отрасли улучшит стратегическое планирование и сделает сектор более привлекательным для инвесторов на длительную перспективу.

На федеральном уровне курс, связывающий возобновляемые источники энергии с технологиями атомной отрасли, создаёт правовые и организационные предпосылки для реализации проектов по наращиванию ветровых мощностей. На территории Российской Федерации действует комплекс мер, направленный на ускорение ввода ветроэлектростанций через конкурсный отбор инвестиционных инициатив<sup>139</sup>, поддерживающих генерацию из ВИЭ. Такая ситуация подчёркивает потребность в объективной экономической оценке ветроэнергетики, по этой причине необходимо создание прогнозных моделей и инструментов для оптимизации работы на базе алгоритмов.

Разработка методики ранжирования новаторских инициатив в сфере «зеленой экономики», предусматривающая практическую апробацию на базе машиностроения для ветроэнергетики, объявлена приоритетной задачей, присущей центральному отраслевому форсайт-проекту в России, что закреплено в нормативных актах Правительства РФ<sup>140</sup>.

Прогнозирование отечественного энергетического сектора при использовании форсайт-технологий опирается на системную, комплексную и междисциплинарную методологию, учитывающую рискоориентированные факторы. Инструменты цифровой трансформации позволяют заметно ускорить обработку больших данных и повысить достоверность прогнозных оценок.

Изменение экономических индикаторов промышленного сектора РФ показывает высокую корреляцию с нелинейными процессами, характеризующими

---

<sup>138</sup> Карамов, Д. Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии / Д. Н. Карамов // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 9 (104). – С. 133–140.

<sup>139</sup> 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162194/) (дата обращения: 08.06.2025).

<sup>140</sup> 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_136181/) (дата обращения: 08.06.2025).

энергетические тенденции. Описан интегративный метод прогнозирования, объединяющий экономико-технологическое моделирование с базой данных климатических изменений, и позволяющий учитывать макроэкономические и природные факторы.

Исследования показали, что повышение эффективности работы ветроэнергетических систем требует системной методики, сочетающей изучение метеорологических параметров региона, оценку характеристик и свойств оборудования ВЭС, моделирование с использованием алгоритмов прогнозирования и симуляции, наряду с внедрением цифровых инструментов и платформ. Модель направлена на достижение максимального коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) с учётом региональных климатических особенностей и сезонных колебаний ветровых режимов.

Когда требуется анализ изменений в работе систем в различных эксплуатационных ситуациях применяют цифровые аналоги – электронные реплики материальных устройств либо технологических процессов<sup>141</sup>. Аналоги создаются на основе сигналов, поступающих от сенсоров, установленных на физических экземплярах, и обеспечивают функционирование при наличии постоянного соединения и в условиях автономной обработки. В составе комплекса модуль мониторинга вместе с системой автоматического регулирования выполняет роль цифрового представителя ВЭС, что позволяет прорабатывать различные эксплуатационные сценарии. Собранные сведения поступают к модулю регулирования выработки энергии, который, опираясь на полученные данные, оперативно корректирует рабочие настройки турбин.

Автор выполнил расчёты и подготовил графическое изображение сезонных колебаний КИУМ; по результатам выделены предпочтительные региональные режимы работы ВЭС. Исходные климатические наблюдения вместе с моделью,

---

<sup>141</sup> 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.

созданной автором, легли в основу расчётов КУИМ применительно к ВЭС в двух регионах; результаты см. рис.29.

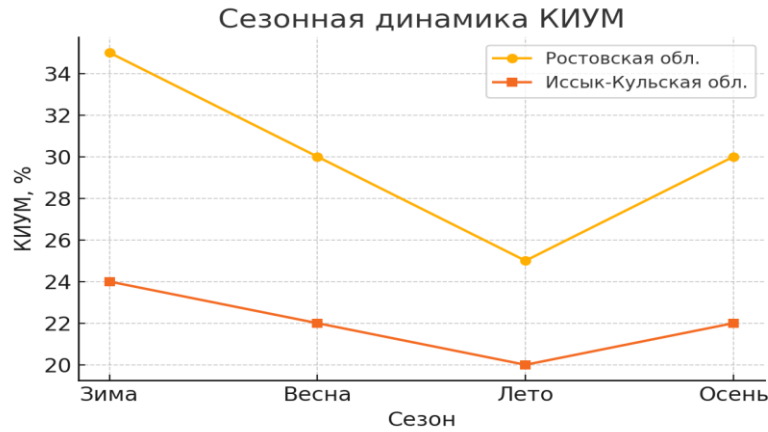


Рисунок 29. – Сезонная динамика КУИМ

Источник: составлено автором

Блок, ответственный за оптимизацию режимов работы ВЭУ, установил, зимой в Ростовской области регистрируются ветровые величины порядка 6-8 м/с, что указывает на высокий уровень генерации в регионе и на рост нагрузки энергосистемы в отопительный сезон. По итогам целесообразно в период холодов увеличить задействуемую мощность ВЭУ, расширить диаметр ротора турбины для увеличения выработки и учитывать электрическую мощность теплофикации, производимую турбоагрегатами ТЭЦ, с целью выравнивания сетевых нагрузок. Прогнозируемый результат – рост КУИМ до 38-42% за счёт сезонного усиления воздушных потоков (п.2.2 работы).

Полученные результаты показывают, что в Ростовской области КУИМ зимой составляет 35%, летом – 25%; в Иссык-Кульской области значения КУИМ колеблются в узком диапазоне 20–24%. Ростовской области нужна адаптация управления по сезонам, тогда как для Иссык-Куля достаточно стандартной схемы эксплуатации ВЭС.

В Иссyk-Кульской области присуща высокая стабильность воздушных потоков при относительно низкой скорости ветра (3-5 м/с). Поэтому целесообразно использовать ВЭУ, рассчитанные на работу при низких скоростях ветра, и вводить в эксплуатацию ВЭС с номинальной мощностью, адаптированной к местным климатическим условиям. Указанный подход обеспечит стабильную генерацию электроэнергии в течение всего года. Одновременно суммарная номинальная мощность ВЭС увеличивается при малых скоростях ветра и сокращается зависимость региона от других источников энергии.

Экономические оценки проектов эксплуатации ВЭС при различной ветровой активности позволили получить следующие результаты, при высокой ветровой активности в Ростовской области производство электроэнергии возрастает на 20–25% по сравнению со средним сценарием. По данным измерений, в декабре–март в Ростовской области ветровые скорости достигают 7,5–8,2 м/с. Возможности увеличения установленной мощности турбин, использование режимов расширенного диапазона генерации; установка турбин с повышенным коэффициентом использования ветра.

По результатам исследования зафиксирован прирост годовой генерации электроэнергии в объёме 8–10% в зимний период с повышенной ветровой активностью. Автор пришёл к заключению, что усиление ветровых режимов в заметной степени увеличивает объём производства и экономическую отдачу инициатив в сфере ВИЭ; внедрение турбин с расширенным диапазоном эксплуатации и с высоким значением КИУМ способно обеспечить дополнительный прирост порядка 8–10% годовой генерации (табл.34).

Таблица 34. Экономические показатели регионов

Показатель	Ростовская обл., млн.руб.	Иссyk-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

По итогам расчёта на один ветроагрегат "Ростовская область" показывает прирост выработки в 22% по отношению к "Иссык-Кульская". Время выхода на безубыточность у "Ростовская область" короче примерно на 18% по сравнению с "Иссык-Кульская".

Регулярный мониторинг экономических показателей ВЭС двух регионов и проведение сравнительного исследования (табл.35) показали, что систематическая оценка экономических показателей проектов ВИЭ позволит своевременно корректировать режимы эксплуатации 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

По сравнению с устоявшимися зарубежными методиками, изложенными в специализированной литературе, предложенное решение выделяется интеграцией локальных климатических условий. Одновременно в основе лежит учёт сезонных колебаний потоков ветра.

По сравнению с моделью, представленной, например, в работе Gsänger & Pitteloud (IEA Wind, 2021), где ветровой ресурс оценивается по усреднённым значениям за длительный период, в данном исследовании используются

адаптивные вейвлет подходы, позволяющие фиксировать колебания скорости и направлений воздушных масс в конкретных временных окнах.

Повышается точность прогнозирования выработки в регионах с нерегулярной и резко выраженной сезонностью ветра.

Применение цифровых технологий при эксплуатации ветроэнергетических комплексов, в частности с опорой на мощности атомной отрасли, позволяет повысить отдачу генерации электроэнергии и обеспечить интеграцию в национальные энергосистемы с учётом специфики региональных климатических условий. Автоматизированные системы контроля производственных процессов, интеллектуальные платформы для прогнозирования нагрузки и мониторинга состояния ВЭС снижают операционные издержки и повышают надёжность электроснабжения.

Создание специализированных цифровых решений, направленных на улучшение процессов генерации и распределения электроэнергии, в сочетании с внедрением автоматизации управления на базе алгоритмов машинного интеллекта и прогнозных моделей, служит основой для развития ветроэнергетического сектора. Развитие цифровых технологий повышает надёжность энергоснабжения, уменьшает объем углеродных выбросов и расширяет экспортные возможности отечественных разработок в секторе возобновляемых источников энергии.

### **3.2. Цифровая модель мониторинга экономических показателей ветроэнергетики**

Автор, руководствуясь результатами исследования, собрал данные и сделал выводы. Производительность ветроэнергетики зависит от климатических условий региона, в частности от среднегодовой скорости и стабильности воздушных потоков. Благоприятные условия эксплуатации возникают в районах с высоким запасом ветровой энергии и при ограниченном доступе к иным энергетическим ресурсам.

Адаптация мест размещения ветряных установок под рельеф и хозяйственный профиль территории даёт возможность размещать ветряные установки среди сельскохозяйственных угодий и на горных склонах, что снижает нагрузку на экосистему и сокращает вероятность конфликтов с традиционными способами использования земель. При оценке целесообразности вложений в проекты энергостроительства региональные индикаторы социального и экономического состояния сильно влияют на оценку рисков и прогнозную доходность при финансировании ВЭС.

Предлагаемая модель регулирования интенсивности мощности ВЭС объединяет несколько взаимосвязанных модулей, работающих совместно с целью улучшения использования мощности ВЭС:

Система сбора данных получает данные из нескольких источников и передаёт в другие модули системы. Модуль сбора данных регистрирует климатические параметры (скорость ветра, плотность воздушного потока, направление, температура), технические характеристики ВЭУ (мощность, диаметр рабочего колеса, коэффициент полезного действия) и экономические данные (стоимость производства электроэнергии, тарифы, издержки эксплуатации).

Подсистема оценки мощности служит для определения возможной генерации электричества каждой ВЭУ. Модель применяет формулу расчёта мощности ветровой турбины, учитывая ветровую скорость и паспортные технические параметры. Отдельный блок выполняет спектральное исследование ветровой скорости с помощью вейвлет-методов и выявляет интервалы времени, когда отдача генерации достигает максимума. По картограмме направлений ветра система фиксирует доминирующие потоки и оценивает силу потоков по сезонам. Централизованный аналитический блок метео данных объединяет математические алгоритмы и статистические приёмы. Платформа рассчитана на обработку крупных массивов данных и выполнение смысловой интерпретации. В её составе имеются инструменты обработки временных рядов и многомерного прогнозирования разных показателей, средства обнаружения структурных закономерностей и инструменты

для корреляционного и регрессионного исследования взаимосвязей между факторами.

Расчет мощности ВЭУ производится по формуле:

$$P = \eta \pi \rho V^3 D^2 / 8 \quad (19),$$

$P$  – мощность ветровой турбины;  $\eta$  – коэффициент полезного действия;  $\rho$  – плотность воздуха;  $V$  – скорость ветра;  $D$  – диаметр рабочего колеса турбины.

В холодный сезон делается главный акцент на рост прибыли за счёт увеличения генерации электроэнергии в периоды с максимальными ветровыми скоростями. Чтобы увеличить объём выработки электроэнергии предусмотрен ввод в строй парков ВЭУ с роторами наибольшего диаметра, плюс учитывается электрическая мощность теплофикации, генерируемая турбоагрегатами ТЭЦ, для поддержания стабильности энергоснабжения. Модуль предназначен для обеспечения максимально результативных режимов работы ВЭУ в каждом регионе с учётом сезонных изменений ветрового режима и стремления к максимальной суммарной выработке. В составе модуля заложены 3 сценария.

В регионах с низкой ветровой активностью целесообразно вводить в строй ветроэлектростанции (ВЭС). Паспортная мощность ВЭС должна соответствовать режимам работы при слабом ветре. Рост экономической рентабельности достигается благодаря использованию ВЭУ. ВЭУ обеспечивают выработку энергии даже при небольших ветровых потоках. Выгодно возводить ВЭС, предназначенные для эксплуатации при малой ветровой интенсивности, и использовать ВЭУ с повышенным КПД в подобных условиях. Грамотное расположение ВЭУ по ветровой розе с учётом климатических особенностей региона увеличивает суммарную отдачу.

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.

Исследование продуктивности региональных ветровых электростанций выявило для Ростовской области оценку LCOE примерно 61 USD/MWh, что при курсе Банка России на 13 июня 2025 года<sup>142</sup> (79 руб.) эквивалентно 4819 Р/MWh; рассчитанная IRR составила около 10%. В отношении Иссyk-Кульской области полученный LCOE составил порядка 83 USD/MWh (соответствует 6557 Р/MWh), при этом IRR приближённо равна 7%.

Оценка прироста экономической эффективности ресурсного обеспечения промышленности от реализации проектов ВЭС в регионах (приложение 2) показала следующие результаты (табл.36). 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. Показатели по Иссyk-Кульская области, прирост ВРП до 1,2%, благодаря этому, будет сокращён энергетический дефицит зимой и увеличится число рабочих мест в энергетике и при 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
Иссyk-Кульская область	1,2	1,5–2,0

Источник: составлено автором

Вложения в объекты ВЭС создают непосредственную экономическую отдачу и эффект мультипликации, что обосновывает реализацию проектов на

<sup>142</sup> Официальные курсы валют на заданную дату, устанавливаемые ежедневно // Банк России. [Электронный ресурс]. URL: [https://cbr.ru/currency\\_base/daily/](https://cbr.ru/currency_base/daily/) (дата обращения: 15.06.2025).

соответствующих территориях. Например, на промышленных территориях Урала и Сибири, где потребление электричества сильно колеблется по сезонам и ТЭЦ работают с повышенной нагрузкой в холодный период, целесообразно предусмотреть интеграцию ВЭС в энергосистему ТЭЦ. Тепловые станции будут частично компенсировать недостающую генерацию за счёт мощности ВЭС в периоды интенсивного ветра, что повысит стабильность распределения нагрузок. Параллельно целесообразно внедрить прогностические инструменты, учитывающие нелинейные динамические процессы для адаптивного управления генерацией; внедрение указанных инструментов повысит экономическую отдачу эксплуатации промышленных установок, увеличит гибкость энергосети и приведёт к сокращению эмиссии CO<sub>2</sub>.

Модуль оценки экономических показателей рассчитывает экономический эффект от использования ВЭУ в каждом регионе, принимая во внимание стоимость производства электроэнергии, эксплуатационные издержки и срок окупаемости на основе формулы:

$$Э_{эф} = nQT_{сл}(T_{сл} - T_{ок})(E_{ст} - I_{экс})(C_{п} - C_{т}) \quad (20),$$

ЭЭФ – экономический эффект, n – количество ВЭУ, Q – годовой дефицит электроэнергии, T<sub>сл</sub> – срок службы ВЭУ, T<sub>ок</sub> – срок окупаемости, E<sub>ст</sub> – стоимость электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ, I<sub>экс</sub> – издержки эксплуатации, C<sub>п</sub> – стоимость производства электроэнергии от традиционных источников, C<sub>т</sub> – стоимость производства электроэнергии от ВЭУ. Модуль визуализации данных – комплексная система. Он предоставляет интуитивно понятные представления массивов больших данных при помощи алгоритмов графической интерпретации. В состав входят адаптивные механизмы обработки и отображения многомерных структур; исследователи получают возможность выявлять скрытые корреляции, проводить детальную оценку тенденций и аномалий. Чтобы повысить вычислительную производительность, модуль использует гибридный подход к распределённой обработке данных с задействованием CPU и GPU-архитектур. В итоге достигается оперативная адаптация вычислительных мощностей под текущие задачи, что ускоряет обработку и сокращает задержки при визуализации

сложных аналитических моделей. Модуль визуализации преобразует данные и отчёты по скорости ветра, мощности ВЭУ и экономической эффективности в визуальные форматы, удобные для восприятия, графики, диаграммы и другие представления. Отчёты используются при внутренней оценке и при оперативной проверке работы. Материалы помогают операторам ВЭС принимать решения по управлению мощностью и по оптимизации работы ВЭУ.

Интеграционный блок взаимодействует с уже действующими учетными и управленческими решениями предприятия, применяемыми в организации, например, с системой учета, системой управления производством и системой управления рисками; взаимодействие помогает инженерам в атомной отрасли автоматизировать сбор данных и рационально использовать доступные данные.

Интеграционный блок взаимодействует с уже действующими учетными и управленческими решениями предприятия, расширяя функциональность систем управления ресурсами.

Специализированная подсистема отвечает за охрану секретных сведений, полученных при сборе. В своём исследовании авторы публикации предлагают внедрить аппаратно-программный комплекс шифрования (АПКШ) «Континент» и организовать процедуры авторизации с многоступенчатой проверкой подлинности пользователей. Дополнительно они настаивают на регулярном создании резервных копий накопленных данных.

Архитектура модели для оптимизации интенсивного использования мощности ветроэлектростанций объединяет ряд функциональных модулей. Они предоставляют комплексное решение задач мониторинга, обработки данных, прогнозирования и оптимизации работы ветроэнергетических комплексов. Система сбора данных агрегирует сведения из разных источников и передаёт полученные материалы в модули обработки, создавая базу для последующих расчётов. Модуль анализа климатических данных, использующий вейвлет-анализ, обеспечивает исследование спектрального состава скорости ветра и определение оптимальных периодов для максимальной выработки электроэнергии. Модуль расчёта мощности на основе формулы мощности ветровой турбины определяет

потенциальную выработку электроэнергии для каждой ветроэнергетической установки в зависимости от скорости ветра и технических характеристик. Блок оптимизации степени задействования мощности вырабатывает рекомендации по режимам эксплуатации, принимая во внимание сезонные колебания ветровой скорости, чтобы обеспечить наивысшую отдачу в производстве электрической энергии; в структуре предусмотрены три управляющих подхода – базовый, адаптивный и нелинейный. Подсистема экономической оценки проверяет рентабельность использования ветровых энергоустановок по регионам, в расчёт берутся цена выработки электроэнергии, эксплуатационные расходы и прогнозируемый период окупаемости инвестиций. Модуль визуализации данных преобразует результаты расчётов в наглядные графические форматы и служит инструментом при принятии управленческих решений операторами ветроэлектростанций. Интеграционный блок организует обмен с действующими учётными и управленческими системами предприятия. Модуль безопасности реализует защиту конфиденциальных данных посредством аппаратно-программного комплекса шифрования, авторизации, многофакторной аутентификации и резервного копирования данных. Перечисленные модули объединяются в единую систему, что позволяет с высокой результативностью решать задачи управления ветроэнергетическими комплексами при высокой изменчивости внешних факторов.

Конфигурация данной модели гарантирует надёжный сбор, комплексную обработку и визуализацию обширных массивов данных, что позволяет опираться на аналитические выводы при подготовке обоснованных управленческих решений.

Автор предлагает для корпоративной среды, отвечающей за обработку данных, применять ранее изложенную модель в сочетании с DG/DM («Data Governance»/ «Data Management»), выступающими в роли набора средств, гарантирующих:

Систематизация потоков данных и приведение к общим правилам доступа создают базу для единой платформы контроля и использования аналитического материала предприятия. Для повышения уровня обмена данными необходимо

выработать единые принципы организации данных, что позволит сократить время получения аналитических результатов и упорядочить обработку показателей экономических тенденций на платформах корпоративного уровня.

Для обеспечения оперативного доступа к данным и «data-сервисам» создают единую точку входа, которая объединяет глоссарий, каталог данных, аналитическую отчетность и портал самообслуживания. Параллельно выстраивают единое представление о данных, перечень терминов, взаимосвязи между бизнес-терминами, экономические показатели и источники данных вместе с методологиями экономических и технических расчётов. Описание бизнес-процессов, рассчитанное на цифровую трансформацию, выполняют через концептуальное моделирование с использованием стандартов BPMN и внедрением систем управления знаниями предприятия.

Блок-схемы, иллюстрирующие стадии оптимизационных процедур, численное моделирование и подбор технологических решений служат наглядным средством для отображения взаимодействий и операций в пределах оптимизационной модели. Конкретная схема для регулирования интенсивности вырабатываемой мощности на ветроэлектростанциях последовательно показывает все стадии, сначала происходит сбор данных, затем проводится обработка и оценка собранных данных, и процесс завершается внедрением выбранных решений (рис. 30).

Предложенная модель оптимизации предлагает структурированный подход к повышению мощностных показателей ВЭС с учётом множества факторов и условий эксплуатации. Модель позволяет составлять сбалансированные решения, направленные на увеличение экономической отдачи и долговечность проектов в области ветроэнергетики.

Схема численного моделирования показывает этапы работы над нелинейным поведением и оптимизацией (рис. 31).

Схема выбора технологий показывает, как выбираются технологии для различных климатических условий (рис.32).

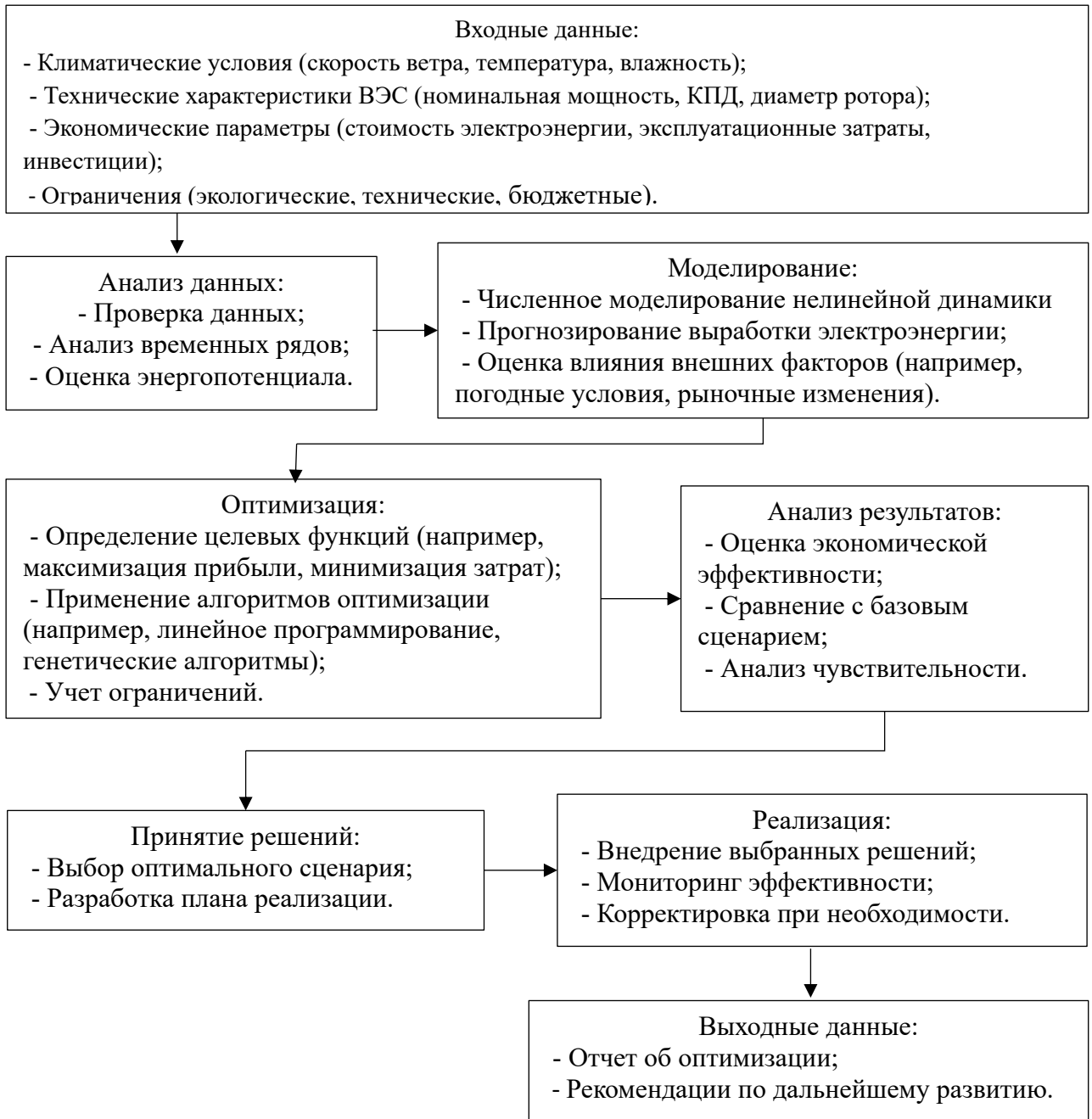


Рисунок 30. Схема процесса оптимизации интенсивности мощности ВЭС

Источник: составлено автором

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 31. Схема численного моделирования

Источник: составлено автором



Рисунок 32. Схема процесса оптимизации интенсивности мощности ВЭС

Источник: составлено автором

В разных климатических условиях и при вариациях конструкций ВЭУ методика легко перенастраивается, что увеличивает её практическую ценность. Прогнозы остаются надёжными на высоком уровне благодаря сочетанию вейвлетной обработки с передовыми математическими приёмами. Предложенное решение регулирует степень задействования генераторной мощности на ВЭС,

используя сведения о климате, параметры оборудования и экономические показатели. Автоматизированный механизм аккумулирует измерительные данные, проводит комплексную обработку полученных показателей и инициирует управленческие решения, благодаря чему уменьшаются расходы на эксплуатацию ветропарков и понижаются экологические риски, что ведёт к долгосрочному развитию ветроэнергетической сферы. Предложенное решение совместимо с действующими цифровыми платформами и пригодно для внедрения на различных территориях с целью повышения отдачи работы ВЭС. Оптимизация рабочих режимов ВЭУ в пределах модели приводит к росту финансовой отдачи за счёт сокращения потерь при низкой эффективности производства электроэнергии; на основе модели предусмотрено внедрение адаптивных алгоритмов управления мощностью, повышающих КПД и уменьшающих себестоимость генерируемой электроэнергии.<sup>143</sup>

После оценки цифровой платформы для слежения за экономическими индикаторами в области ветроэнергетики целесообразно систематизировать её преимущества и варианты внедрения. Созданная система позволяет регулировать уровень генерации ветровых установок с учётом климатических наблюдений, технических параметров оборудования и экономических индикаторов. В итоге формируется единый инструмент управления и планирования работы ветроэнергетических объектов, пригодный для комплексной эксплуатации. Сочетание вейвлет-анализа с передовыми математическими методами позволяет с высокой степенью достоверности предсказывать поведение ветров и объём генерируемой электроэнергии; подобные прогнозы необходимы для определения режимов эксплуатации и оценки экономической эффективности проектов. Благодаря модульной конструкции и возможности тонкой подстройки параметров модель легко адаптируется к специфике отдельных регионов и к различным типам ветроустановок. Для получения максимального экономического эффекта при

---

<sup>143</sup> Карамов, Д. Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии / Д. Н. Карамов // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 9 (104). – С. 133–140.

эксплуатации ветряных электростанций необходимо оптимизировать режимы работы установок и сокращать расходы, связанные с неэффективной выработкой электричества. Интеграция автоматизированных процессов, выполняющих сбор и обработку данных и оказывающих поддержку при принятии управленческих решений, снижает административные расходы на содержание ветровых парков и уменьшает долю ошибок, вызванных человеческим фактором. Наличие подобной модели помогает сократить экологические риски и обеспечить долгосрочное развитие сектора ветроэнергетики за счёт рационального использования ветрового ресурса регионов. Совместимость имеющихся у предприятия цифровых решений позволяет внедрить созданную модель в актуальные операционные процессы без радикальной перестройки ИТ-ландшафта. Использование адаптирующихся алгоритмов регулирования мощности на базе созданной модели повышает КПД ветроэлектростанций и снижает удельные издержки на выработку электроэнергии, что укрепляет конкурентные позиции отрасли возобновляемой энергии на рынке.

Вектор развития ветроэнергетики складывается из переплетения экономических, технических и атмосферных факторов; поэтому для достоверного прогнозирования и построения моделей необходим интегрированный междисциплинарный подход.

Особую роль выполняет синтез подходов к обработке масштабных массивов данных, создание цифровых платформ для моделирования рентабельности и выявление ресурсных возможностей ветроэнергетических объектов (ВЭС) по климатическим поясам. Повышение достоверности прогнозов и принятие обоснованных решений по инвестициям достигается за счёт алгоритмов обработки данных учёта электроэнергии, содержащих технические и коммерческие сведения; использование таких алгоритмов позволяет оптимизировать работу ВЭС.

Внедрение цифровых решений для координации работы парковых ветровых установок, реализуемых совместно с предприятиями атомного сектора, повышает отдачу от выработки электричества и облегчает интеграцию вырабатываемой энергии в общегосударственные энергосети с учётом климатических особенностей регионов. Сочетание автоматизированных комплексов контроля технологических

этапов, алгоритмов прогнозирования нагрузок и средств дистанционной диагностики ветроэлектростанций снижает эксплуатационные расходы и повышает надёжность подачи электрической энергии.

Комплексные цифровые платформы обеспечивают координацию процессов производства и поставок электроэнергии, вместе с автоматизированными управленческими решениями на основе обучающих алгоритмов и прогностических методов обработки данных создают мощный стимул для быстрого роста ветроэнергетики. Параллельно внедрение новых инструментов в цифровом экономическом пространстве укрепляет надёжность энергосистем, сокращает углеродные эмиссии и расширяет экспортные перспективы отечественных разработок в области возобновляемых источников энергии.

### **3.3. Апробация модели мониторинга экономических показателей ВЭС**

Пилотирование инструмента контроля экономических параметров ВЭС создаёт предпосылки для увеличения выработки ВИЭ, поэтому планируется реализация новых ветропроектов через конкурсные процедуры отбора инвестиционных предложений, пригодных для возведения установок генерации на базе возобновляемой энергии. Одновременно подчёркивается потребность в комплексной проверке рентабельности ветроэнергетики с опорой на проектную документацию и алгоритмические расчёты.

Положения национальной энергетической стратегии предполагают, что в ближайшие годы объёмы генерации с использованием ВИЭ будут увеличены. Для реализации направления запланировано строительство новых ВЭС через конкурсные процедуры.

В ближайшие годы в России внедрён механизм проведения конкурсов для отбора инвестиционных проектов по строительству генерирующих объектов, использующих возобновляемые источники энергии. Данное обстоятельство

подчёркивает необходимость оценки экономической отдачи ветроэнергетики с помощью проектирования и алгоритмического моделирования.

В числе приоритетных национальных инициатив отраслевого форсайта поставили задачу выработать стратегию перехода к экономике, основанной на экологических принципах. Для достижения цели создали механизм, служивший средством установления приоритетов между технологическими областями по сценариям, составленным экспертами.

Форсайт-проектирование используется для апробации сценариев развития национальной энергетики за счёт системного подхода, междисциплинарной координации, комплексных мер и ориентации на управление рисками. Одновременно цифровые инструменты ускоряют и улучшают обработку больших массивов данных, что делает доступным вероятный исход моделирования.

Показатели экономической активности промышленного сектора России демонстрируют выраженную связь с нелинейными проявлениями энергетических тенденций. В данной публикации предлагается результативный интегрированный метод прогнозирования упомянутых трендов. Описанный метод базируется на объединённой экономико-технологической модели, интегрированной с базой данных по климатическим изменениям.

В настоящей работе разработана авторская форсайт-методика, представляющая собой методологический комплекс, основанный на всестороннем обследовании и оценочной интерпретации текущего состояния и ресурсных возможностей ветроэнергетики в РФ. Параллельно проведён количественный анализ и систематизация статистических данных о производстве ветровых установок, сводных метеорологических и экономических показателях, касающихся ветроэлектростанций в Ростовской и Иссyk-Кульской областях.

Для повышения эффективности функционирования ВЭС требуется комплексная методика, объединяющая исследование климата, подробную оценку параметров оборудования, математическое моделирование и использование цифровых инструментов. Приоритет модели – достижение максимального значения

(КИУМ); необходимо учитывать особенности территории и сезонные колебания воздушных потоков.

Роль цифрового двойника ВЭС выполняет комплекс для наблюдения и автоматического управления, предоставляющий средства моделирования рабочих сценариев. Поток данных поступает в управляющее звено по распределению мощности; через звено оперативно корректируются характеристики работы турбин. Модели, называемые цифровыми двойниками, создаются на основе данных, передаваемых с датчиков, установленных на физических объектах, и поддерживают работу при сетевом подключении и в локальном режиме. С помощью таких моделей проводят симуляции поведения оборудования в различных условиях эксплуатации, что позволяет выявлять возможные неисправности и повышать производительность работы.

Регулярный разбор приоритетных экономических индикаторов ВЭС позволяет оперативно перенастраивать режимы работы и повышать итоговую рентабельность проектов. Обработка массивов данных большого объёма вместе с внедрением ML-алгоритмов и приёмов вейвлет-анализа создаёт цифровую модель (рис.33). Модель используется как инструмент для всесторонней оценки экономической состоятельности ВИЭ на всех этапах.

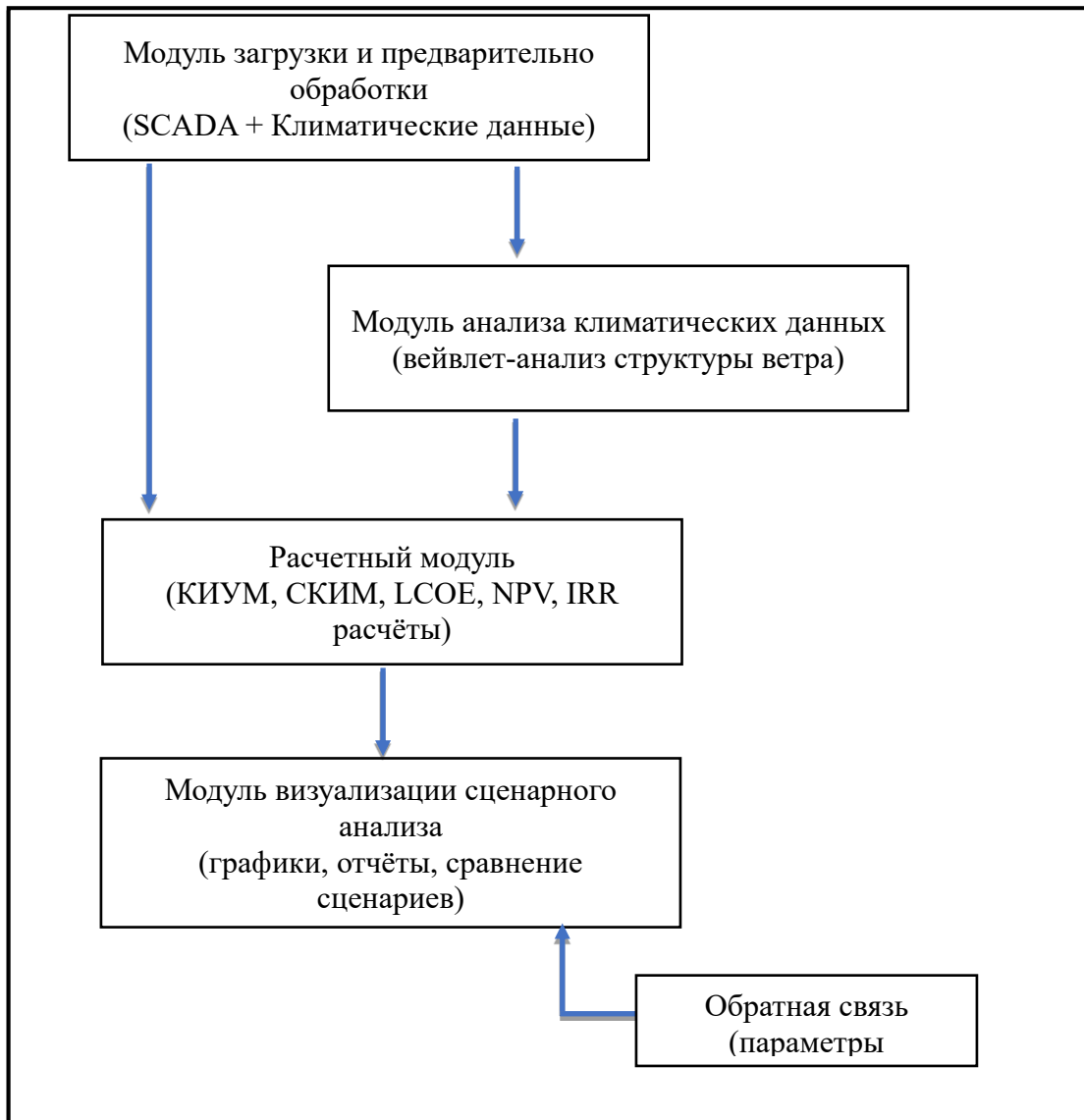


Рисунок 33. Информационно-функциональная модель системы оценки экономической эффективности ветроэнергетических установок

Источник: составлено автором

После обработки материалов автор сформулировал соответствующие выводы. В разделе, посвящённом ветровой активности по сезонам, представлены расчёты усреднённой величины ветрового потока, значения КИУМ и параметры сезонной изменчивости для Ростовской и Исык-Кульской областей. Для описания временных изменений ветровых параметров рекомендуется использовать вейвлет-анализ. Результаты моделирования сезонных графиков генерации электроэнергии включены в цифровую модель, предназначенную для мониторинга показателей работы ВЭС.

Для поддержания надлежащего управления генерирующими объектами требуется внедрять инструменты обработки данных и цифровые платформы для оперативного контроля. Средства цифровой обработки и регулирования производственно-энергетических потоков выступают основой цифровизации ветроэнергетики и объединения ветроэнергетики с региональными экономическими моделями. Внедрение цифровых решений поддерживает долгосрочное развитие энергетической отрасли, укрепляет энергетическую безопасность и позволяет выводить технологии на экспорт.

### **Выводы по главе 3**

Проведённое исследование методических и практических аспектов создания модели мониторинга показателей работы ветроэнергетических систем позволяет выделить ряд обобщённых положений, описывающих результаты выполненной работы. В ходе исследования обоснована методика оценки интенсивности использования мощности ветроэлектростанций, учитывающая климатические характеристики регионов, среднегодовую скорость ветра и стабильность воздушных потоков. Установлено, что благоприятные условия эксплуатации характерны для регионов со стабильными и сильными ветровыми ресурсами при ограниченном наборе альтернативных источников энергоснабжения. Создана цифровая модель мониторинга экономических показателей; она объединяет взаимосвязанные модули для сбора данных, оценки климатических параметров, расчёта мощности, регулирования уровня использования мощности, экономической оценки, визуализации и защиты данных. Разработаны три подхода для повышения продуктивности работы ветроустановок. Первый предполагает адаптацию режимов эксплуатации в холодный сезон с целью увеличения выработки при сильных ветровых нагрузках. Второй ориентирован на обеспечение запуска ветроэлектростанций, рассчитанных на работу на номинальной мощности при невысокой скорости ветра. Третий посвящён изучению нелинейного поведения

с помощью математических моделей и методов оптимизации. Тестирование предложенной модели на данных Ростовской и Иссyk-Кульской областей подтвердило пригодность решения для практической эксплуатации и позволило получить числовые показатели экономической рентабельности ветровых проектов в указанных регионах. Регулярное исследование экономических показателей проектов возобновляемой энергетики даёт возможность вовремя корректировать эксплуатационные режимы и улучшать конечные экономические результаты проектов. Интеграция модели с комплексом инструментов управления данными позволяет создать механизм действенного управления ростом ветроэнергетического предприятия с опорой на корпоративную платформу управления данными.

Показатель рентабельности ветроэнергетики – комплексная метрика; его состав обусловлен совокупностью разных элементов, прогрессивными технологическими решениями, мерами государственной поддержки и глобальными направлениями развития энергетики.

До настоящего момента в повседневной работе отрасли энергопроизводства специалисты пользуются зарубежными программными комплексами для расчёта эксплуатационных характеристик электростанций. Трудности использования зарубежного научно-практического опыта связаны со спецификой расчётных процедур в ветровой энергетике и с необходимостью получения корректных результатов в отдельных точках измерений, что приводит к тому, что подобные подходы не всегда соответствуют условиям эксплуатации ветровых электростанций на территории России.

Количественно установлена взаимосвязь масштаба экономических индикаторов промышленного сектора России с нелинейными закономерностями в энергетике; на основе полученных результатов создан действенный интегрированный метод прогнозирования соответствующих тенденций. Разработанный метод опирается на объединённую экономико-технологическую модель, связанную с хранилищем сведений об эволюции климата.

САПР на сегодняшний день прочно встроены в этап разработки проектов ВЭС и выступают главным технологическим ресурсом при подготовке проектной документации. Опираясь на цифровую модель ВЭС, программные комплексы позволяют быстро формировать и вносить изменения в проектные решения, что заметно сокращает сроки проектирования и уменьшает риск ошибок, связанных с ручным вводом данных. Поэтому цифровые двойники производственных объектов ВЭС служат оперативным и действенным инструментом управления в разных режимах эксплуатации.

Ситуация в секторе ветроэнергетики побудила российских исследователей искать самостоятельные решения упомянутой проблемы; среди применённых средств оказался подход, основанный на численно-математических моделях.

Проведенное исследование снова подтвердило постулат о том, что универсального метода прогнозирования временных рядов не существует. Каждый метод подходит для различных типов временных рядов. Для временных рядов, подверженных кризисным процессам, методы на базе нейронных сетей показывают лучшую эффективность.

Повышение итоговой экономической эффективности проектов в ветроэнергетике достигается при своевременной адаптации режимов эксплуатации. Для принятия таких решений необходим сбор и контроль данных по ВЭС Ростовской и Исык-Кульской областей и вычисление экономических метрик для ветроэлектростанции КУИМ, в том числе LCOE и IRR. Последовательный и систематизированный аналитический разбор экономических показателей проектов ВИЭ служит основой для оперативной корректировки управления и повышения финансовых результатов.

Интеграция прогнозных моделей с экономическими расчетами улучшает качество оценок LCOE и доходности ВИЭ-проектов. Показана возможность использования краткосрочного и среднесрочного прогнозирования ветровой активности для оценки доходности ВЭС. Внедрение форсайт-подходов в прогнозирование перспектив отрасли поможет усовершенствовать стратегическое

планирование и укрепит инвестиционную привлекательность ветроэнергетики на длительный срок.

Сезонные флуктуации скорости ветра оказывают влияние на эксплуатационные показатели ВЭС, они приводят к необходимости менять параметры эксплуатации по сезонам, чтобы проекты сохраняли финансовую стабильность и объём выработки электрической энергии увеличивался. Ожидаемый рост средних скоростей ветра способен повысить NPV ВЭС на 3–5 %. Планирование ТО на этапы с пониженной ветровой активностью в сочетании с адаптивными подходами к эксплуатации повышает экономические показатели проектов ВЭС.

Поступающее от государства и частных инвесторов финансирование для ВЭС порождает непосредственные и мультипликативные экономические эффекты, обосновывающие реализацию соответствующих инициатив в изучаемых регионах.

Прямая и многократно умножаемая экономическая отдача от вложений в ВЭС-проекты служит основанием для реализации ветроэнергетических инициатив в рассмотренных территориях. Ростовская область имеет лучшие показатели экономического развития и поэтому считается предпочтительным регионом для внедрения ВИЭ-проектов.

При оценке влияния уровней ветровой активности на производительность и экономический эффект работы ВЭС был сделан вывод, высокая ветровая активность заметно повышает выработку и экономическую отдачу проектов ВИЭ.

## Заключение

Глобальные изменения климата и настоятельная потребность в переходе на модель экономики с низким уровнем углеродообразования ставят энергетику ветра в число приоритетов энергетической политики. Развитие проектов, использующих силу ветра, не ограничивается сокращением эмиссий парниковых газов; помимо этого снижается зависимость от импорта топлива, а государства получают возможность самостоятельно удовлетворять энергетические потребности. Параллельно внедрение ветроэнергетических решений повышает стабильность национальных систем энергоснабжения и устойчивость к внешним и внутренним рискам.

Хотя нынешний уровень технических решений заметно вырос, масштабное развитие ветроэнергетики на территории России сдерживается совокупностью факторов – в частности вопросами экономической рентабельности, дефицитом сетевой инфраструктуры и существующими инженерно-технологическими ограничениями. Средняя эксплуатационная отдача ветряных турбин составляет порядка 40%, объяснение – переменчивость ветровых условий и ограниченная возможность полноценно извлечь кинетическую энергию воздушного потока. К тому же удалённость площадок выработки от зон потребления увеличивает объём первоначальных инвестиций, необходимых для сооружения линий электропередачи и организации транспортировки выработанной электроэнергии.

Темпы наращивания ветровой генерации зависят от переплетения финансовых, инженерно-технических и климатических условий, вследствие чего требуются интегрированные методики для построения прогнозов и математического моделирования. На текущем этапе на территории Российской Федерации не сформирован единый подход к выявлению показателей ветрового режима, необходимых для оценки условий на предполагаемой площадке установки ВЭС; отсутствуют стандартизированные методики прогнозирования для краткосрочных и среднесрочных периодов. Устранение указанного пробела требует создания согласованных правил и методологических стандартов, гарантирующих

сопоставимую и юридически корректную оценку ветрового ресурса при проектировании и эксплуатации ВЭС.

Изучение рентабельности инвестиций в парки ветроэнергоустановок затрудняется необходимостью интегральной проработки ряда параметров, соотношения стоимости заменяющего топлива и расходов на ветряные агрегаты; учёта реальных ветровых условий; режимов работы ВЭУ, проявляющихся при вводе в общую структуру энергосистемы. По мере совершенствования конструктивных решений ветряных агрегатов и снижения себестоимости оборудования ожидается заметный рост сектора ветроэнергетики и параллельное снижение удельной цены вырабатываемой электроэнергии.

В исследовании выполнен межрегиональный разбор параметров – усреднённой ветровой скорости, выраженности её сезонных изменений, годового объёма генерации электроэнергии и сезонных индикаторов КИУМ. Сопоставление проведено по двум территориальным единицам, Ростовской области и Исык-Кульской области. Комплексная оценка экономических индикаторов в секторе ВИЭ создаёт базу для оперативной корректировки режимов эксплуатации и повышения конечной экономической результативности ветровых проектов.

В ходе выполнения работы установлено, что обработка больших объёмов данных с целью получения экономических показателей целесообразно проводить с помощью готовых цифровых решений.

Выводы проведённого исследования подтвердили, что создание цифровой платформы для оценки финансовых и экономических параметров проектов ветряной энергетики имеет высокую прикладную ценность и целесообразно для внедрения.

В диссертационной работе представлены исследовательские итоги и сформулированы выводы. Показана необходимость создания цифровых инструментов для контроля экономических параметров ветрогенерации в период перехода в энергетике; выявлена потребность в усилении инвестиционного статуса ВИЭ-проектов. Нынешние методики расчёта отдачи от ВЭС не учитывают

климатические флуктуации и региональные особенности, из-за этого прогнозы становятся менее надёжными, а инвестиционная неопределённость растёт.

Автор разработал цифровую методику моделирования, содержащую алгоритмы для изучения потоков ветра по сезонам и регионам; в алгоритмах используют вейвлет-преобразования, вычисляют показатель КИУМ и рассчитывают коэффициент структурной мощности. Система выполняет оценку степени задействования инсталляционной мощности ветропарков в режиме онлайн и даёт возможность корректировать режимы эксплуатации ветропарков в ответ на сезонные климатические колебания.

В диссертации создана математико-экономическая модель для оценки финансовой отдачи от интеграции ВЭУ с учётом местного недостатка энергетических ресурсов, генерации, подлежащей замене, и параметров тарифообразования. Показано, что введение цифровых систем мониторинга при изменяющихся режимах работы ВЭС приводит к сокращению эксплуатационных расходов, балансировке нагрузки на оборудование и продлению периода экономической рентабельности объектов.

В ходе апробации исследовали два региона – Ростовской области и Исык-Кульской области; ветровые условия там отличаются, энергопрофили регионов различаются. В зимние месяцы внедрение адаптивного алгоритма регулирования мощности ВЭС в указанных регионах увеличило генерацию до 11,5% и одновременно вызвало сопоставимое повышение NPV проектов.

Расчёты IRR, NPV и LCOE показали, что годовая изменчивость ветра заметно влияет на рентабельность проектов. Вышеизложенное подтверждает, что созданная методика служит универсальным инструментом при принятии инвестиционных решений. Подготовлены практические рекомендации для АО «Новавинд» и других операторов ВЭС по использованию модели при планировании ввода новых мощностей и модернизации существующих объектов.

Выводы исследования легли в основу концепции гарантирования стабильного развития энергетического комплекса России. Полученные материалы пригодны при

принятии стратегических решений и при организации проектной реализации во время возведения сооружений ВИЭ.

Проведённая работа позволила реализовать заявленные в диссертации цели; поставленные задачи выполнены, что подтверждает научную и практическую ценность исследования.

Работа имеет практическую значимость, полученные выводы подлежат прямой реализации на промышленных предприятиях, в организациях энергетического профиля и в региональных программах по ВИЭ. Апробация результатов проводилась на материалах Ростовской и Иссык-Кульской областей и подтвердила экономическую целесообразность.

Созданная в исследовании методология вместе с выполненными расчётами образует надёжную отправную платформу для дальнейших теоретических и практических работ по оценке экономической отдачи ветроэнергетики; полученные результаты служат основой стратегического планирования энергетики в России, причём аналогичные подходы пригодны для государств, входящих в СНГ.

Авторский анализ контроля и обработки данных по ВЭС Ростовской и Иссык-Кульской областей выявил ряд результатов. Выполнен сравнительный разбор сезонных ветровых режимов и КИУМ в Ростовской и Иссык-Кульской областях. Показатели экономической генерации электроэнергии приведены фрагментарно на основе доступных данных.

Наилучший способ снабжения электричеством заданной территории – создание сбалансированного комплекса различных генераторов с координацией на федеральном, региональном и муниципальном уровнях. С такой точки зрения стоит рассматривать комплексные электростанции как средство улучшения работы энергосистемы. Окончательный выбор технических решений должен учитывать характер потребления энергии, темпы демографического роста, плотность населения, масштаб индустриального развития, экономические преобразования и природные условия вместе с особенностями рельефа территории.

Автор выдвинул гипотезу, при плановом увеличении суммарной мощности и снижении удельной стоимости производства электроэнергии за счёт

ветрогенерации достижение поставленных целей реализуемо. Одним из практических механизмов воплощения идеи может служить внедрение цифрового мониторинга экономико-технических параметров работы ветроэлектростанций, что соотносится с развитием российского ТЭК. Для повышения качества работы электроэнергетической системы страны целесообразно рассматривать комбинированные электростанции.

Использование ветровой энергии внутри страны открывает широкие возможности для расширения структуры национального энергопотребления, снижая зависимость от иностранных поставок топлива и уменьшая нагрузку на природную среду. Сочетание ветряных технологий с мощностями атомной отрасли приносит практическую пользу, объединение усилий служит основой для комбинированных комплексов выработки и распределения электроэнергии. Интеграция повышает надёжность электроснабжения и снижает текущие эксплуатационные издержки.

Госкорпорация «Росатом» расширяет портфель проектов, объединяющих мощные атомные энергоблоки с парками ветрогенераторов, что повышает надёжность работы российской электроэнергетики. Цель инициатив – повысить надёжность поставок электроэнергии, сократить углеродные выбросы и укрепить стратегическую энергетическую защищённость государства. Слияние ядерной генерации с переменной ветровой выработкой создаёт основу для гибридных систем, в которых необходимо сочетание стабильной высокой мощности и генерации, приспособляющейся к погодным условиям. Реализация таких схем помогает нарастить долю возобновляемой энергии в суммарном энергетическом балансе и снижает риски, вызванные колебаниями нагрузки и нестабильностью погоды.

Использование актуальных цифровых решений и предиктивных моделей в энергоснабжении повышает продуктивность согласования процессов генерации и передачи электричества. Планомерная обработка климатических данных и исследование траекторий технологического развития показывают, что гибридные

энергетические установки улучшают надёжность подачи электроэнергии и уменьшают зависимость от ископаемых источников.

Сегодня сектор ветроэнергетики имеет резерв для расширения мощностей как на международной арене, так и в пределах России. Прогнозы указывают, что до 2035 года планируется ввести ещё 15 ГВт ВИЭ-мощностей для выполнения глобальных климатических обязательств. При всех известных ограничениях и недостатках эксплуатация ветряных турбин не сопровождается образованием вредных выбросов и не является источником загрязнения окружающей среды. Производство электроэнергии ветром снижает потребность в водных ресурсах, поскольку при выработке энергии ветром вода не задействуется.

Глобальная энергетическая система во многом складывается под влиянием геополитических факторов. От них зависят возможность переноса технологий, наличие торговых ограничений в цепочках поставок и способность согласовывать общие механизмы регулирования внешнеэкономических отношений для устранения торговых барьеров на международном уровне.

## Список сокращений

- АЭС — атомная электростанция
- ВИЭ — возобновляемые источники энергии
- ВЭС — ветроэлектростанция
- ВЭУ — ветроэнергоустановка; ветроагрегат; ветряная турбина
- ГЭС — гидроэлектростанция
- ЕЭС России — Единая энергетическая система России
- ЕС — Европейский союз
- КР — Кыргызская Республика
- КУИМ — коэффициент использования установленной мощности электростанции
- РФ — Российская Федерация
- Росатом — Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
- Росстат — Федеральная служба государственной статистики
- САЭП — система автономного электроснабжения
- САПР — система автоматизированного проектирования
- СНГ — Содружество Независимых Государств
- США — Соединенные Штаты Америки
- ТЭС — теплоэлектростанция
- GWEC — Global Wind Energy Council (Глобальный совет по ветроэнергетике)
- IRENA — International Renewable Energy Agency (Международное агентство по возобновляемым источникам энергии)
- IRR — Internal Rate of Return (внутренняя норма доходности)
- LCOE — Levelized Cost of Energy (приведенная себестоимость электроэнергии)
- NPV — Net Present Value (чистая приведенная стоимость)
- SCADA — Supervisory Control and Data Acquisition (диспетчерское управление и сбор данных)

## Список литературы

1. Глазьев, С. Ю. Глобальная трансформация через призму смены технологических и мирохозяйственных укладов / С. Ю. Глазьев // *AlterEconomics*. – 2022. – Т. 19, № 1. – С. 93–115.
2. 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_328854/) (дата обращения: 08.06.2025).
3. Райзберг, Б. А. Современный экономический словарь / Б. А. Райзберг, Л. Ш. Лозовский, Е. Б. Стародубцева. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 512 с.
4. 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.
5. Политическая экономия Д. Рикардо [Электронный ресурс] // *Ricardoeconomy*: [сайт]. – Режим доступа: <https://ricardoeconomy.tilda.ws/> (дата обращения: 18.05.2025).
6. Хачатуров, Т. С. Эффективность капитальных вложений / Т. С. Хачатуров. – М.: Экономика, 1979. – 335 с.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Экономическая теория. Микроэкономика – 1,2. Мезоэкономика: учебник / под ред. Г. П. Журавлева. – 7-е изд. – М.: Дашков и К, 2016. – 934 с.
11. 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.
12. Наминова, К. А. Современное состояние страхования рисков сельскохозяйственных организаций с государственной поддержкой в России / К. А. Наминова // *Апробация*. – 2016. – № 7 (46). – С. 100–105.
13. Журавлева, Г. П. Экономическая теория. Микроэкономика: учебник / Г. П. Журавлева, Ю. А. Поздняков, Н. А. Поздняков. – М.: ИНФРА-М, 2010. – 400 с.

14. Большой экономический словарь / под ред. А. Н. Азрилияна. – 7-е изд., доп. – М.: Институт новой экономики, 2007. – 1472 с.
15. Соркин, С. Л. Эффективность внешнеэкономической деятельности: понятие, измерение и оценка / С. Л. Соркин. – Гродно: РГГУ, 2011. – 130 с.
16. Маркс, К. К критике политической экономии / К. Маркс. – М.: Либроком, 2012. – 178 с.
17. Поликарпов, М. Д. Рассмотрение понятия экономической эффективности в современных условиях / М. Д. Поликарпов // Вестник науки. – 2023. – № 5 (62). – С. 75–80.
18. Хижа, О. Н. Эволюция подходов к трактовке понятия «эффективность» в науке / О. Н. Хижа // Вестник Челябинского государственного университета. – 2018. – № 7 (417). – С. 21–27.
19. Оборина, О. Е. Экономическая эффективность: понятие и сущность / О. Е. Оборина // Молодой ученый. – 2020. – № 23 (313). – С. 427–429.
20. 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.
21. Козырев, В. М. Основы современной экономики: учебник / В. М. Козырев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 432 с.
22. 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.
23. Belton, V. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach / V. Belton, T. J. Stewart. – Berlin: Springer, 2002. – 391 p.
24. Бариленко, В. И. Анализ хозяйственной деятельности: учебное пособие / В. И. Бариленко. – М.: Омега-Л, 2013. – 363 с.
25. 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).
26. 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.
27. Чистый денежный поток [Электронный ресурс] // Финансовый анализ: [сайт]. – Режим доступа: [https://1fin.ru/Finansovyy\\_slovary/Chistyy\\_deneghnyy\\_potok](https://1fin.ru/Finansovyy_slovary/Chistyy_deneghnyy_potok) (дата обращения: 07.04.2025).
28. 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.

29. Free cash flow | Свободный денежный поток [Электронный ресурс] // Cbonds: [сайт]. – Режим доступа: <https://cbonds.ru/glossary/free-cash-flow/> (дата обращения: 09.06.2025).
30. 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).
31. 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.
32. 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.
33. 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).
34. Боголюбова, Н. П. Микроэкономическая теория: фирма в производстве и в сфере обмена: учебное пособие / Н. П. Боголюбова. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2018. – 189 с.
35. ГОСТ Р 51380-99. Энергосбережение. Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции их нормативным значениям. Общие требования. Дата введения 2000–09–01. 6 с. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.elec.ru/library/gosts\\_e01/gost\\_r\\_51380-99.pdf](https://www.elec.ru/library/gosts_e01/gost_r_51380-99.pdf) (дата обращения: 21.12.2025).
36. Савицкая, Г. В. Критерии и показатели экономической эффективности бизнеса / Г. В. Савицкая // Журнал исследований по управлению. – 2017. – Т. 3, № 2. – С. 26–48.
37. 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).
38. 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](https://www.cfin.ru/management/strategy/plan/industry_keyindicators.shtml) (дата обращения: 23.05.2025).
39. Агапова, И. И. История экономической мысли: курс лекций / И. И. Агапова. – М.: Экмос, 1998. – 245 с.
40. 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.

41. 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).
42. Борисов, М. Г. Развитие систем хранения электрической энергии: новые возможности для стран Востока / М. Г. Борисов // Восточная аналитика. – 2021. – № 1. – С. 22–32.
43. 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).
44. 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.
45. 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_325453/) (дата обращения: 08.06.2025).
46. 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).
47. 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).
48. 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).
49. Энергоэффективность // Межрегиональная Энергосберегающая Компания. [Электронный ресурс]. URL: <https://mec-energo.ru/energoeffektivnost-predpriyatij> (дата обращения: 21.12.2025).
50. Возможно ли рассчитать окупаемость ВИЭ\* в России? // Энергетика и промышленность России. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eprussia.ru/epr/364/5415968.htm> (дата обращения: 21.12.2025).
51. Что говорят эксперты ветроэнергетики о будущем отрасли // Power Green. [Электронный ресурс]. 17.08.2022. URL: <https://powergreen.pro/trendy/161-cto-govoryat-eksperty-vetroenergetiki-o-budushchem-otrasli> (дата обращения: 21.12.2025).
52. Структура формирования цены на рынке электроэнергии [Электронный ресурс] // Калужская сбытовая компания: [сайт]. – Режим доступа: <https://kskkaluga.ru/legal/pricing/electricity-market-price-formation/> (дата обращения: 12.06.2025).

53. 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).
54. 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).
55. 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).
56. 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.
57. Статистика ВИЭ [Электронный ресурс] // Ассоциация развития возобновляемой энергетики: [сайт]. – Режим доступа: <https://rreda.ru/industry/statistics/> (дата обращения: 01.05.2025).
58. 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).
59. 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).
60. Шевченко, М. В. Состояние и перспективы развития зарубежной ветроэнергетики / М. В. Шевченко // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2005. – № 4. – С. 139–145.
61. 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).
62. 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).
63. 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).

64. ЕЭС 2022 [Электронный ресурс] // Системный оператор единой энергетической системы: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.sops.ru/functioning/ups/ups2022/> (дата обращения: 09.06.2025).
65. 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#BSJ6soUObjJlj0TF1> (дата обращения: 08.06.2025).
66. 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).
67. Экономика и анализ деятельности промышленного предприятия: учебное пособие / Н. Е. Калинина, Н. А. Кузнецова, О. С. Норкина [и др.]. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 124 с.
68. Комплексный экономический анализ: учебное пособие / Л. Н. Бондарева, И. В. Климентьева, М. М. Микушина [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2018. – 152 с.
69. Шеремет, А. Д. Теория экономического анализа / А. Д. Шеремет. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 365 с.
70. 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.
71. Дзедик В., Усачева И., Моткова А. Анализ эффективности применения накопителей энергии в различных типах электроэнергетических систем // Энергетическая политика. [Электронный ресурс]. 03.04.2023. URL: <https://energy-policy.ru/analiz-effektivnosti-primeneniya-nakopitelej-energii-v-razlichnyh-tipah-elektroenergeticheskikh-sistem/energoperehod/2023/04/03/> (дата обращения: 21.12.2025).
72. Болквядзе, И. Р. Концепция системы мониторинга экономического состояния промышленного предприятия [Электронный ресурс] / И. Р. Болквядзе // Корпоративный менеджмент: [сайт] – Режим доступа: <https://www.cfin.ru/bandurin/article/sbrn05/03.shtml> (дата обращения: 19.06.2025).
73. Оценка эффективности предприятия: критерии и методики [Электронный ресурс] // Bitcop: [сайт]. – Режим доступа: <https://bitcop.ru/blog/ocenka-jeffektivnosti-predpriyatija-kriterii-i-metodiki> (дата обращения: 25.04.2023).
74. 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.
75. 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).

76. 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.
77. Болдырев, С. В. Использование вейвлет-преобразования в системах обработки и анализа сигналов / С. В. Болдырев // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 7. – С. 93–94.
78. 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).
79. 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.
80. 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_354840/) (дата обращения: 08.06.2025).
81. Мокшин М. Ю., Путилов А. В., Римская О. Н. Рынок ветроэнергетики в России и за рубежом: проблемы и перспективы развития. — Стратегические решения и риск-менеджмент, 2024, т. 15, № 4, с. 338–347.
82. ГОСТ Р 51237–98 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. – М.: Госстандарт России, 1998. – 11 с.
83. Энергия ветра: дешевле ли она в сравнении с традиционными киловаттами? // Рамблер/Финансы (материал РИА «ФедералПресс»). [Электронный ресурс]. 23.03.2023. URL: <https://finance.rambler.ru/economics/50434678-energiya-vetra-deshevle-li-ona-v-sravnenii-s-traditsionnymi-kilovattami/> (дата обращения: 21.12.2025).
84. В Москве в 2025 году будут действовать новые тарифы на электрическую энергию [Электронный ресурс] // Мосэнергосбыт: [сайт]. – 2024. – 20 дек. – Режим доступа: <https://www.mosenergobyt.ru/individuals/news/v-moskve-v-2025-godu-budut-deystvovat-novye-tarify-na-elektricheskuyu-energiyu/> (дата обращения: 20.06.2025).
85. Российская электроэнергетика: 20 лет реформ: аналитический отчет. [Электронный ресурс] // Аналитический центр ТЭК: [сайт]. – Режим доступа: [https://actek.group/russian\\_electric\\_power\\_industry/](https://actek.group/russian_electric_power_industry/) (дата обращения: 14.06.2025).
86. 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).
87. Калашников, А. Е. Определение базовых свойств умной ветроэлектростанции малой мощности с наиболее эффективными характеристиками / А. Е. Калашников, Н. А. Устинов. — Текст : электронный //

- Молодой ученый. — 2018. — № 6 (192). — С. 36–39. — URL: <https://moluch.ru/archive/192/48337/> (дата обращения: 21.12.2025).
88. Мокшин М. Ю., Путилов А. В. Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования. — Энергетическая политика, 2023, № 12 (191), с. 80–91.
89. Зубакин, В. А. Экономическая эффективность электростанций на возобновляемых источниках энергии на примере показателя LCOE / В. А. Зубакин // СОК. — 2024. — № 10. — С. 72–75.
90. 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.
91. Ланьшина, Т. Прогноз развития ВИЭ в России до 2035 года / Т. Ланьшина // Научный вестник ИЭП им. Гайдара. — 2019. — № 9. — С. 40–47.
92. 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.
93. 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_396203/) (дата обращения: 08.06.2025).
94. 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).
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. 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).
97. Хемраев, М. Специфика моделирования экономических процессов в условиях цифровизации / М. Хемраев // Экономика и бизнес: теория и практика. — 2022. — № 8. — С. 234–236.

98. 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.
99. 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).
100. 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/](https://up-pro.ru/library/information_systems/automation_project/cifrovoe-imitacionnoe-modelirovanie/) (дата обращения: 01.06.2025).
101. 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.
102. 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.
103. 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).
104. 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).
105. 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.
106. 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).
107. «Росатом» внедрит уникальную систему управления электроэнергией на Кармалиновской ВЭС [Электронный ресурс] // Сетевое издание RUBЕЖ: [сайт]. – 2025. – 06 марта. – Режим доступа: <https://ru-bezh.ru/press-releases/rosatom-vnedrit-unikalnuyu-sistemu-upravleniya-elektroenergiey-n> (дата обращения: 06.05.2025).

108. Бушукина, В. И. Особенности развития возобновляемой энергетики в мире и в России / В. И. Бушукина // Финансовый журнал. – 2021. – Т. 13, № 5. – С. 93–107.
109. 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).
110. 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/ck53fh9u065bliiscovlumxq02gqvkcx/202408\\_RRED\\_A\\_annual\\_RES\\_report.pdf](https://rreda.ru/upload/iblock/c86/ck53fh9u065bliiscovlumxq02gqvkcx/202408_RRED_A_annual_RES_report.pdf) (дата обращения: 13.06.2025).
111. Ветроэнергетика в возобновляемой энергетике [Электронный ресурс] // Renwex 2026: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.renwex.ru/ru/ii/vetroehnergetika/> (дата обращения: 03.06.2025).
112. 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).
113. 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).
114. 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_399657/) (дата обращения: 08.06.2025).
115. 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/) (дата обращения: 18.06.2025).
116. Ростовская область в третий раз стала лидером среди регионов по ветрогенерации // Официальный портал Правительства Ростовской области (donland.ru). [Электронный ресурс]. 12.10.2023. URL: <https://www.donland.ru/news/24263/> (дата обращения: 12.10.2023).
117. 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).

118. 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](https://movegreen.kg/wp-content/uploads/2022/09/research_redo_29_august_final-1-1.pdf) (дата обращения: 12.06.2025).
119. 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).
120. 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](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2023.pdf) (дата обращения: 06.05.2025).
121. Шевченко, А. 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).
122. 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).
123. Цены в России – 2024 [Электронный ресурс] // Росстат: [сайт]. – Режим доступа: [http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Cena\\_2024.pdf](http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Cena_2024.pdf) (дата обращения: 18.06.2025).
124. Ветроэнергетическая установка (ВЭУ) // Neftegaz.RU. [Электронный ресурс]. 16.05.2013. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/elektrostantsii/141961-vetroenergeticheskaya-ustanovka-veu/> (дата обращения: 21.12.2025).
125. ГОСТ Р 54418.12.3–2012. Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 12-3. Методы испытаний для определения количества вырабатываемой электроэнергии. — М.: Стандартинформ, 2014. — 6 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293775/4293775405.pdf> (дата обращения: 21.12.2025).
126. Способы повышения эффективности работы ветроэнергетических установок // ElectricalSchool.info. [Электронный ресурс]. URL: <https://electricalschool.info/wind/2853-povysheniye-effektivnosti-vetroenergeticheskikh-ustanovok.html> (дата обращения: 21.12.2025).
127. 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).

128. 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.
129. Юсупов, К. И. Обзор методов прогнозирования в ветроэнергетике / К. И. Юсупов, С. Т. Тажибоев // Сантехника, отопление, кондиционеры. – 2022. – № 12 (252). – С. 70–73.
130. 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.
131. Степанов, С. Ф. Обеспечение эффективной работы мультимодульной ветроэлектростанции при изменении скорости ветра и нагрузки [Электронный ресурс] / С. Ф. Степанов, И. М. Павленко, Е. Т. Ембаев // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=11407> (дата обращения: 13.04.2025).
132. Первый зеленый гигаватт [Электронный ресурс] // Коммерсант: [сайт]. – 2023. – 23 нояб. – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/6350608> (дата обращения: 23.05.2024).
133. 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).
134. Сидоренко, Г. И. Модель оптимизации параметров ветровой электростанции / Г. И. Сидоренко, А. Алджамил // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). – 2021. – № 1 (82). – С. 35–41.
135. 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.
136. 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-znachitelnyimi-problemami/> (дата обращения: 07.11.2024).
137. 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.
138. Карамов, Д. Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии / Д. Н. Карамов // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 9 (104). – С. 133–140.
139. 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162194/) (дата обращения: 08.06.2025).

140. 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/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_136181/) (дата обращения: 08.06.2025).

141. 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.

142. Официальные курсы валют на заданную дату, устанавливаемые ежедневно // Банк России. [Электронный ресурс]. URL: [https://cbr.ru/currency\\_base/daily/](https://cbr.ru/currency_base/daily/) (дата обращения: 15.06.2025).

143. Карамов, Д. Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии / Д. Н. Карамов // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 9 (104). – С. 133–140.

144. Постановление Региональной службы по тарифам Ростовской области от 10.12.2024 № 628 «Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Ростовской области на 2025 год» // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <https://publication.pravo.gov.ru/document/6101202412120011> (дата обращения: 22.12.2025).

145. Тарифы на электроэнергию // Бишкекское предприятие электрических сетей (bipes.nesk.kg). [Электронный ресурс]. URL: <https://bipes.nesk.kg/ru/abonentam/tarif/> (дата обращения: 22.12.2025).

## Приложение 1.

## 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
<b>Преимущества</b>	Самый перспективный источник энергии. Экологически чистый источник. Условно возобновляемый источник энергии. Низкие эксплуатационные расходы, низкая начальная стоимость для производства энергии. Возможность размещения на пустырях и загрязненных территориях, Снижение безработицы	Возобновляемый источник при работе в замкнутом топливном цикле. Экономичность расходов топлива. Безвредность для окружающей среды (при строгой эксплуатации). Низкие эксплуатационные расходы после запуска.	Один их перспективных источников энергии. Экологически 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.	Экологически 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.	Нулевой баланс выбросов углекислого газа (CO <sub>2</sub> ), выделяемых при сжигании биомассы. Более низкие, чем у ископаемого топлива, выбросы диоксида серы, оксидов азота и окиси углерода.

	для регионов работы ВЭС.			Удерживает водные ресурсы для агропромышленности и животноводства.		Быстрый запуск и высокая Проста конструкции. Экономическая эффективность.	
<b>Недостатки</b>	<p>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%.</p>	<p>Опасность техногенной катастрофы при авариях на АЭС. Проблемы с хранением отработанного топлива. Высокие затраты на строительство и вывод из эксплуатации.</p>	<p>Технологические препятствия – нужна большая площадь для установки. Ограничение в использовании (домохозяйства, небольшие фермы, теплицы).</p> <p>Непостоянство источника - зависимость от погоды. В фотоэлектрических элементах батареи используются токсичные элементы. Низкая суточная плотность потока энергии</p>	<p>Зависимость от осадков и необходимость затопления больших площадей и переселения людей, что разрушает естественную наземную среду обитания для растений и животных. Дороговизна строительства ГЭС.</p>	<p>Низкая рентабельность. Ограничение территорий использования. Непостоянство генерации энергии.</p>	<p><u>Электростанции на угле.</u> Истощение источников на планете. Загрязнение окружающей среды вредными выбросами. Сложность и трудоемкость добычи (особенно 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</p>	<p>Относительно низкая плотность сырья, затрудняющая его транспортировку, хранение и дозирование. Высокая влажность биомассы, затрудняющая ее подготовку к использованию в энергетических целях. Низкая энергетическая ценность сырья. Некоторые отходы доступны только сезонно.</p>

			солнечного излучения.			на потребности в перевозках и выбросы метана. Потери природного газа в процессе его передачи. <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

## Приложение 2.

### Расчет показателей эффективности работы проектов ВЭС в Ростовской и Иссyk-Кульской областях

В условиях энергодефицита отдаленных 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 Иссyk-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:

Инвестиции на 1 МВт установленной мощности — 130 000 000 руб. (по данным ГК «Новавинд», Презентация 2024 года, ДСП)

Срок службы — 20 лет (рекомендации Минэкономразвития РФ)

Ставка дисконтирования — 10% (по рекомендациям Минэкономразвития РФ)

Годовой доход от реализации электроэнергии:

Ростовская область:  $10\,800\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \times 4,8 \text{ руб.} = 51\,840\,000 \text{ руб./год}$

Иссyk-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 показателей:

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 не високосном году

установленная мощность — номинальная мощность ВЭУ (например, 1 МВт)

фактическая выработка — сумма произведённой электроэнергии за год

**Расчёт для Ростовской области:** 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

$$\text{КИУМ} = 8\,700\,000 / 8\,760\,000 \approx \mathbf{0,198} \text{ или } \mathbf{19,8\%}$$

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

Иссык-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<sup>144</sup>**

Иссык-Кульская область: **1,2 руб./кВт·ч<sup>145</sup>** (по курсу 0,8 руб./сом за ед. электроэнергии)

Фактический доход от реализации электроэнергии по договорам ДММ в 2024 году составил:

Ростовская обл.:  $10,8 \text{ млн} \times 4,8 = \mathbf{51,84 \text{ млн руб.}}$

Иссык-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:

$$PV_t = \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (24)$$

<sup>144</sup> Постановление Региональной службы по тарифам Ростовской области от 10.12.2024 № 628 «Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Ростовской области на 2025 год» // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <https://publication.pravo.gov.ru/document/6101202412120011> (дата обращения: 22.12.2025).

<sup>145</sup> Тарифы на электроэнергию // Бишкекское предприятие электрических сетей (bipes.nesk.kg). [Электронный ресурс]. URL: <https://bipes.nesk.kg/ru/abonentam/tarif/> (дата обращения: 22.12.2025).

где:

$CF_t$  — 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) рассчитывается по формуле:

$$ДДП = PV = FV / (1 + r)^n \quad (26),$$

где:

$PV$  — 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.

### **Расчет потоков для исследуемых регионов**

Ростовская область. Исходные данные:  $CF = 51\,840\,000$  руб.,  $r = 10\% = 0,10$ ,  $I_0 = 130\,000\,000$  руб., срок: 20 лет (табл.1).

В таблице 1 представлены расчеты дисконтированного потока для Ростовской области за 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

Источник: составлено автором

Значения  $\sum CF_t \approx 476,32$  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:

10%	476,32 млн	+346,32.
15%	345 млн	+215 млн.
20%	265 млн	+135 млн.
25%	190 млн	+60 млн.
<b>29%</b>	<b>130 млн</b>	<b>0 руб.</b>
30%	125 млн	-5 млн.

Таким образом, проект ВЭС будет выгоден проект будет выгоден, пока стоимость денег во времени ниже 29% в год. Если ставка выше — вложения уже не окупятся.

Иссык-Кульская область. Исходные данные:  $CF = 10\,440\,000$  руб.,  $r = 10\% = 0,10$ ,  $I_0 = 130\,000\,000$  руб. (табл.2).

В таблице 2 представлен расчет дисконтированного потока для Иссык-Кульской области за 20 лет

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

Источник: составлено автором

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 относиться 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 ветровым потенциалом 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 отношение:

$$\text{Мультипликатор} = \frac{\text{Прирост ВРП}}{\text{Инвестиции}}$$

Ростовская область: мультипликатор: 1,5–2,0. Предполагаемый мультипликатор составляет 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 на основе данных Всемирного банка и Минэкономики КР.

ВРП:  $130 \times 1,7 = 221$  млн,  $130 \times 2,2 = 286$  млн. руб.

**Вывод:** Учитывая отрицательное значение 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**

Расчеты показали, что Ростовская область показывает полную окупаемость ВЭУ при стандартных рыночных условиях:  $NPV = +346$  млн руб.,  $IRR = 29\%$ .

Иссык-Кульская область — проект с высоким мультипликатором (до 2,2), но требует субсидирования:  $NPV$  отрицательное,  $IRR < 7\%$ . Модель применима в управлении региональными программами развития ВИЭ.