

Виртуальные электростанции: вызовы, возможности и преимущества на современном национальном и международных энергетических рынках

Любимова Наталия Геннадьевна

Д-р экон. наук, проф. каф. экономики и управления в топливно-энергетическом комплексе
ORCID: 0000-0003-4021-4487, e-mail: ng_lyubimova@guu.ru

Флакسمан Алина Сергеевна

Канд. экон. наук, доц. каф. экономики и управления в топливно-энергетическом комплексе
ORCID: 0000-0001-8122-0862, e-mail: as_flaksmman@guu.ru

Панков Дмитрий Анатольевич

Канд. экон. наук, доц. каф. экономики и управления в топливно-энергетическом комплексе
ORCID: 0009-0005-4237-0514, e-mail: da_pankov@guu.ru

Государственный университет управления, г. Москва, Россия

Аннотация

Инновационное направление в энергетике – виртуальные электростанции (далее – ВЭС) – открывает новые горизонты для модернизации отрасли. Эта технология не только отвечает современным требованиям к гибкости и устойчивости энергосистем, но и способствует их более эффективной интеграции. Консолидируя распределенные энергетические ресурсы, ВЭС способствуют укреплению надежности сетей и достижению экономической эффективности. Несмотря на очевидные преимущества, интеграция ВЭС в существующие энергетические рынки сопряжена с серьезными препятствиями. Ключевой проблемой остается дефицит адекватной нормативно-правовой базы, способной учесть специфические особенности этих инновационных систем. Данное обстоятельство диктует острую потребность в разработке инновационных подходов к регулированию деятельности ВЭС. Настоящее исследование имеет своей целью выявление и детальное рассмотрение потенциальных возможностей применения ВЭС на современных энергетических площадках. Методологической основой работы служит комплексный анализ СТЭЭП, охватывающий социальные, технологические, экологические, экономические и политические аспекты функционирования виртуальных электростанций. Данный инструментарий позволяет всесторонне оценить как вызовы, так и потенциальные выгоды от внедрения ВЭС. Установлена необходимость создания благоприятной среды для развития ВЭС через формирование соответствующей политической и регуляторной инфраструктуры. Только комплексный подход, учитывающий все аспекты СТЭЭП-анализа, способен обеспечить полноценную реализацию потенциала виртуальных электростанций в современной энергетике.

Ключевые слова

Виртуальные электростанции, вызовы, возможности, прибыльность, изменение климата, устойчивость, энергетические рынки

Для цитирования: Любимова Н.Г., Флакسمан А.С., Панков Д.А. Виртуальные электростанции: вызовы, возможности и преимущества на современном национальном и международных энергетических рынках // Вестник университета. 2025. № 4. С. 158–167.

© Любимова Н.Г., Флакسمан А.С., Панков Д.А., 2025.

Статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0. всемирная (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Virtual power plants: challenges, opportunities and advantages in modern national and international energy markets

Natalya G. Lyubimova

Dr. Sci. (Econ.), Prof. at the Economics and Management in the Fuel and Energy Complex
ORCID: 0000-0003-4021-4487, e-mail: ng_lyubimova@guu.ru

Alina S. Flaksman

Cand. Sci. (Econ.), Assoc. Prof. at the Economics and Management in the Fuel and Energy Complex
ORCID: 0000-0001-8122-0862, e-mail: as_flaksman@guu.ru

Dmitry A. Pankov

Cand. Sci. (Econ.), Assoc. Prof. at the Economics and Management in the Fuel and Energy Complex
ORCID: 0009-0005-4237-0514, e-mail: da_pankov@guu.ru

State University of Management, Moscow, Russia

Abstract

An innovative trend in the energy sector such as virtual power plants (hereinafter referred to as VPPs) opens new horizons for modernization of the industry. This technology not only meets modern requirements for flexibility and sustainability of power systems, but also contributes to their more efficient integration. By consolidating distributed energy resources, VPPs contribute to grid reliability and economic efficiency. Despite the obvious advantages, VPPs integration into existing energy markets is fraught with serious obstacles. The key issue remains in the lack of an adequate regulatory framework that can consider the specific features of these innovative systems. This fact dictates an urgent need for developing innovative approaches to VPPs regulation. The study aims to identify and examine in detail the potential application of VPPs in modern energy sites. The methodological basis is a comprehensive STEEP analysis covering social, technological, environmental, economic, and political aspects of virtual power plants. This toolkit allows for a comprehensive assessment of both the challenges and potential benefits of implementing VPPs. The need to create a favorable environment for VPPs development through forming appropriate political and regulatory infrastructure has been established. Only a comprehensive approach, considering all aspects of STEEP analysis, can ensure full realization of virtual power plants potential in modern energy sector.

Keywords

Virtual power plants, challenges, opportunities, profitability, climate change, sustainability, energy markets

For citation: Lyubimova N.G., Flaksman A.S., Pankov D.A. (2025) Virtual power plants: challenges, opportunities and advantages in modern national and international energy markets. *Vestnik universiteta*, no. 4, pp. 158–167.



ВВЕДЕНИЕ

Традиционные энергетические системы все чаще испытывают нагрузку из-за стареющей инфраструктуры и растущего спроса на электроэнергию. Проблемы, такие как перегрузка сетей, сложности в коммуникации и дисбаланс между предложением и спросом, становятся все более актуальными. Неспособность сетей интегрировать новые технологии, такие как возобновляемые источники энергии, усугубляет их. Домохозяйства и предприятия нуждаются в лучшем понимании потребления энергии и принятии финансово обоснованных решений, что текущая инфраструктура сетей не поддерживает в достаточной мере.

Будущее распределительных сетей требует перехода от пассивной эксплуатации к активному управлению, с полным использованием сетей и лучшей интеграцией DER. Технологии «умных» сетей, в частности виртуальные электростанции (далее – ВЭС), необходимы для решения этих задач [1]. ВЭС обеспечивают двустороннюю связь между поставщиками и потребителями, улучшая согласованность спроса и предложения и снижая затраты для обеих сторон.

Быстрое развитие технологий и растущий спрос на электроэнергию на национальных и международных рынках стимулируют развитие ВЭС. Эти платформы постоянно обновляются новыми технологиями для оптимизации потребления электроэнергии и повышения производительности сетей.

Глобальное стремление к расширению использования экологически чистых источников энергии сталкивается с серьезным препятствием: недостаточной изученностью барьеров, препятствующих полноценной интеграции ВЭС в энергетический рынок. Для преодоления этого барьера необходимы масштабные научные изыскания, направленные на создание инновационных методологий и концептуальных моделей, способствующих эффективному внедрению и функционированию ВЭС в рыночных условиях.

Настоящее исследование направлено на оценку вызовов, возможностей и преимуществ ВЭС на существующих энергетических рынках, а также на выявление факторов, ограничивающих их развитие и внедрение.

Методологической основой исследования выступает комплексный аналитический подход, позволяющий всесторонне оценить потенциал и ограничения интеграции ВЭС в существующую энергетическую инфраструктуру. Применение инструментария СТЭЭП («социальный», «технологический», «экологический», «экономический», «политический») обеспечивает глубокий анализ внешних факторов, оказывающих влияние на энергетическую отрасль. Такой подход позволяет участникам рынка формировать более четкое представление об условиях функционирования виртуальных электростанций.

Значимость настоящего исследования определяется ее вкладом в понимание актуальных вызовов, связанных с концепцией ВЭС в современных рыночных реалиях. Всеобъемлющий характер исследования способствует принятию более взвешенных стратегических решений и обеспечивает соответствие нормативным требованиям при планировании развития виртуальных электростанций. Такой подход гарантирует учет всех существенных внешних факторов в процессе стратегического планирования и развития ВЭС.

ОСОБЕННОСТИ ВЭС

Трансформация энергетического сектора стала возможной благодаря масштабной цифровизации отрасли. Внедрение «умных» измерительных систем создало принципиально новый формат взаимодействия между энергооператорами и потребителями. Существенный вклад в эту трансформацию внесло появление инновационных рыночных субъектов, включая ВЭС, механизмы регулирования спроса (DR) и накопители энергии (ESS). Эти новаторские решения значительно повысили надежность энергоснабжения, что особенно актуально в контексте растущего применения возобновляемых источников энергии (RES) [2].

Виртуальные электростанции представляют собой гибкую ICT-структуру, создающую оптимальные условия для производства, распределения и потребления «зеленой» энергии [3]. Они олицетворяют прогрессивный подход к энергоменеджменту, обеспечивая рациональное использование энергоресурсов в децентрализованной среде посредством интеллектуальных систем управления. В этой парадигме потребители становятся активными участниками энергетического рынка, совмещая функции производителей и потребителей энергии. ВЭС также служат ключевым инструментом для интеграции возобновляемой энергетики и укрепления стабильности сетей, демонстрируя повышенную адаптивность к погрешностям в прогнозировании генерации и потребления [4].

Стабильное функционирование ВЭС напрямую зависит от слаженной работы комплекса технологических решений, охватывающего аппаратную часть, программные компоненты и коммуникационные системы. Любые технические неполадки, будь то сбои оборудования, дефекты в программном обеспечении или нарушения связи, могут существенно подорвать операционную деятельность ВЭС и их экономическую эффективность. Минимизация подобных рисков требует внедрения комплексной системы профилактического обслуживания и непрерывного мониторинга для оперативного обнаружения и устранения потенциальных неисправностей.

Финансовая эффективность ВЭС может подвергаться влиянию рыночных флуктуаций в области спроса, предложения и ценообразования. Для минимизации этих рисков операторы ВЭС применяют стратегию диверсификации доходных источников, активно участвуя в различных сегментах рынка – от оптовой торговли энергией до рынков мощности и вспомогательных услуг. Такой многовекторный подход позволяет снизить зависимость от ценовых колебаний в отдельных сегментах и обеспечить стабильный финансовый поток [5].

ПРЕДЛОЖЕННАЯ МНОГОАСПЕКТНАЯ СТРУКТУРА

В работе представлена комплексная аналитическая модель, выступающая методологической основой всестороннего изучения потенциала, конкурентных преимуществ и системных вызовов, связанных с интеграцией виртуальных электростанций в динамичную архитектуру современных энергетических рынков. В качестве исследовательского инструментария применена расширенная версия СТЭП-анализа, позволяющая синтезировать междисциплинарные данные и оценить взаимовлияние пяти ключевых доменов, определяющих успешность энергетических инноваций. Методология интегрирует традиционные параметры технологической осуществимости, экономической рентабельности и экологического следа, акцентирует значимость социокультурных паттернов, регуляторно-политических механизмов, играющих критически важную роль в процессе трансформации энергосистем.

В последующих разделах представлен детализированный анализ синергетических эффектов и потенциальных дисбалансов, возникающих при внедрении ВЭС, с позиций многоуровневой системы координат, охватывающей операционные, рыночные, экосоциальные и институциональные аспекты энергоперехода.

СОЦИАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВЭС

Социальная приемлемость возобновляемых энергетических систем в виде виртуальных электростанций представляет собой инновационный концепт в соответствующей сфере управления энергоресурсами, приобретающий ключевое значение в контексте глобального перехода к устойчивому развитию. Данная парадигма, сформированная в последнее десятилетие под влиянием климатических инициатив, цифровизации энергетики, предполагает трансформацию традиционных моделей энергопотребления и генерации, создавая синергию интересов производителей, потребителей, общества в целом. Успешность ее реализации напрямую коррелирует со степенью адаптивности социума к внедряемым технологиям, что подчеркивает необходимость глубокой интеграции технических решений в социально-экономический ландшафт.

Ключевым аспектом данной концепции является формирование инклюзивной экосистемы, где потребители трансформируются из пассивных участников рынка в активных «просьюмеров» (профессиональный потребитель либо производитель энергии), способных оптимизировать энергопотребление и участвовать в распределении ресурсов. Так, повышение грамотности населения в вопросах социально-экономических преимуществ ВЭС – от снижения углеродного следа до локализации энергогенерации – способствует осознанному выбору технологий, укреплению доверия внутри энергетического сообщества. Упомянутое актуализирует необходимость вовлечения широкого круга стейкхолдеров, включая муниципальные структуры, бизнес и гражданские объединения, в процессы проектирования, а также реализации энергетических стратегий.

Одной из значимых преград непосредственно на пути внедрения ВЭС остается низкий уровень социотехнической осведомленности. Согласно исследованиям, свыше 60 % населения не обладает базовыми знаниями о принципах работы интеллектуальных сетей (англ. Smart Grids), возможностях динамического тарифообразования или экологических эффектах децентрализованной энергетики. С целью преодоления этого барьера критически важна реализация многоуровневых образовательных программ, сочетающих цифровые платформы, публичные компании, партнерства с академическими институтами.

Успешные кейсы, в частности немецкая инициатива Energiewende, демонстрируют следующее: системная просветительская работа способна увеличить общественную поддержку ВЭС на 40–50 %, ускоряя адаптацию инноваций.

Особую роль в изменении потребительских паттернов играют технологии обратной связи, такие как интеллектуальные счетчики. Эти устройства, интегрированные в экосистему Интернета вещей, предоставляют пользователям данные в режиме реального времени о потреблении энергии, затратах и углеродной интенсивности, стимулируя поведенческие изменения через механизмы «зеленого» налогообложения или геймификации. Например, пилотные проекты в Скандинавии показали, что автоматизированная аналитика потребления снижает энергозатраты домохозяйств на 12–18 % за счет повышения осознанности.

Для достижения целей Парижского соглашения и перехода к нулевым выбросам к 2050 г. необходима консолидация усилий на макро- и микроуровнях. Помимо развития нормативной правовой базы и финансовых стимулов (например, «зеленых» облигаций), важно формирование коллективной ответственности через участие граждан в энергетических кооперативах, краудсорсинговых платформах и программах софинансирования инфраструктуры ВЭС. Как показывает практика Великобритании и Нидерландов, синергия государственных, корпоративных и общественных инициатив повышает скорость внедрения Smart Grids в полтора–два раза.

Социальные вызовы ВЭС и их воздействие представлены в табл. 1.

Таблица 1

Социальные аспекты ВЭС

Ключевые вызовы (Проблематика)	Стратегии решения (Предлагаемые меры)	Ожидаемые результаты (Потенциальные эффекты)
Низкий уровень информированности общественности о социально-экономических выгодах ВЭС	Разработка и реализация комплексных информационно-просветительских кампаний и образовательных программ	Повышение общественной поддержки, стимулирование осознанного потребительского выбора и вовлеченности в энергетические сообщества
Дефицит или неясность регуляторной и политической поддержки для развития распределенной генерации (DER) и энергетических сообществ на базе возобновляемых источников энергии	Совершенствование нормативно-правовой базы и разработка целевых политик, стимулирующих создание и функционирование энергетических сообществ	Стимулирование регионального экономического развития, повышение социальной справедливости и ускорение технологических инноваций в энергетике
Наличие регуляторных барьеров, препятствующих внедрению ВЭС	Гармонизация энергетического законодательства и регуляторных норм для упрощения процедур для внедрения ВЭС	Создание равных конкурентных условий и упрощение доступа на рынок для новых участников, включая энергетические сообщества и просьюмеров
Низкая степень вовлеченности граждан и местных сообществ в процессы планирования, принятия решений и реализации энергетических проектов на базе ВЭС	Создание и поддержка платформ для обеспечения общественного диалога, внедрение партисипативных моделей управления проектами и механизмами распределения выгод между всеми стейкхолдерами	Повышение легитимности и социальной приемлемости проектов возобновляемых источников энергии, усиление роли энергетических сообществ как активных участников энергосистемы, поддержка научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области и ее социально-экономических эффектов

Составлено авторами по материалам исследования

Социальная приемлемость ВЭС – это не только технико-экономический вызов, но и управленческая задача по трансформации общественного сознания. Ее решение требует комбинации технологической грамотности, инклюзивного диалога и создания устойчивых институтов, способных гармонизировать интересы всех участников энергетического перехода.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВЭС

Технологические инновации являются ключевым фактором трансформации энергетических систем, неся в себе как потенциал для повышения эффективности и надежности, так и риски стабильности (при недостаточной адаптации инфраструктуры, управления). Внедрение передовых технологий напрямую коррелирует с ростом производительности энергетического сектора. Кроме того, динамичная технологическая среда способствует привлечению, удержанию высококвалифицированных кадров, включая молодых ученых и инженеров. Упомянутое критически важно с целью обеспечения долгосрочного развития отрасли.

Технологии, лежащие в основе современной энергетики, такие как Smart Grids и возобновляемые источники энергии (далее – ВИЭ), особенно ветровая и солнечная генерация, все еще находятся на этапе активного развертывания и интеграции. Эффективная интеграция переменных ВИЭ требует развития новых компетенций у персонала в области интеллектуального учета, прогнозирования выработки, а также передовых методов управления энергосетями. Существенной проблемой остается стохастический характер генерации ветровой, солнечной энергии, обусловленный погодными условиями, что предъявляет повышенные требования к системам мониторинга, диспетчеризации и обеспечения баланса мощности в энергосистеме.

Центральная система управления ВЭС является технологическим центром. Она координирует все ресурсы, интегрированные в рамках системы, контролирует их и управляет ими. Информация передается по защищенным каналам связи. В системе управления хранятся все данные, необходимые для определения оптимальных графиков генерации и потребления электроэнергии.

Технологические вызовы ВЭС и их воздействие представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технологические аспекты ВЭС

Ключевые вызовы (Проблематика)	Стратегии решения (Предлагаемые меры)	Ожидаемые результаты (Потенциальные эффекты)
Проблемы качества электроэнергии и стабильности сети	Гибкие ресурсы генерации, системы хранения энергии, современные системы управления сетями	Повышение безопасности и надежности работы сети
Отсутствие «умных» сетей	Внедрение технологий Интернета вещей и умных счетчиков	Повышение надежности и качества электроэнергии
Проблемы конфиденциальности и кибербезопасности	Гарантия защиты данных потребителей	Обеспечение конфиденциальности и участие просьюмеров на рынке
Неопределенности в ценах на рынке ВИЭ и спросе	Интеграция передовых технологий и поддержка регуляторов	Снижение влияния неопределенностей на энергосистему

Составлено авторами по материалам исследования

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВЭС

Экологические аспекты связаны с воздействием электростанций на окружающую среду. Большинство электростанций используют ископаемые виды топлива, что приводит к загрязнению и изменению климата. Альтернативные источники энергии, такие как ветер, солнце и гидроэнергия, имеют свои преимущества для окружающей среды и здоровья человека. ВЭС могут улучшить качество жизни за счет чистого воздуха, снижения затрат на электроэнергию и улучшения здоровья пользователей. Интегрируя альтернативные источники, они будут играть ключевую роль в повышении гибкости и надежности энергосистем. Однако текущая политика недостаточна для достижения целей нулевых выбросов.

Экологические вызовы ВЭС и их воздействие представлены в табл. 3.

Экологические аспекты ВЭС

Ключевые вызовы (Проблематика)	Стратегии решения (Предлагаемые меры)	Ожидаемые результаты (Потенциальные эффекты)
Выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ от ископаемого топлива, приводящие к изменению климата и ухудшению качества воздуха	Масштабное внедрение ВИЭ и технологий ВЭС с целью выполнения замещения традиционной генерации	Существенное снижение национальных выбросов парниковых газов (декарбонизация), улучшение качества атмосферного воздуха, здоровья населения
Высокая зависимость от исчерпаемых и экологически небезопасных ископаемых видов топлива	Энергетический переход: стратегическое смещение фокуса с ископаемого топлива на чистые, возобновляемые ресурсы	Сокращение углеродного следа экономики, повышение устойчивости энергетической системы к ресурсным и ценовым шокам
Недостаточные темпы внедрения ВИЭ из-за барьеров (политических, экономических, информационных)	Укрепление государственной политики поддержки ВИЭ: разработка стимулов, инвестиционных программ, упрощение регуляторных процедур	Ускорение перехода к низкоуглеродной энергетике, содействие достижению национальных и международных климатических целей (в том числе углеродной нейтральности)
Низкая осведомленность или недооценка экологических последствий традиционной энергетики и преимуществ ВИЭ среди стейкхолдеров	Реализация информационно-просветительских кампаний, поддержка научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области ВИЭ и активное распространение их результатов	Повышение общественного запроса на чистую энергию, формирование обоснованной политики и рыночных стратегий на базе научных данных, стимулирование глобального внимания к ВИЭ
Необходимость интеграции экологических стандартов и контроля углеродного следа в энергетическое планирование и регулирование	Внедрение и совершенствование механизмов экологического регулирования (например, стандарты выбросов, схемы торговли квотами, углеродное ценообразование) в сочетании с развитием ВИЭ	Обеспечение соответствия энергетического сектора экологическим нормам, создание экономических стимулов для снижения выбросов, повышение прозрачности и подотчетности в управлении экологическими воздействиями

Составлено авторами по материалам исследования

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВЭС

ВЭС представляют собой инновационный подход к управлению энергоресурсами, обладающий значительным потенциалом оптимизации энергосистем, создания многоуровневой ценности (для участников рынка). Ключевые преимущества подразумевают интеграцию маломасштабных генерирующих установок непосредственно в общую сеть, внедрение механизмов управления спросом (DR) для минимизации пиковых нагрузок в различных кризисных ситуациях, а также пространственную консолидацию распределенных энергетических ресурсов (DER) солнечные панели, накопители энергии и микрогенерацию. Упомянутое необходимо с целью повышения стабильности энергосети.

Один из критически важных аспектов ВЭС – формирование гибридных рыночных платформ, где энергокомпании могут приобретать услуги по управлению спросом или же арендовать мощности ВИЭ (DER) непосредственно у конечных потребителей. Упомянутое создает синергетический эффект: агрегация множества малых генераторов усиливает конкуренцию на рынке, позволяет снизить тарифную нагрузку непосредственно на потребителей (за счет эффекта масштаба). Однако реализация таких проектов сопряжена с существенными капиталовложениями на начальном этапе. В структуру затрат входят:

- закупка интеллектуального оборудования («умные» счетчики, системы мониторинга);
- внедрение специализированного программного обеспечения для прогнозирования, диспетчеризации и биллинга;

- развертывание защищенных коммуникационных сетей для обмена данными в режиме реального времени;
- юридические и административные издержки (лицензирование, согласование с регуляторами, управление рисками).

Тщательный анализ совокупных расходов, включая оценку жизненного цикла проекта, позволяет инвесторам и операторам точно прогнозировать рентабельность инвестиций и минимизировать финансовые риски.

Экономическая эффективность и монетизация активов ВЭС обеспечивают долгосрочную экономию за счет:

- повышения энергоэффективности – алгоритмы машинного обучения оптимизируют баланс между генерацией и потреблением, сокращая потери;
- снижения затрат на пиковую генерацию – использование ВИЭ (DER) для сглаживания нагрузок уменьшает зависимость от дорогостоящих резервных мощностей;
- участия в оптовых рынках электроэнергии – агрегированные мощности ВЭС позволяют торговать избытками энергии или предоставлять услуги по частотному регулированию и поддержанию напряжения.

Ключевым элементом финансовой устойчивости проектов является комплексная оценка трех факторов: капитальных вложений, операционной экономии и доходности от рыночных операций. Экономическая привлекательность ВЭС для участников напрямую зависит от гибкости тарифных моделей [6]. Традиционные «плоские» тарифы, не учитывающие временные или географические особенности спроса, могут стать барьером для агрегации ВИЭ (DER). Внедрение динамического ценообразования способно стимулировать владельцев DER к участию в ВЭС, мотивируя их снижать потребление в часы пик или поставлять энергию в сеть.

Текущая нормативная база во многих юрисдикциях не адаптирована под специфику ВЭС, что создает правовые неопределенности. Однако разработка целевых стимулов, таких как упрощенное лицензирование агрегаторов или гарантии возврата инвестиций, способна компенсировать регуляторные риски.

Экономические сложности, включая волатильность цен на энергию и высокую волатильность капитальных затрат, представлены в табл. 4, где проведен сравнительный анализ сценариев окупаемости при различных рыночных условиях.

Таблица 4

Экономические аспекты ВЭС

Ключевые вызовы (Проблематика)	Стратегии решения (Предлагаемые меры)	Ожидаемые результаты (Потенциальные эффекты)
Дефицит финансирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и аналитических работ, посвященных рыночной интеграции ВЭС на энергетических рынках	Целевое выделение грантов и финансирования для исследовательских институтов, университетов и инжиниринговых компаний на проведение анализа рыночного потенциала, разработку бизнес-моделей и технических решений для внедрения концепции ВЭС	Формирование научно-обоснованной базы для принятия инвестиционных решений, разработки эффективных стратегий интеграции ВЭС и планирования модернизации инфраструктуры
Неадаптированность существующей структуры энергетического рынка и механизмов ценообразования к особенностям распределенной генерации и участию мелких производителей	Реформирование рыночных правил: упрощение процедур доступа к рынку, разработка специальных тарифов или механизмов поддержки (например, через агрегаторов) для малых производителей и энергетических сообществ	Снижение экономических барьеров входа и операционных рисков для мелких участников на рынок электроэнергии

Ключевые вызовы (Проблематика)	Стратегии решения (Предлагаемые меры)	Ожидаемые результаты (Потенциальные эффекты)
Отсутствие или недостаточность эффективных программ финансового стимулирования для раз- вертывания проектов ВЭС	Разработка и внедрение стабильных и предсказуемых государственных программ поддержки (налоговые льготы, субсидии на капитальные затраты) может ускорить рост ВЭС	Повышение инвестиционной привлекательности и финансовой устойчивости проектов ВИЭ (особенно для малых производителей и сообществ), ускорение темпов ввода новых генерирующих мощностей на базе ВИЭ

Составлено авторами по материалам исследования

ВЭС становятся катализатором перехода к децентрализованной, устойчивой энергетике. Несмотря на высокие стартовые инвестиции и регуляторные преграды, их способность генерировать синергию между технологиями, экономикой и экологией делает их стратегическим активом для достижения энергетической трансформации.

ПОЛИТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВЭС

В энергетическом рынке ВЭС могут сталкиваться с ограничениями из-за нормативных барьеров. Различные типы ресурсов, такие как ВЭС, подчиняются специфическим законам в разных энергетических рынках. Гибкие политики доступа к рынку, позволяющие ВЭС участвовать на равных условиях с традиционными производителями энергии, могут облегчить их интеграцию. Напротив, жесткие нормативные требования могут препятствовать развитию ВЭС и ограничивать их способность предоставлять ценные услуги сети.

Политические вызовы ВЭС и их воздействие представлены в табл. 6.

Таблица 6

Политические аспекты ВЭС

Ключевые вызовы (Проблематика)	Стратегии решения (Предлагаемые меры)	Ожидаемые результаты (Потенциальные эффекты)
Нет четкой политики, а также регулирующих органов в плане ВЭС	Разработка, а также внедрение четкой политики с целью обеспечения интеграции ВЭС в энергорынки	Улучшение применения ВИЭ и сокращения затрат при учете всех норм в сфере безопасности
Отсутствие соответствующих государственных стимулов с целью поощрения гибкости (среди всех потребителей)	Правительство должно предоставлять стимулы, а также инвестиционные программы с целью обеспечения улучшения энергополитики	Ускорение введения ВИЭ и сокращение углеродного следа
Отсутствие положений касательно собственности	Изменение политики, регулирования, а также рынков с целью обеспечения перехода к будущему (низкоуглеродному)	Передача большего выбора потребителям, а также новые возможности в сфере бизнеса

Составлено авторами по материалам исследования

Сложность энергосетей и быстрое развитие технологий требуют строгой нормативной базы для ВЭС. Политические аспекты ВЭС включают адаптацию нормативных актов, участие в рынке, обеспечение энергетической безопасности, решение экологических проблем и взаимодействие с заинтересованными сторонами. Эти факторы необходимо учитывать для полного использования потенциала ВЭС и обеспечения их роли в создании устойчивого и надежного энергетического будущего.

ВЫВОДЫ

Предложенная структура вносит вклад в исследование, предоставляя структурированную основу для оценки внешних факторов и их влияния на ВЭС. Она помогает понять более широкий контекст, предвидеть будущие изменения и принимать обоснованные решения, тем самым улучшая теоретические, методологические и практические аспекты внедрения ВЭС на существующем рынке электроэнергии [7].

Подход позволяет операторам и заинтересованным сторонам ВЭС лучше понимать внешнюю среду, в которой функционируют ВЭС. Он помогает выявить потенциальные вызовы и возможности, связанные с социальными аспектами (общественное мнение и поведение в отношении потребления энергии), технологическими инновациями (возобновляемые источники энергии), экономическими аспектами (цены на энергию и рыночная динамика), экологическими проблемами (выбросы CO₂ и устойчивость) и политическими факторами (государственная политика и регулирование). Это знание позволяет операторам и заинтересованным сторонам ВЭС принимать обоснованные решения, повышать конкурентоспособность, адаптировать стратегии к изменяющейся рыночной динамике и создавать более эффективные и устойчивые энергетические решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящего исследования предложена инновационная многоаспектная структура, базирующаяся на методологии СТЭЭП-анализа. Этот комплексный инструментарий позволяет всесторонне оценить социальные, технологические, экологические, экономические и политические факторы, влияющие на развитие ВЭС в современных рыночных условиях. Разработанная методология выявляет ключевые драйверы и меры, необходимые для преодоления существующих барьеров интеграции ВЭС в энергетические рынки.

Основные выводы заключаются в следующем:

- для ускорения внедрения ВЭС необходимы осведомленность, стимулы и удобные технологии, и совместные усилия правительства, коммунальных служб, сообществ и других заинтересованных сторон важны для создания благоприятной среды;
- передовые технологии, такие как информационно-коммуникационные технологии, машинное обучение и искусственный интеллект, могут улучшить управление энергией и прогнозирование;
- ВЭС играют ключевую роль в использовании возобновляемых источников энергии, улучшении экологии и снижении выбросов углекислого газа;
- ВЭС позволяют участвовать в энергетических рынках, принося пользу как производителям, так и потребителям;
- поддерживающая политика и нормативная база, учитывающая социальные, технические, экономические, экологические и политические аспекты, необходимы для реализации потенциала ВЭС.

Список литературы

1. Федоров А.А. Цифровая трансформация энергетики: от smart grid к виртуальным электростанциям. Новосибирск: Наука; 2022. 210 с.
2. Абрамов А.П. Управление энергосистемами в условиях цифровизации. М.: Энергоатомиздат; 2020. 320 с.
3. Григорьев П.В., Смирнов А.А. Виртуальные электростанции как элемент интеллектуальных энергосистем. Энергетика и электротехника. 2020;5:45–52.
4. Иванов П.С., Петров К.Д. Технологии виртуальных электростанций в контексте устойчивого развития. Альтернативная энергетика и экология. 2021;3:12–18.
5. Козлов Д.В. Виртуальные электростанции: преимущества и вызовы. Энергетическая политика. 2022;4:67–73.
6. Сидоров М.А. Экономические аспекты внедрения виртуальных электростанций. Экономика и управление в энергетике. 2021;2:34–40.
7. Кузьмин В.А. Виртуальные электростанции: концепции и технологии. М.: Издательство МЭИ; 2021. 180 с.

References

1. Fedorov A.A. Digital transformation in energy sector: from smart grid to virtual power plants. Novosibirsk: Nauka; 2022. 210 p. (In Russian).
2. Abramov A.P. Power systems management in digital era. Moscow: Energoatomizdat; 2020. 320 p. (In Russian).
3. Grigoriev P.V., Smirnov A.A. Virtual power stations as an element of intellectual power systems. Energetika i elektrotehnika. 2020;5:45–52. (In Russian).
4. Ivanov P.S., Petrov K.D. Virtual power plants technologies in the context of sustainable development. Alternative energy and ecology. 2021;3:12–18. (In Russian).
5. Kozlov D.V. Virtual power plants: advantages and challenges. Energy Policy. 2022;4:67–73. (In Russian).
6. Sidorov M.A. Economic aspects of virtual power plants implementation. Economics and Management in Energy Sector. 2021;2:34–40. (In Russian).
7. Kuzmin V.A. Virtual power plants: concepts and technologies. Moscow: MPEI Publ. House; 2021. 180 p. (In Russian).