

УДК 519.654

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.011

Формирование цифровой модели ветроэнергетической установки в составе цифрового двойника и её апробация на примере оценки эффективности применения ветроустановки в селе Онгурены

Щукина Виктория Михайловна¹, Щукин Никита Игоревич²

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск, vitalpiskunova98@gmail.com

²Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск

Аннотация. Актуальность построения цифровых двойников возобновляемых источников энергии (ВИЭ), к которым относятся ветровые электростанции, обусловлена стремительным развитием технологий и необходимостью повышения эффективности эксплуатации энергетических систем. Цифровые двойники позволяют создавать виртуальные модели реальных объектов, что открывает новые горизонты для оптимизации процессов, мониторинга состояния и предсказания функционирования установок. В условиях глобального перехода к устойчивой энергетике важность цифрового моделирования возрастает, так как оно способствует более эффективному использованию ресурсов, снижению затрат и увеличению надежности энергетических систем.

В статье рассматривается процесс формирования цифровой модели ветроэнергетической установки (ВЭУ), который является ключевым элементом в разработке цифрового двойника. В работе описываются основные подходы и методы, применяемые для создания точной виртуальной копии реальной ветроустановки, включая выбор параметров моделирования, таких, как геометрические размеры, материалы и механические свойства, а также определение граничных условий, позволяющих максимально точно воспроизводить особенности эксплуатации.

Особое внимание уделяется характеристикам погодных условий, включая временные ряды скорости ветра, что является критически важным для оценки коэффициента использования установленной мощности ветроустановки. Указанные погодные данные позволяют точно смоделировать реальные условия работы установки и корректировать параметры модели в соответствии с изменяющимися климатическими условиями.

В статье также обсуждаются современные технологии и инструменты, используемые для обеспечения высокой степени соответствия между цифровой моделью и физическим объектом, такие, как системы сбора данных и программное обеспечение для анализа данных. Перспективы применения цифровых двойников в ветроэнергетике подчеркиваются в контексте оптимизации работы установок, прогноза выработки электроэнергии и повышения общей эффективности эксплуатации, что является важным шагом к устойчивому развитию возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровая модель, ветровые электростанции, математическое моделирование

Цитирование: 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. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.011.

Введение. Энергетическая отрасль играет ключевую роль в обеспечении жизнедеятельности общества, предоставляя электроэнергию для питания домов, предприятий и других объектов. Её структура включает в себя генерацию, передачу, распределение и потребление электроэнергии. С развитием цифровых технологий и переходом к цифровизации, энергетическая отрасль сталкивается с новыми вызовами и возможностями, такими, как: необходимость адаптации к изменяющимся условиям рынка; потребность в повышении эффективности и надёжности работы энергетических систем; возможность использования новых источников энергии и технологий; необходимость обеспечения безопасности и защиты данных; потребность в подготовке квалифицированных кадров, способных работать в условиях цифровизации.

Одним из перспективных направлений для упрощения адаптации к вышеуказанным трендам является внедрение цифровых двойников. *Цифровой двойник (Digital Twin)* – это виртуальный прототип реального объекта, с помощью которого можно проводить эксперименты и проверять гипотезы, прогнозировать поведение объекта и решать задачу управления его жизненным циклом. Виртуальный прототип реального объекта, создается на основе совокупности данных об объекте. Эти данные включают рабочие показатели, состояние в текущий момент, историю совершенных действий, режим работы оборудования, программное обеспечение, эксплуатационные условия. После анализа этой информации инженеры могут дать рекомендации по техническому обслуживанию объекта, выявить слабые места и риски, что приводит к снижению аварийности и сбоев [1-3].

Цифровой двойник применяется для решения множества задач, включая моделирование событий, происходящих с оригиналом при определенных обстоятельствах, снижение затрат на внедрение инноваций, уменьшение негативного влияния на окружающую среду, своевременное выявление технических проблем, оценку производительности технологий и оборудования, оптимизацию производственных процессов [4-6]. Цифровые двойники могут применяться на различных объектах энергетики, включая электростанции, сети передачи и распределения электроэнергии, а также системы управления активами. Применение технологии цифровых двойников в возобновляемой энергетике открывает новые горизонты для оптимизации и повышения эффективности работы электростанций и сетевых объектов. Это особенно актуально для ветровой и солнечной энергетики, где погодные условия и время суток оказывают значительное влияние на выработку энергии. Цифровые двойники позволяют моделировать работу станций в различных условиях, предсказывать выработку энергии и оптимизировать режимы работы оборудования. Это способствует снижению затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также повышению надежности и безопасности работы энергетических систем.

В основе цифрового двойника лежат два ключевых понятия: цифровая модель и цифровая тень. *Цифровая модель* представляет собой систему математических и компьютерных моделей, а также электронных документов объекта, описывающую структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого объекта на различных стадиях его жизненного цикла. Она характеризуется отсутствием автоматического обмена данными между физическим и цифровым объектом. Это означает, что передача данных от физического объекта к цифровому и наоборот осуществляется вручную [7]. *Цифровая тень*, в свою очередь, возникает, когда между физическим объектом и его цифровым представлением устанавливается однонаправленный автоматизированный поток данных. Изменение физического объекта приводит к изменению его цифрового двойника, но не наоборот [8]. Цифровой двойник объединяет эти два понятия, обеспечивая двусторонний поток данных между физическим и цифровым объектами. Это позволяет проводить анализ и оптимизацию работы физических объектов, используя данные, полученные из их цифровых копий.

В данное время технология цифровых двойников считается одной из самых перспективных, и её активно исследуют и пробуют внедрять, в том числе в области возобновляемой энергетики и ветроэнергетики, в частности, [9-13]. Применение цифровых двойников в ветровой энергетике становится всё более актуальным благодаря их возможностям повышать эффективность и надёжность работы ветровых установок. Они позволяют в реальном времени отслеживать состояние оборудования, прогнозировать его поведение и проводить анализ данных для оптимизации процессов. Цифровые двойники способствуют снижению затрат на обслуживание, так как позволяют заранее выявлять потенциальные неисправности и выполнять про-

гнозируемое техобслуживание. Кроме того, они играют важную роль в моделировании производительности ветряных парков, что помогает в принятии информированных решений о планировании и развитии новых проектов. Таким образом, внедрение цифровых двойников в ветровую энергетику способствует не только улучшению эксплуатации объектов, но и увеличению доли возобновляемых источников энергии в общем энергетическом балансе [14].

Эта статья направлена на формирование подхода к разработке цифровой модели ветроэнергетической установки для дальнейшего ее использования, как компонента цифрового двойника.

1. Подход к формированию цифровой модели ВЭУ для цифрового двойника. Математические модели позволяют описывать и изучать различные явления и процессы, за счет упрощения сложных систем и представления их в виде математических уравнений. Они используются в науке, технике, экономике и других областях, для формализации технологических процессов различных систем и прогнозирования их поведения, а также для разработки новых технологий и решений.

В рамках данной работы будет представлена детерминистическая модель ВЭУ, основанная на ретроспективных данных о скорости ветра в рассматриваемом регионе (опираясь на конкретные координаты). Модель будет использована для анализа поведения, прогнозирования годовой выработки и определения показателей эффективности функционирования ветровой установки.

1.1. Анализ данных о скорости ветрового потока. Для построения детерминистической модели ветровой установки необходимо проанализировать и усреднить ретроспективные данные о скорости ветрового потока в рассматриваемом регионе. Для иллюстрации предлагаемого подхода рассмотрим село Онгурен, Иркутская область, Ольхонский район, имеющее координаты 53.632079, 107.592075. Ранее в этом населенном пункте имела гибридная (солнечно-ветровая) электростанция, в связи с чем в свободном доступе имеется большое количество о метеорологических условиях местности. На рисунке 1 представлены данные о скорости ветрового потока в селе Онгурен с 2015 по 2019 год.

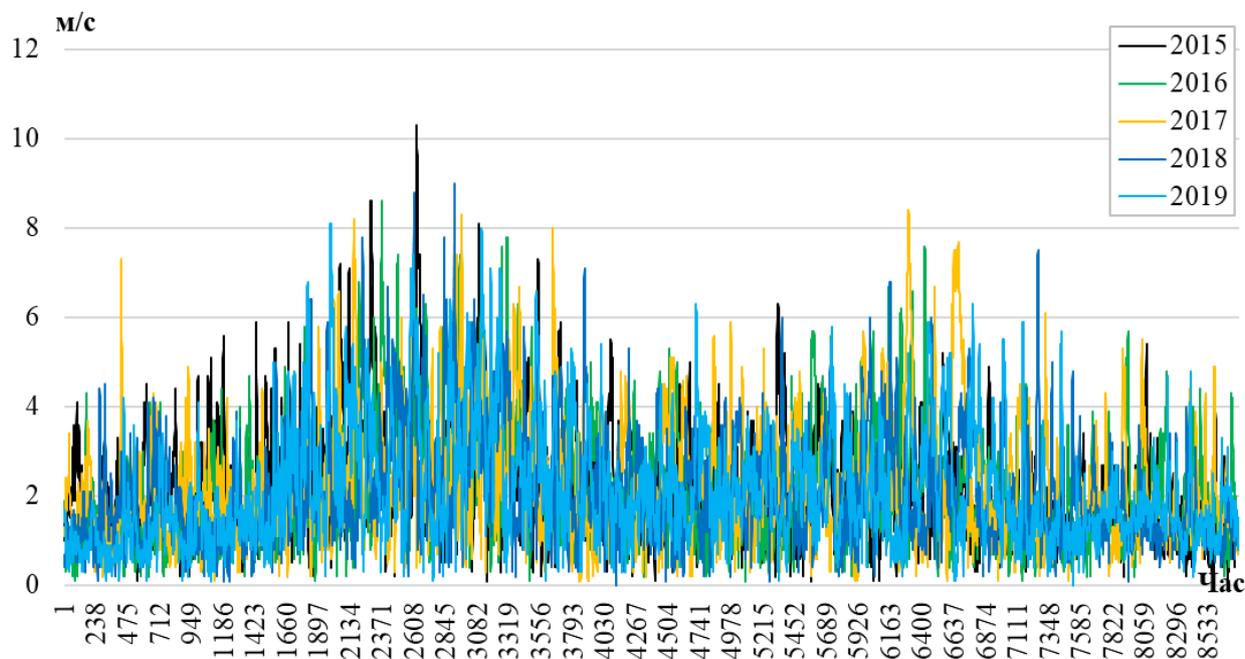


Рис. 1. Данные о скорости ветрового потока за 2015 – 2019 года

Как видно из рисунка, в течении пяти рассматриваемых лет наблюдаются значительные отклонения в скоростях ветра, однако все же прослеживается общая тенденция. В течение года

наибольшая скорость ветра наблюдается весной и в период с августа по октябрь. Для дальнейшего анализа усредним данные за 5 лет для получения расчетных значений (рис. 2).

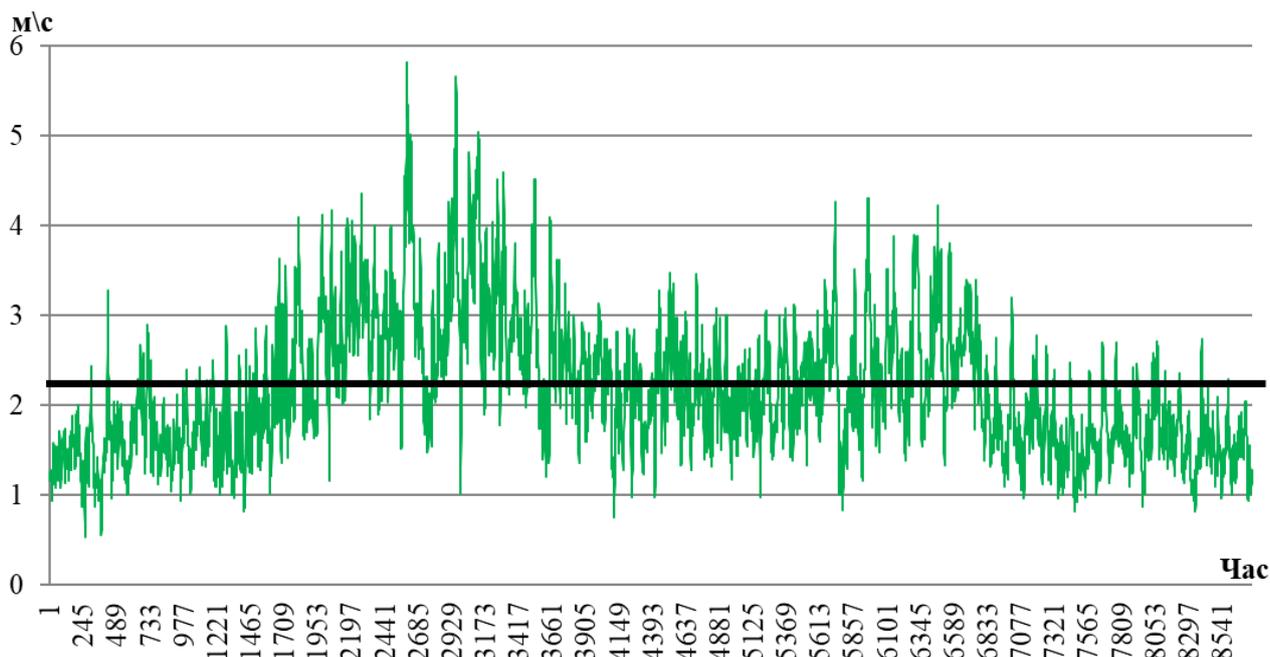


Рис. 2. Расчетные значения скорости ветрового потока в течение года на высоте 10 м (высота метеостанции)

Как видно из рисунка 2, село Онгурен является маловетренным, средняя скорость ветра в течение года варьируется от 1,5 до 3 м/с. С учетом того, что в среднем для запуска ВЭУ необходима скорость ветра 3 м/с, можно сделать вывод о низкой эффективности установки ветровой электростанции в рассматриваемом районе, однако для более корректного анализа необходимо провести пересчет скорости ветрового потока на высоте метеорологической станции на высоту ветровой установки. Для пересчета будем использовать следующую формулу [15]:

$$V(h) = V_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha, \quad (1)$$

где $V(h)$ (м/с) – искомая скорость ветрового потока на высоте h (м); V_0 (м/с) – средняя скорость ветрового потока на высоте метеорологической станции h_0 (м); α – коэффициент, зависящий от типа рассматриваемой местности.

Безразмерный коэффициент α может принимать значения от 0,14 до 0,4 в зависимости от анализируемой местности. Для крупных городов рекомендуется принимать значения от 0,33 до 0,4, для пригородов – от 0,22 до 0,28. Для дальнейших расчетов зададимся высотой ветровой установки в 50 м и коэффициентом $\alpha = 0,2$, соответствующим равнинной местности [15].

Полученные значения отражены на рисунке 3. Среднегодовое значение скорости ветрового потока равно 3 м/с, что все еще соответствует низкому ветровому потенциалу, однако в данном случае имеет смысл рассмотреть установку ВЭУ и оценить показатели эффективности ее функционирования.

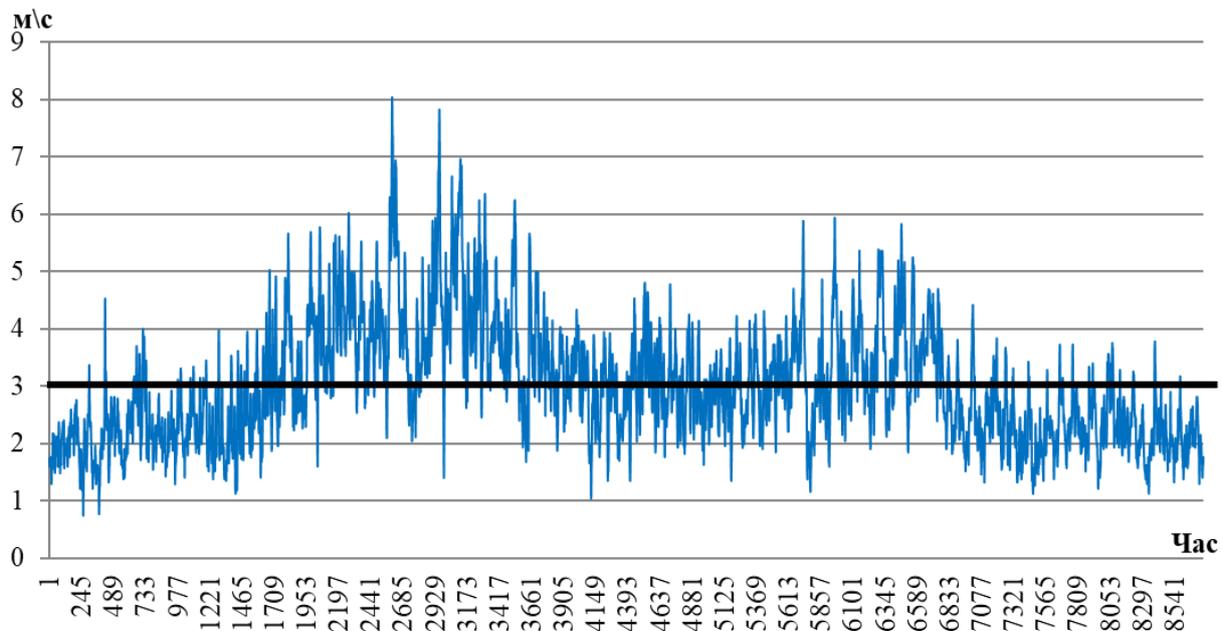


Рис. 3. Расчетные значения скорости ветрового потока в течении года на высоте 50 м (высота ветровой установки)

1.2. Математическое описание ветровой установки. Для дальнейших расчетов необходимо выбрать ветровую установку, так как в зависимости от типа лопастей, высоты и наличия поворотных механизмов у различных ВЭУ имеются различные кривые развиваемой мощности. Кривые развиваемой мощности ВЭУ представляют собой графики зависимости мощности, вырабатываемой установкой, от скорости ветра. Эти кривые позволяют определить максимальную мощность, которую может производить установка при различных скоростях ветра, а также ее общую производительность за определенный период времени. Для упрощения визуализации будем рассматривать ВЭУ номинальной мощностью 100 кВт с типовой кривой развиваемой мощности (рис. 4).

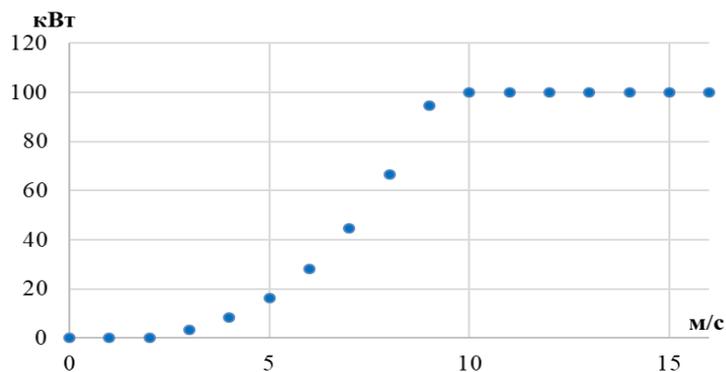


Рис. 4. Кривая развиваемой мощности ВЭУ

В зависимости от типа используемой ВЭУ форма кривой может различаться – при достижении максимально допустимой скорости ветра кривая либо резко обрывается (ВЭУ отключается), как на рисунке 4, либо мощность достаточно резко снижается до нуля (лопасти ВЭУ опускаются, и она отключается).

Как видно из рисунка, кривую можно разделить на три интервала: при скорости ветра до 2 м/с ВЭУ не функционирует, с 2 до 10 м/с ВЭУ разгоняется до максимальной скорости вращения и набирает мощность до номинальной, с 10 м/с и выше – работает равномерно с номинальной мощностью. В связи с этим для увеличения точности расчетов выполним кусочную аппроксимацию данной кривой.

При кусочной аппроксимации для каждого интервала необходимо получить уравнение, отображающее зависимость между скоростью ветрового потока и вырабатываемой мощностью. Для первого и третьего интервалов вырабатываемая мощность не зависит от скорости ветра и определяется как 0 кВт и 100 кВт соответственно. Для второго интервала необходимо выполнить аппроксимацию имеющегося массива точек. Произведем сравнение по средней ошибке различных типов аппроксимации для выбора наиболее корректного варианта: линеаризация, аппроксимация полиномами 2, 3, 4 и 5 порядка.

Среднюю ошибку аппроксимации ε (%) будем вычислять, как среднее значение всех отклонений расчетной мощности $P_{calc i}$ (кВт) от реальной $P_{real i}$ (кВт), помноженной на КПД установки в рассматриваемой точке. В данном случае КПД определяется, как отношение реальной мощности в данной точке к номинальной мощности ВЭУ P_{nom} (кВт).

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n (|P_{real i} - P_{calc i}| \cdot \frac{P_{real i}}{P_{nom}})}{n}, \tag{2}$$

Сведем в таблицу 1 сравнение всех вариантов аппроксимации.

Таблица 1. Сравнение вариантов аппроксимации кривой развиваемой мощности ВЭУ

Вариант аппроксимации	Полученная зависимость	Средняя ошибка аппроксимации ε (%)
Линейная	$P = 13,635V - 41,614$	8,90
Полином 2 порядка	$P = 1,401V^2 - 3,180V - 0,510$	3,64
Полином 3 порядка	$P = -0,210V^3 + 5,175V^2 - 23,351V + 29,935$	2,69
Полином 4 порядка	$P = -0,126V^4 + 2,814V^3 - 19,971V^2 + 60,675V - 62,732$	1,97
Полином 5 порядка	$P = -0,037V^5 + 0,982V^4 - 9,724V^3 + 46,147V^2 - 99,616V + 78,123$	2,28

Как видно из таблицы 1, наименьшую среднюю ошибку дает полином 4 порядка, а значит принимаем его для дальнейших расчетов (рис 5).

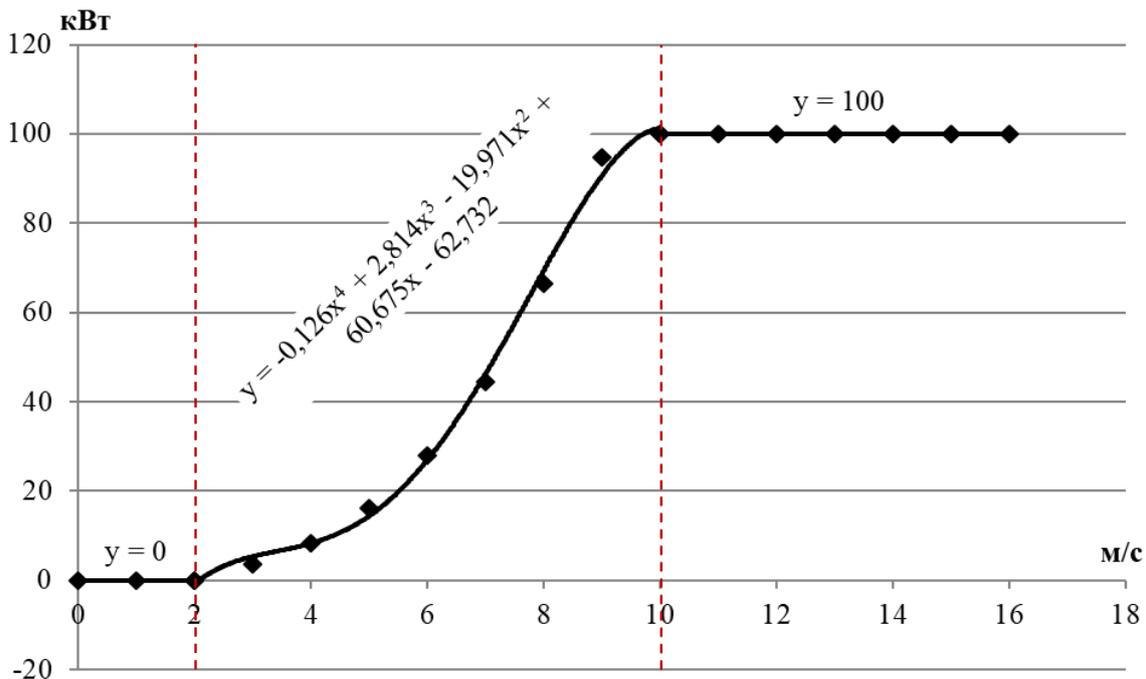


Рис. 5. Аппроксимация кривой развиваемой мощности ВЭУ методом сплайнов

Таким образом, запишем уравнение зависимости мощности ВЭУ от скорости ветрового потока в следующем виде:

$$P = \begin{cases} 0 & 0 \leq V < 2 \\ -0,126V^4 + 2,814V^3 - 19,971V^2 + 60,675V - 62,732 & 2 < V < 10 \\ 100 & V \geq 10 \end{cases} \quad (3)$$

2. Расчет годовой выработки ветроэнергетической установки и показателей эффективности ее работы. Расчет годовой выработки ВЭУ производится за счет соотнесения почасовых значений скоростей ветрового потока с аппроксимированной кривой развиваемой мощности ВЭУ. Таким образом, мы получаем следующий набор данных, отображенный на рисунке 6. Как видно из рисунка, максимальная доступная мощность для данного региона составляет порядка 70 кВт. Средняя же генерируемая мощность равна 4,36 кВт, а прогнозная генерация электроэнергии за год составляет 38 244,5 кВт*ч.

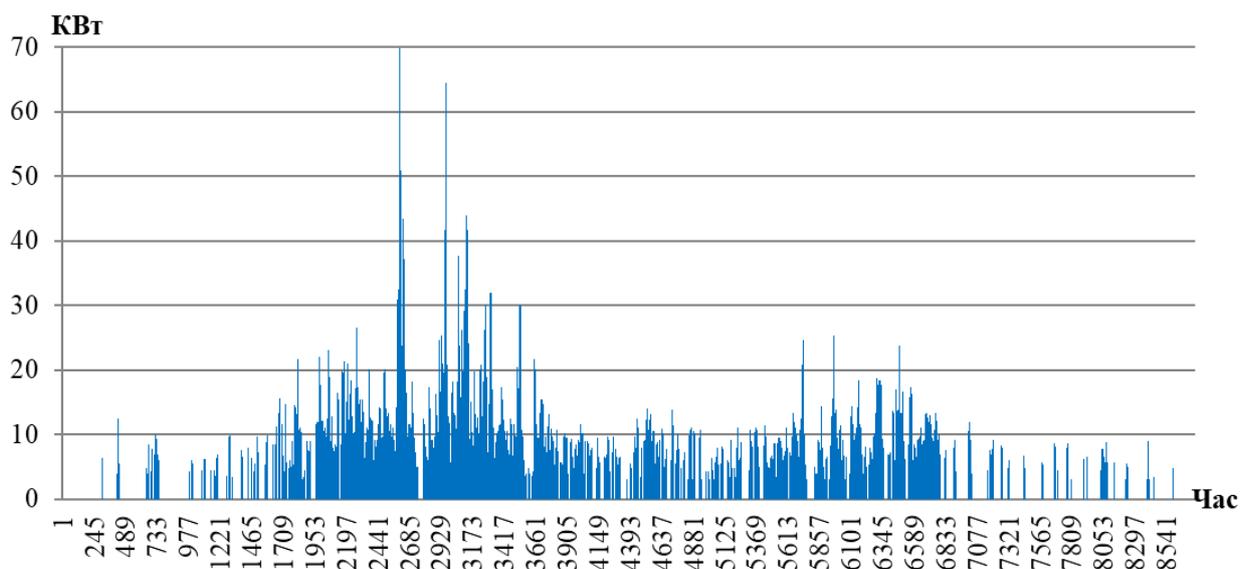


Рис. 6. Годовая выработка ВЭУ

Для анализа эффективности работы ветровой электростанции рассчитаем ее коэффициент использования установленной мощности (КИУМ). КИУМ показывает, насколько эффективно используется генерирующая мощность оборудования или установки в течение определенного периода времени. Этот показатель обычно выражается в процентах. Высокие значения КИУМ означают, что оборудование используется эффективно и с минимальными потерями энергии. Низкие значения указывают на необходимость оптимизации работы оборудования или изменения производственной стратегии.

Для определения КИУМ необходимо знать следующие параметры:

Установленная мощность оборудования ($P_{уст}$). Это максимальная мощность, которую может выдать оборудование при оптимальных условиях работы. В рамках этой части работы установленная мощность ВЭС равна номинальной мощности ВЭУ, так как для упрощения расчетов, визуализирующий предлагаемый метод моделирования, рассматривается установка только одной ВЭУ.

Среднее значение мощности, вырабатываемой за год ($P_{ср за год}$). Это отношение количества энергии, произведенного за год, к количеству часов в году.

Тогда КИУМ можно рассчитать по формуле:

$$КИУМ = \frac{P_{факт}}{P_{уст}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Важно отметить, что КИУМ может изменяться в зависимости от времени суток, сезона, погодных условий и других факторов. Поэтому для получения более точной информации об эффективности использования оборудования необходимо проводить измерения и расчеты за длительный период времени. В связи с этим в данном исследовании КИУМ будет определяться, как соотношение среднего значения мощности, вырабатываемой за год ($P_{\text{ср за год}}$), к установленной мощности ВЭС (формула 5). Это позволит учесть изменения скорости ветра в течение года и усреднить получаемое значение КИУМ.

$$\text{КИУМ} = \frac{P_{\text{ср за год}}}{P_{\text{уст}}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Для ветровых электрических станций КИУМ может достигать значений до 40%, однако в среднем эффективными можно считать электростанции, чей КИУМ составляет от 20% и выше. Это в первую очередь связано со стохастическим характером скорости ветрового потока и его направления.

Используя вышеприведенный подход, определяем, что для ветровой установки в селе Онгурен КИУМ составляет 4,36%, что является очень низким даже по меркам возобновляемой генерации. В связи с этим установки ВЭУ в качестве источника энергии в данном регионе не рекомендуется.

Заключение. Использование возобновляемых источников энергии является одним из наиболее значимых трендов в области энергетики. Возобновляемая энергетика предлагает множество преимуществ, включая экологическую чистоту, экономическую выгоду и снижение зависимости от ископаемых видов топлива. Это особенно актуально в контексте глобальных экологических проблем, таких, как изменение климата и загрязнение окружающей среды.

Использование цифровых двойников в возобновляемой энергетике улучшает работу электростанций и сетевых объектов. Особенно это полезно для ветровой и солнечной энергетики, где погодные условия влияют на выработку энергии. Цифровые двойники помогают моделировать работу станций, предсказывать выработку энергии и оптимизировать режимы работы оборудования, что снижает затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также повышает надёжность и безопасность энергетических систем. Для построения цифрового двойника объекта необходимо грамотно реализовать его математическую и цифровую модели. В связи с этим в данной работе предлагается подход к построению цифровой модели ветровой электростанции.

Предложенный метод математического моделирования ветровых установок позволяет прогнозировать генерацию электрической энергии на основании усредненных значений ретроспективных данных скорости ветрового потока. При замене ретроспективных данных на реальные полученную математическую модель можно использовать для построения цифрового двойника ВЭУ.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00382, <https://rscf.ru/project/23-21-00382/>

Список источников

1. Гончаров А.С. Цифровой двойник: обзор существующих решений и перспективы развития технологии. /А.С. Гончаров, В.М. Саклаков // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции, 2018. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36585718>.
2. Aaron Parrott, Lane Warshaw Industry 4.0 and the digital twin technology. Deloitte Insights Manufacturing meets its match, 2017, – URL: <https://www2.deloitte.com/content/www/xen/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>
3. Боровков А.И. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов // Цифровая трансформация экономики и промышленности: Сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием, Санкт-Петербург, 20–22 июня 2019 года / Под редакцией А.В. Баб-

- кина. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого”, 2019. – С. 234-245. – EDN ZUPIWC.
4. Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития / Д.А. Сосфенов // Интеллект. Инновации. Инвестиции, 2023. – №4. – DOI:10.25198/2077-7175-2023-4-35.
 5. Царев М.В. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования / М.В. Царев, Ю.С. Андреев // Известия вузов. Приборостроение, 2021. – Т. 64. – № 7. – 517-531.
 6. Menegon L., Isatto E.J. Digital twins as enablers of structure inspection and maintenance. *Gestão & Produção*, 2023, 30, e4922, DOI:10.1590/1806-9649-2022v30e4922.
 7. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.
 8. Анохов И.В. Цифровая тень как инструмент для исследования отрасли / И.В. Анохов // E-Management, 2022. – Т. 5. – №1. – С. 80-92. – DOI:10.26425/2658-3445-2022-5-1-80-92
 9. Pimenta F., Pacheco J., Branco C.M. et al. Development of a digital twin of an onshore wind turbine using monitoring data. *Journal of physics: conference series*, 2020, 1618, 022065, DOI:10.1088/1742-6596/1618/2/022065
 10. Jahanshahi Zeitouni M., Parvaresh A., Abrazeh S. et al. Digital twins-assisted design of next-generation advanced controllers for power systems and electronics: wind turbine as a case study. *Inventions*, 2020, 5(2), 19, DOI:10.3390/inventions5020019.
 11. Chetan, M., Yao, S., Griffith, D. T. Multi-fidelity digital twin structural model for a sub-scale downwind wind turbine rotor blade. *Wind energy*, 2021, DOI:10.1002/we.2636.
 12. Merz K., Chabaud V., Garsia Rosa P.B. et al. A hierarchical supervisory wind power plant controller // *Journal of physics: Conference serie*, 2018, DOI:10.1088/1742-6596/2018/1/012026.
 13. Solman H., Kirkegaard J.K., Smits M. et al. Digital twinning as an act of governance in the wind energy sector. *Environmental science & policy*, 2022, vol. 127, pp. 272-279, DOI:10.1016/j.envsci.2021.10.027.
 14. Obafemi O., Adedeji P.A., Madushele N. et al. Overview of digital twin technology in wind turbine fault diagnosis and condition monitoring. 2021 IEEE 12th International conference on mechanical and intelligent manufacturing technologies, 2021, pp. 201-207, DOI:10.1109/ICMIMT52186.2021.9476186.
 15. Поддаева О.И. Архитектурно-строительная аэродинамика / О.И. Поддаева. – М.: НИУ МГСУ, 2015. – 88с.

Щукин Никита Игоревич. Инженер-исследователь отдела систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, *niksha14@mail.ru*, SPIN: 6038-0410, ORCID: 0000-0001-8331-335X, Россия, Иркутск, Лермонтова д.130

Щукина Виктория Михайловна. Аспирант ИРНИТУ, ассистент кафедры теплоэнергетики, *vitapiskunova98@gmail.com*, AuthorID: 921278, SPIN:6951-4829, ORCID:0000-0003-4019-8472.

UDC 519.654

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.011

Formation of a digital model of a wind turbine as part of a digital twin and its testing using the example of assessing the efficiency of wind turbine application in Ongurení village

Victoria M. Shchukina¹, Nikita I. Shchukin²

¹National research Irkutsk state technical university,
Russia, Irkutsk, *vitapiskunova98@gmail.com*

²Melentiev energy systems institute SB RAS,
Russia, Irkutsk

Abstract. The relevance of building digital twins in the field of wind power plants (WPP) is due to the rapid development of technologies and the need to improve the efficiency of energy systems operation. Digital twins allow creating virtual models of real objects, which opens new horizons for process optimization, condition

monitoring and prediction of plant operation. In the conditions of global transition to sustainable energy, the importance of digital modeling increases, as it contributes to more efficient use of resources, cost reduction and increased reliability of energy systems.

The paper discusses the process of forming a digital model of a wind power plant, which is a key element in the development of a digital twin. The paper describes the main approaches and methods used to create an accurate virtual replica of a real wind turbine, including the selection of modeling parameters such as geometric dimensions, materials and mechanical properties, as well as the definition of boundary conditions that allow for the most accurate reproduction of operational features.

Special attention is paid to the comparison of weather conditions, including wind speed time series, which is critical for estimating the utilization factor of the installed capacity of the wind turbine. These weather data allow for accurate modeling of real plant conditions and for adjusting model parameters to changing climatic conditions. The paper also discusses modern technologies and tools used to ensure a high degree of correspondence between the digital model and the physical object, such as data acquisition systems and analysis software. The prospects for the application of digital twins in the wind energy industry are emphasized in the context of optimizing plant performance, predicting power generation and improving overall operational efficiency, which is an important step towards the sustainable development of renewable energy sources.

Keywords: digital twin, numerical model, wind farms, mathematical modeling

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-21-00382, <https://rscf.ru/project/23-21-00382/>.

References

1. Goncharov A.S., Saklakov V.M. Cifrovoy dvojniki: obzor suschestvuyuschih reshenij i perspektivy razvitiya tehnologii [Digital twin: overview of existing solutions and prospects for technology development]. Sbornik trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Article in the proceedings of the national scientific and practical conference], 2018, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36585718>.
2. Aaron Parrott, Lane Warshaw. Industry 4.0 and the digital twin technology. Deloitte Insights Manufacturing meets its match, 2017, available at: <https://www2.deloitte.com/content/www/xen/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>
3. Borovkov A.I. Ryabov Yu.A. Tsifrovye dvojniki: opredelenie, podkhody i metody razrabotki [Digital Twins: definition, approaches and development methods]. Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki i promyshlennosti: Sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii s zarubezhnym uchastiem, Sankt-Peterburg, 20–22 iyunya 2019 goda [Digital transformation of the economy and industry: Proceedings of the scientific and practical conference with foreign participation, St. Petersburg, June 20–22, 2019], Edited by A.V. Babkin, Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo" [St. Petersburg: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University"], 2019, pp. 234-245, EDN ZUPIWC.
4. Sosfenov, D. A. Tsifrovoy dvojniki: istoriya vozniknoveniya i perspektivy razvitiya [Digital twin: history of origin and development prospects]. Intellekt. Innovatsii. Investitsii [Intellect. Innovations. Investments], 2023, vol. 4, pp. 35–43, DOI:10.25198/2077-7175-2023-4-35.
5. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. Tsifrovyye dvojniki v promyshlennosti: istoriya razvitiya, klassifikatsiya, tekhnologii, stsenarii ispol'zovaniya [Digital twins in industry: development history, classification, technologies, use cases]. Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye [News of universities. Instrumentation], 2021, vol. 64, no. 7. pp. 517-531.
6. Menegon L., Isatto E.J. Digital twins as enablers of structure inspection and maintenance. Gestão & Produção, 2023, 30, e4922, DOI:10.1590/1806-9649-2022v30e4922.
7. GOST R 57700.37-2021. Komp'yuternyye modeli i modelirovaniye. Tsifrovyye dvojniki izdeliy. Obshchiye polozheniya [State Standard P 57700.37-2021. Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions].
8. Anokhov I.V. Tsifrovaya ten' kak instrument dlya issledovaniya otrasli [Digital shadow as a tool for industry exploring]. E-Management, 2022, vol. 5, n 1, pp. 80-92, DOI:10.26425/2658-3445-2022-5-1-80-92.
9. Pimenta F., Pacheco J., Branco C.M. et al. Development of a digital twin of an onshore wind turbine using monitoring data. Journal of physics: conference series, 2020, 1618, 022065, DOI:10.1088/1742-6596/1618/2/022065
10. Jahanshahi Zeitouni M., Parvaresh A., Abrazeh S. et al. Digital twins-assisted design of next-generation advanced controllers for power systems and electronics: wind turbine as a case study. Inventions, 2020, 5(2), 19, DOI:10.3390/inventions5020019.
11. Chetan, M., Yao, S., Griffith, D. T. Multi-fidelity digital twin structural model for a sub-scale downwind wind turbine rotor blade. Wind energy, 2021, DOI:10.1002/we.2636.

12. Merz K., Chabaud V., Garsia Rosa P.B. et al. A hierarchical supervisory wind power plant controller // Journal of physics: Conference serie, 2018, DOI:10.1088/1742-6596/2018/1/012026.
13. Solman H., Kirkegaard J.K., Smits M. et al. Digital twinning as an act of governance in the wind energy sector. Environmental science & policy, 2022, vol. 127, pp. 272-279, DOI:10.1016/j.envsci.2021.10.027.
14. Obafemi O., Adedeji P.A., Madushele N. et al. Overview of digital twin technology in wind turbine fault diagnosis and condition monitoring. 2021 IEEE 12th International conference on mechanical and intelligent manufacturing technologies, 2021, pp. 201-207, DOI:10.1109/ICMIMT52186.2021.9476186.
15. Poddaeva O.I. Arhitekturno-stroitel'naya aerodinamika [Architectural and construction aerodynamics]. M., NIU MGSU, 2015, 88p.

Shchukin Nikita Igorevich. Research engineer, department of artificial intelligence systems in power engineering, L.A. Melentiev institute of power engineering systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, niksha14@mail.ru, SPIN: 6038-0410, ORCID: 0000-0001-8331-335X, Russia, Irkutsk, 130 Lermontova str.

Shchukina Victoria Mikhailovna. Postgraduate student of IrNRTU, assistant of heat power engineering department, vitapiskunova98@gmail.com, AuthorID:921278, SPIN: 6951-4829, ORCID: 0000-0003-4019-8472.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; одобрена после рецензирования 28.11.2024; принята к публикации 28.11.2024.

The article was submitted 09/02/2024; approved after reviewing 11/28/2024; accepted for publication 11/28/2024.