

Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования

Evaluation of the efficiency of wind energy in the design of the plant using algorithmic modeling

Михаил МОКШИН
Аспирант НИЯУ МИФИ
E-mail: mokshin.my@mail.ru

Michael MOKSHIN
Graduate student NRNU MEPHI
E-mail: mokshin.my@mail.ru

Александр ПУТИЛОВ
Декан ФБИУКС НИЯУ МИФИ,
д. т. н., профессор
E-mail: avputilov@mephi.ru

Alexander PUTILOV
Deccan of the FBIISM, NRNU MEPHI,
Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: avputilov@mephi.ru

Кузьминская ВЭС

Источник: «Новавинд»



Аннотация. Проведена оценка экономической эффективности использования мощности ветроэлектростанций (ВЭС) в зависимости от климатических условий в регионах при различных режимах эксплуатации с учетом их технических характеристик. Разработан «цифровой двойник» – 3D-модель ВЭС. Проведено спектральное исследование скорости движения воздушного потока ВЭС с использованием современного математического аппарата вейвлет-анализа. Предложены рекомендации относительно повышения экономического эффекта от использования ветроэнергетических установок (ВЭУ). Разработана модель информационного и алгоритмического обеспечения мониторинга экономических показателей ветроэнергетических комплексов.

Ключевые слова: ветровая энергетика, экономическая эффективность, вейвлет-анализ, система автоматического проектирования, мониторинг экономических показателей, эффективное управление, «цифровой двойник».

Abstract. An assessment of the economic efficiency, as well as the potential intensity of the use of wind power plants (wind farms), depending on the climatic conditions in the regions under different operating modes, taking into account their technical characteristics, has been carried out. A «digital twin» has been developed – a 3D model of the wind farm. A spectral study of the velocity of the wind turbine air flow using modern mathematical apparatus of wavelet analysis. Recommendations on increasing the economic effect of the use of wind power plants (wind turbines). A model of information and algorithmic support for monitoring economic indicators of wind power complexes has been developed.

Keywords: wind energy, economic efficiency, wavelet analysis, automatic design system, monitoring of economic indicators, effective management, digital twin.

//

За первое полугодие 2023 г. ВЭС «Новавинда» (ветроэнергетический дивизион атомной отрасли), произвели 1,1 млрд кВт·ч электроэнергии

Введение

В настоящее время проблема энергетической эффективности является одной из важнейших задач для развивающихся стран. Деятельность госкорпорации «Росатом» в области использования атомной и ветровой энергетики позволяет решить

множество проблем, связанных с обеспечением надежности и стабильности энергии. Экономическая эффективность использования ветровой энергетики обусловлена сокращением экологических рисков и повышением энергетической безопасности [4, 6, 8]. Использование ветровой энергетики является экономически эффективным решением в отечественной атомной отрасли, обеспечивающим снижение уровня зависимости от импорта энергоносителей и уменьшения интенсивности негативного воздействия на окружающую среду [10].

На территории России планируется активное увеличение количества ветроэлектростанций (ВЭС) в ближайшие годы, благодаря разработанному механизму проведения конкурсов для выбора инвестиционных проектов по строительству генерирующих объектов, которые используют возобновляемые источники энергии. Это актуализирует вопросы оценки экономической эффективности ветроэнергетики посредством проектирования и алгоритмического моделирования.

Целью одного из основных российских отраслевых форсайт-проектов стала разра-

ботка методологии выбора важнейших направлений инновационного развития «зеленой экономики» и ее апробация на примере ветроэнергетического машиностроения, что подкрепляется принятыми нормативными актами Правительства РФ [1, 2].

Прогнозирование развития отечественной энергетики в рамках технологии форсайт-проектирования обусловлено возможностью применения принципов системного, комплексного, междисциплинарного и рискованного подходов. Применение при этом цифровых технологий обеспечивает скорость и качество обработки больших данных и предоставление наиболее вероятного результата.



Кузьминская ВЭС
Источник: «Новавинд»

Величины экономических показателей российской промышленности во многом коррелируют с нелинейной динамикой энергетических трендов. В статье разработан эффективный комплексно-сопряженный подход прогнозирования таких трендов. Он основан на комплексной экономико-технологической модели, которая сопряжена с базой данных климатических изменений.

Авторами статьи предложена форсайт-методика, которая основывается на системном исследовании и анализе текущего состояния и потенциала ветровой энергетики РФ, выполнена статистическая обработка данных по производству ветровых установок, метеорологических и экономических показателей.

Форсайт-исследования были проведены в отношении классических карт потребления ветровой энергии и ее потенциала. Объектами картирования служат пространственные и временные аспекты спроса и предложения, а также определяющие их факторы.

Потенциальные участники российского рынка ветровой генерации

В настоящее время движущим фактором развития российского рынка ветровой генерации выступает госкорпорация «Росатом». Ее дочернее предприятие АО «Новавинд» объединяет все активы ветроэнергетики корпорации, а также проводит экспертизу в передовых сегментах и технологических платформах в сфере электроэнергетики. За первое полугодие 2023 г. ВЭС, принадлежащие «Новавинду» (ветроэнергетический дивизион атомной отрасли), произвели 1,1 млрд кВт·ч электроэнергии. В 2023 г. показатель выработки энергии увеличился на 110 млн кВт·ч, по сравнению с первым полугодием 2022 г., когда выработка составила более 987 млн кВт·ч [3].

Работа всех ВЭС (рис. 1) в течение полугодия позволила снизить выбросы парниковых газов в атмосферу на более чем 380 тыс. т эквивалента углекислого газа. С начала работы первой ветроэлектростанции 1 марта 2020 г. и до конца второго квартала 2023 г. общий объем производства электроэнергии ВЭС составил около 4,5 млрд кВт·ч. При этом введение в эксплуатацию в 2023 г. ВЭС «Берестовская» и «Кузьминская» увеличило темп роста накопленного объема производства на 25%. Данные показатели учитывают работу восьми введенных в эксплуатацию ВЭС общей мощностью 880 МВт в Республике Адыгея, Ставропольском крае и Ростовской области.

В октябре 2023 г. АО «Новавинд» и российско-кыргызский Фонд развития подписали соглашение о проработке и реализации инвестиционного проекта по строительству ВЭС на территории Иссык-Кульской области Кыргызской Республики. Установленная мощность планируемой станции составит 100 МВт.

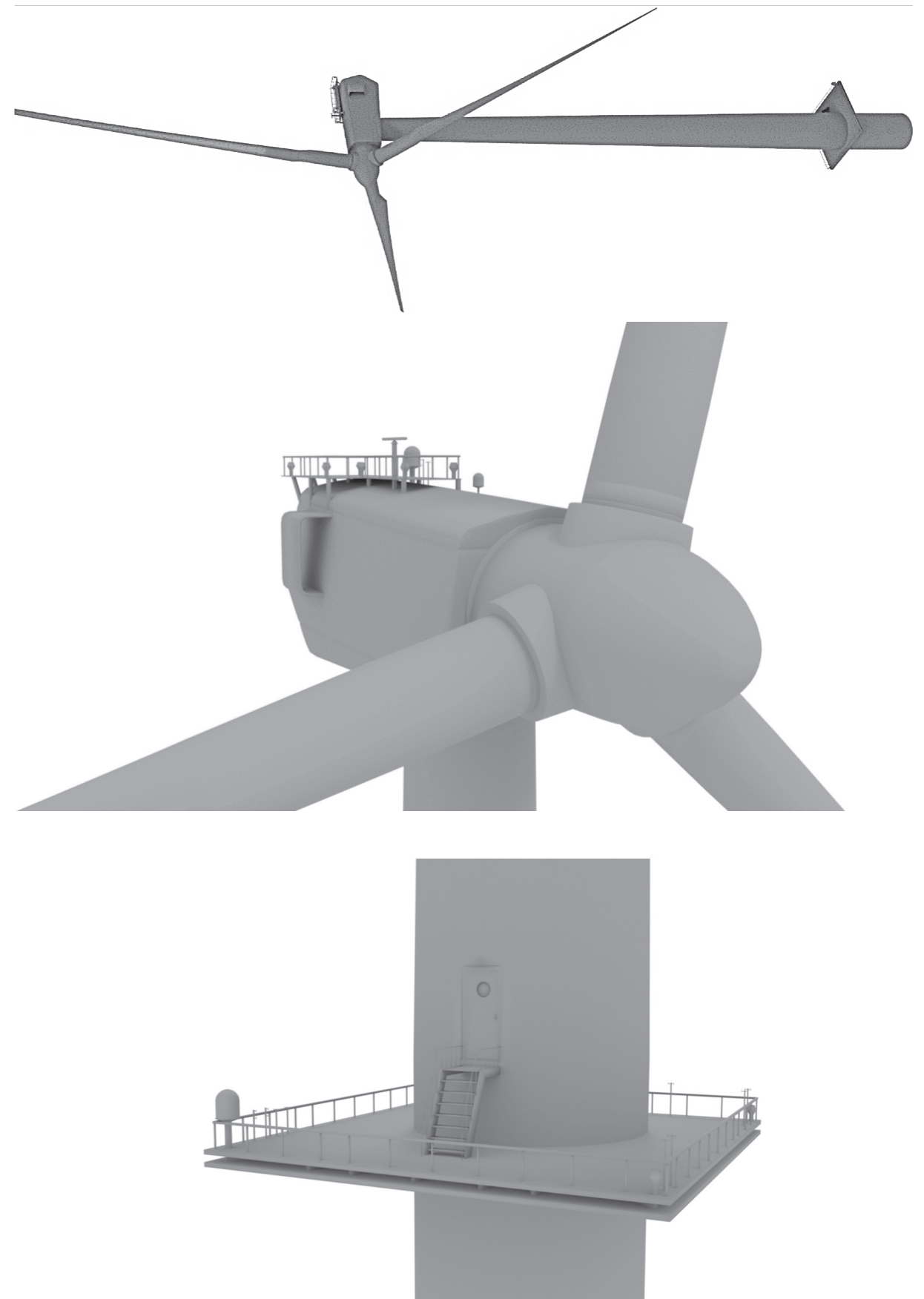


Рис. 1. Элементы «цифрового двойника»: 3D-модель ВЭС



Кармалиновская ВЭС

Источник: «Новавинд»

Проектирование ВЭС с использованием САПР

Как показывает практика, системы автоматизированного проектирования (САПР) являются неотъемлемой частью процесса проектирования и производства, в том числе и ВЭС. САПР позволяют создавать сложные и высокоточные изделия, снижать время и стоимость проектирования и изготовления, а также увеличивать производительность труда и качество продукции [13].

САПР позволяют быстро создавать и модифицировать проекты, используя компьютерную модель ВЭС, что существенно сокращает время, необходимое на проектирование, и уменьшает вероятность ошибок, связанных с ручным вводом данных. Более эффективное проектирование с применением архитектуры параллельных вычислений позволяет инженерам АО «Новавинд» быстрее выпускать новые ВЭС, а также ускорять процесс обновления и модернизации существующих. Использование САПР позволяет сократить затраты на производство, благодаря оптимизации процесса проектирования, что особенно важно для создания ВЭС, где затраты на производство достаточно высоки.

«Цифровые двойники» производственных объектов ВЭС являются важным инструментом для эффективного управления на различных режимах эксплуатации.

Оценка интенсивности использования мощности ВЭС и экономической эффективности ветрогенерации в зависимости от климатических условий в регионах

Оценка интенсивности использования мощности ВЭС различных типов проведена путем анализа следующих показателей:

- 1) коэффициента использования установленной мощности;
- 2) структурного коэффициента использования мощности.

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

$$\text{КИУМ}_i = \mathcal{E}_i / 8760 N_{yi} \quad (1)$$

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

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

$$\text{КС}_{Ti} = \Delta \mathcal{E}_i / \Delta N_{yi} \quad (2)$$

В выражении (2): $\Delta \mathcal{E}_i$ – доля электростанции i -го типа в структуре выработки электроэнергии, %; ΔN_{yi} – доля электростанции i -го типа в структуре установленной мощности.

Мощность воздушного потока ВЭС представлена закономерностью:

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

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

ВЭС на Камчатке

Источник: aerouq.com



Форсайт-исследования были проведены для классических карт потребления ветровой энергии. Объектами картирования служат пространственные и временные аспекты спроса и предложения

Спектральный состав скоростей ветра (м/с) реальных воздушных потоков на территории Ростовской и Иссик-Кульской областей выполнен с помощью вейвлет-анализа [9, 10]. Вейвлет – коэффициенты разложения поля скоростей воздушного потока по базисным функциям определены интегральной свёрткой:

$$W(a, b) = \frac{1}{a^k} \int_{-\infty}^{+\infty} V(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

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

Направление	Частота	
↓	Северный	1,2%
↙	Северо-восточный	2,4%
←	Восточный	46,6%
↗	Юго-восточный	15,8%
↑	Южный	14,6%
↘	Юго-западный	7,7%
→	Западный	6,5%
↖	Северо-западный	5,3%

Таблица 1. Роза ветров в Ростовской области в декабре 2022 г.

Направление	Частота	
↓	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%

Таблица 2. Роза ветров в Иссик-Кульской области в декабре 2022 г.

Розы ветров для Ростовской и Иссик-Кульской областей за период 2022 г. приведены в таблицах 1 и 2, вейвлет-спектры поля скорости воздушных потоков – на рис. 2(а) и рис. 2(б), соответственно.

Экономический эффект от использования ветроэнергетических установок (ВЭУ) в энергодефицитных регионах определим формулой:

$$Э_{эф} = nQT_{сл}(T_{сл} - T_{ок})(EC_T - I_{экс}) / (C_{п} - C_T) \quad (5)$$

В формуле (5): n – число ВЭУ в составе ВЭС; Q – годовой дефицит электроэнергии в регионе, кВт·ч/год; C_T – удельная стоимость производства электроэнергии от то-

пливных источников энергии (региональный тариф), руб/кВт·ч; E – электроэнергия, вырабатываемая ВЭУ в год, кВт·ч/год; $I_{экс}$ – издержки эксплуатации, руб.

Результаты численных расчетов представлены в сводной таблице 3. На основании формул (1) – (3) и (5), а также результатов спектральной обработки мониторинга поля скорости воздушных потоков для рассмотренных регионов авторами статьи предложены следующие рекомендации:

- в целях достижения максимальной прибыли оптимизировать интенсивности использования мощности ВЭС АО «Новавинд» в зимний период, когда скорость воздушных потоков максимальна, ввести в экс-

Таблица 3. Сводная таблица результатов численного анализа прироста экономической эффективности ветрогенерации

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

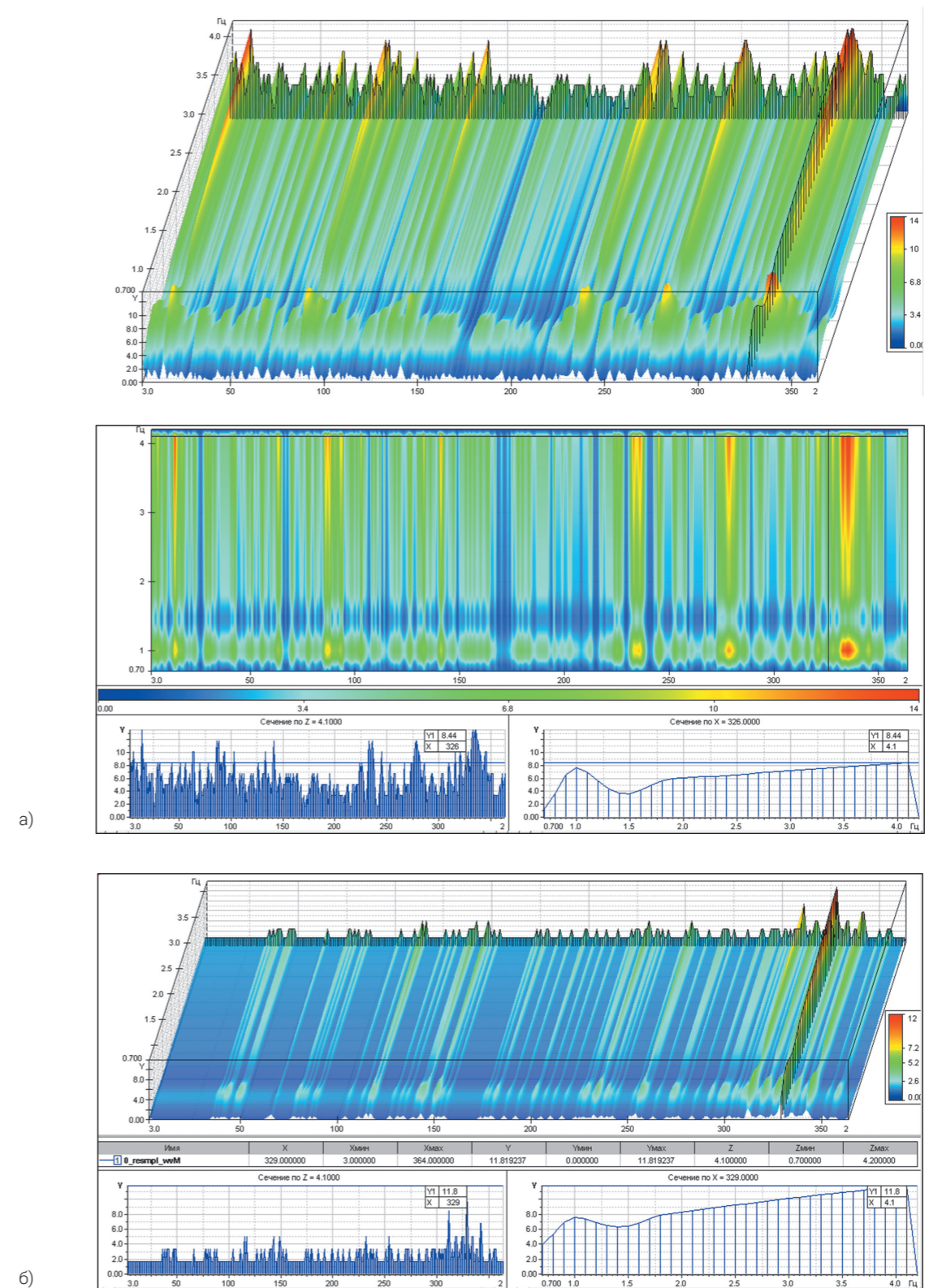


Рис. 2. Вейвлет-спектр поля скорости воздушных потоков за 2022 г.:

а) Ростовская область; б) Иссик-Кульская область



Рис. 3. Модель информационного и алгоритмического обеспечения мониторинга экономических показателей АО «Новавинд»

платацию парк ВЭУ на территории Ростовской области с максимальным диаметром рабочего колеса турбины, увеличивая их энергопотенциал, но с учетом характерной теплофикационной электрической мощности, вырабатываемой турбоагрегатами ТЭЦ;

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

Модель информационного и алгоритмического обеспечения мониторинга экономических показателей ветрогенерации

В 2021 г. в АО «Атомэнергпромсбыт» введен в эксплуатацию измерительно-вычислительный комплекс с единым сервером баз данных верхнего уровня – ЦСОД АИИС КУЭ АО «Атомэнергпромсбыт», что позволяет ее потребителям перейти на централизованную унифицированную схему автоматического сбора, обработки, хранения, передачи и отображения в удобном для анализа виде данных коммерческого и технического учета электрической энергии, а также обеспечивает техническую возможность развития и реализации проектов, направленных на снижение стоимости электрической энергии и мощности.

Описанный выше измерительно-вычислительный комплекс с единым сервером баз данных обладает удобным интерфейсом и доступным отображением показателей, но имеет также ряд недостатков, в частности, не рассмотрены вычислительные алгоритмы постпроцессорной обработки больших данных, предоставление облачных ресурсов и шифрование данных в них с автоматизированным вычислением хэш-кодов для проверки целостности и подмены данных. Авторами статьи предложена структура универсальной комплексной модели (рис. 3) информационного и алгоритмического обеспечения мониторинга ключевых экономических показателей АО «Новавинд».

Структурная детализация модулей в составе разработанной модели представлена ниже. Модуль системы сбора данных включает средства для сбора и хранения данных о различных экономических показателях, таких как финансовые и технические показатели, объемы производства, доли рынка с предоставлением облачных ресурсов.

С начала работы первой ветроэлектростанции 1 марта 2020 г. и до конца второго квартала 2023 г. общий объем производства электроэнергии ветровыми электростанциями составил 4,5 млрд кВт·ч

Аналитический модуль содержит вычислительные алгоритмы и методы статистической постпроцессорной обработки больших данных. Модуль включает временной анализ, прогнозирование экономических показателей, выявление трендов, корреляционный и регрессионный анализы зависимостей между различными экономическими показателями.

Модуль визуализации данных содержит прозрачный интерфейс визуализации больших данных, он позволяет представить собранные и проанализированные данные в понятном и наглядном виде. Для повышения производительности систем обработки данных предлагается совместное использование GPU/CPU процессоров.

Предлагаемая модель предоставляет возможность создания отчетов, на основе собранных данных и их анализа. Отчеты могут быть использованы для внутреннего анализа и принятия оптимальных решений (в том числе с применением искусствен-

ного интеллекта), а также для отчетности перед заинтересованными сторонами, такими как акционеры, инвесторы.

Модуль интеграции с внешними системами сопряжен с другими информационными системами, используемыми в организации, такими как система учета, система управления производством или система управления рисками, что позволит инженерам в атомной отрасли автоматизировать сбор данных и обеспечить более эффективное использование информационных ресурсов.

Модуль информационной безопасности обеспечивает защиту конфиденциальной информации собранных данных. Авторы статьи предлагают использовать аппаратно-программный комплекс шифрования (АПКШ) «Континент», авторизацию и многофакторную аутентификацию пользователей, резервное копирование данных.

В рамках корпоративной платформы управления данными авторами предла-

ВЭС Тикси

Источник: «Русгидро»



Эффективное проектирование с применением архитектуры параллельных вычислений позволяет инженерам быстрее выпускать новые ВЭС, а также ускоряет процесс модернизации существующих станций

гаются эффективно использовать описанную выше модель совместно с комплексом инструментов DG/DM («Data Governance»/ «Data Management»), обеспечивающих:

- прозрачность данных за счет создания единого источника информации и правил управления данными, быстрого поиска по базам данных;
- единое понимание данных (терминологии, взаимосвязей между бизнес-терминами, экономическими показателями и источниками данных, методологии экономических и технических расчетов);
- быстрый доступ к данным и «data-сервисам» за счет реализации единой точки доступа к глоссарию, каталогу данных, аналитической отчетности, порталу самообслуживания;
- цифровое представление бизнес-процессов за счет внедрения моделей данных.

Использованные источники

1. Распоряжение Правительства РФ от 04.10.2012 г. №1839-р (ред. от 28.07.2015 г.) «Об утверждении комплекса мер стимулирования производства электрической энергии генерирующими объектами, функционирующими на основе использования возобновляемых источников энергии» // Собрание законодательства РФ. 08.10.2012 г. №41. ст. 5671.
2. Распоряжение Правительства РФ от 28.07.2015 г. №1472-р «О внесении изменений в акты Правительства Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. 03.08.2015 г. №31. ст. 4741.
3. АО «Новавинд». Наши проекты. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://novawind.ru/production/our-projects/>
4. Двас Г.В., Цыплакова Е.Г., Никифоров Р.Р. Ветроэнергетика как фактор устойчивости региональных экономических систем // Общество: политика, экономика, право. 2023. №6 (119). С. 87–93.

Использование современных информационных технологий позволит перейти к формированию механизмов управления устойчивым развитием экономики промышленных отраслей и комплексов, в том числе и с использованием ветрогенерации.

Заключение

Эффективное развитие рынка ветровой энергетики зависит от применения современных систем прогнозирования экономической эффективности и моделирования потенциального использования мощности ВЭС в зависимости от климатических условий в регионах эксплуатации, а также работе с базами данных коммерческого и технического учета электроэнергии. Внедрение цифровых технологий в ветровую энергетику, развиваемую в атомной отрасли, позволяет повышать эффективность управления, оптимизировать процессы планирования и производства электроэнергии в различных регионах с учетом местных особенностей.

Аналитика данных, оптимальное управление производства и распределения энергии, автоматизация управленческих процессов на базе цифровых платформ для взаимодействия с потребителями играют ключевую роль в развитии сектора ветровой энергетики и его влияния на цифровую региональную экономику. Использование цифровых инноваций является важным фактором для обеспечения устойчивого развития энергетической отрасли, обеспечения энергетической безопасности и продвижения технологий на экспорт.



Кочубеевская ВЭС

Источник: «Новавинд»

5. Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // Вестн. ИрГТУ. 2015. №9. С. 133–140.
6. Лапшин Ю. Перспективы развития безбашенной ветроэнергетики // Norwegian Journal of Development of the International Science. 2022. №95. С. 78–82.
7. Международный опыт развития инфраструктуры инновационной деятельности // Материалы I Международного форума «От науки к бизнесу». Санкт-Петербург, 17-19 мая 2007 г. 2008. – 314 с.
8. Молчанова Л.А., Молчанов К.К. Особенности проектов альтернативной энергетики и специфика управления ими // Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. 2023. №1. С. 62–69.
9. Современные технологии в мировом научном простран-

- стве: методы, модели, прогнозы: коллективная монография / Божко Л.М. и др.; под общей ред. А. Б. Черемисина // Петрозаводск: МЦДП «Новая наука», 2020. – 273 с.
10. Сулов К.В., Уколова Ев. В., Уколова Ек. В. Экономика и возобновляемые источники энергии. Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири // Сборник научных трудов. Вып. 15. Иркутск. 2015. – С. 94–98.
11. Темербаев С.А., Довгун В.П., Шевченко Е.С. Улучшение качества электроэнергии в автономных системах электроснабжения, использующих возобновляемые источники энергии // Power quality improvement in off-grid renewable energy systems. Журнал Сиб. федер. ун-та. техн. и технол. 2014. №7. С. 821–831.
12. Турдалиев И.А. Энергоэффективность и энергосбережение при использовании альтернативных источников энергии // Вестник науки и образования. 2023. №3 (134). С. 30–34.

13. Федоренко В.Ф., Тихонравов В.С., Мишуров Н.П. Возобновляемые источники энергии: тенденции и перспективы развития: научный аналитический обзор // М.: Росинформротех. 2015. – 128 с.
14. Шисяо У, Шеина С.Г. Исследование установки вертикально-осевых турбин на верхних этажах высотных зданий // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. 2023. №2. С. 19–28.
15. Путилов А.В., Червяков В.Н., Матицин И.Н. Цифровые технологии прогнозирования и планирования развития атомной энергетики // Энергетическая политика. 2018. № 5. С. 87–98.
16. Абрамов В.А., Путилов А.В., Шамаева Е.Ф. Формирование механизмов управления устойчивым развитием экономики промышленных отраслей и комплексов // Энергетическая политика. 2023. № 2. С. 40–53.