

УДК 004.89

doi:10.38028/ESI.2022.25.1.007

Разработка цифрового двойника ветровой электростанции: постановка задачи и проектирование

Массель Людмила Васильевна, Массель Алексей Геннадьевич, Шукин Никита Игоревич, Цыбиков Алексей Ринчинович

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, *niksha14@mail.ru*

Аннотация. Статья посвящена разработке цифрового двойника (ЦД) ветровой электростанции. Выполнен обзор существующих решений в этой области. Подробно рассматривается подход к построению ЦД, основанный на онтологическом инжиниринге. Описаны основные шаги онтологического инжиниринга. Приводится фрагмент системы онтологий ветровых систем. Рассмотрена математическая модель для определения параметров работы ветроэнергетической установки, используемая при построении ЦД. В статье также уделено внимание проектированию архитектуры ЦД, включающей цифровую тень, цифровую модель и систему управления. Так же в статье приводится этап реализации прототипа ЦД ветровой электростанции.

Ключевые слова: ветроэнергетика, цифровой двойник, онтологии, базы данных

Цитирование: Массель Л.В., Массель А.Г., Шукин Н.И., Цыбиков А.Р. Разработка цифрового двойника ветровой электростанции: постановка задачи и проектирование // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 1 (25). – С. 79-90. – DOI:10.38028/ESI.2022.25.1.007.

Введение. Сейчас активно ведутся работы по цифровизации энергетики, обусловленные принятием Энергетической стратегия РФ на период до 2035 года [1]. Все чаще поднимаются вопросы применения возобновляемых источников энергии, в частности, с использованием энергии ветра для производства электроэнергии. Многие европейские страны активно используют ветроэнергетические электростанции.

Исследования показывают, что в большинстве случаев использование возобновляемых источников электроэнергии экономически целесообразно. При этом, учитывая нестабильность производства электроэнергии ветровыми электростанциями, целесообразно рассматривать также накопители электрической энергии. Актуальны также управление электропотреблением и активизация роли потребителей в этом процессе. Для рассмотрения всех вышеперечисленных задач целесообразно использовать технологию цифровых двойников.

В Российской Федерации актуальность использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) обуславливается тем, что значительная часть территории России не охвачена централизованным электроснабжением. Районы децентрализованного энергоснабжения занимают около 60% площади Российской Федерации и находятся в основном в северных регионах страны [2]. В этих районах расположено много небольших изолированных населенных пунктов. Их электроснабжение обеспечивается главным образом на базе дизельных электростанций, использующих дорогое привозное топливо.

В то же время при использовании ВИЭ возникает одна основная проблема – их поведение, в особенности солнечных и ветровых электростанций, очень сильно зависит от внешних факторов, в первую очередь от погодных условий. Соответственно, для эффективного использования ВИЭ необходимо разрабатывать не только системы управления, но и системы прогнозирования поведения этих объектов в изменяемых условиях. При цифровизации одной из используемых технологий является технология цифровых двойников. Цифровой

двойник является виртуальным прототипом реального объекта, с помощью которого можно проводить эксперименты и проверять гипотезы, прогнозировать поведение объекта и решать задачу управления его жизненным циклом [3].

Цифровой двойник позволяет снизить затраты на проектирование оборудования и системы в целом, а также позволяет сократить расходы на эксплуатацию за счет перехода от плановых ремонтов к текущим. Таким образом, можно сделать вывод, что использование цифровых двойников при проектировании ветровых электростанций (ВЭС) может положительно сказаться как на этапе проектирования, так и на этапе их эксплуатации.

В рамках этой статьи будут рассмотрены существующие работы в области построения ЦД ветровых электростанций, применение онтологического инжиниринга для проектирования ЦД ВЭС, предлагаемые информационная модель и архитектура ЦД ВЭС. В заключении описаны направления дальнейшего развития работы.

1. Анализ существующих решений в области применения цифровых двойников в ветроэнергетике. В условиях всеобщей конкуренции проблема перехода к высокотехнологичным и эффективным производствам в последние десятилетия оказалась особенно актуальной. Вследствие стремительного развития информационных технологий появилась возможность сбора, хранения, передачи и анализа больших массивов данных, собираемых с реальных объектов. Благодаря этому обнаружилась необходимость пересмотра стандартных подходов к управлению производственными процессами на предприятиях. Эти факторы побудили в ряде стран разработку и принятие программ стратегического развития промышленности, таких, как «Платформа индустрия 4.0» (Германия), «Сделано в Китае 2025» (Китай), «Национальная технологическая инициатива» (Россия) и др. Все предложенные программы направлены на увеличение производительности труда, повышение экономической эффективности производств и внедрение современных наукоемких технологий [4].

Внедрение этих стратегий приводит к повышению уровня автоматизации предприятий и более широкой цифровизации производственных процессов. Подобные изменения обусловлены необходимостью быстро и точно моделировать продукт и его производственную технологию с целью увеличения рентабельности и экономии ресурсов в условиях современной конкуренции.

Решить эту задачу может помочь цифровой двойник, который объединяет как виртуальную среду предприятия (данные, поступающие с датчиков, математические и геометрические модели и др.), так и физическую (исполнительные механизмы, станки, схемы и др.), а также описывает процесс взаимодействия между этими средами и дополняет это технологиями автоматизации. В 2018 году компания «Gartner», являющаяся ведущей мировой исследовательской и консалтинговой компанией, включила цифровые двойники в список 10 стратегически важных технологий. Компания отмечала, что «цифровые двойники в контексте проектов Интернета вещей являются особенно многообещающими в течение следующих трех-пяти лет» [5].

В настоящее время технология цифровых двойников остается одной из самых многообещающих технологий, которую широко исследуют и пытаются применять [6-12].

Зарождение концепции цифровых двойников началось с авиакосмической промышленности. В одной из своих работ Глесген и Штаргель [13] приводят объяснение принципа использования цифровых двойников для сертификации транспортных средств и управления автопарком: «Цифровой двойник – это интегрированная мультифизическая, мультимасштабная, теоретико-вероятностная модель собранного транспортного средства или системы, в которой используются лучшие доступные физические модели, данные датчиков, а также история парка транспортных средств для моделирования состояния оригинала, работающего в реальных полевых условиях».

Можно отметить, что в настоящее время исследования и разработки в сфере цифровых двойников направлены на задачи функционирования [7-9, 11, 14-17], как, в общем, и наше текущее исследование.

Разработки и исследования в сфере цифровых двойников ветровых электростанций делятся на два направления: разработка цифровых двойников отдельных частей ветровой электростанции, в частности, разработка цифрового двойника структурной модели лопасти ротора ветрогенератора [9], и разработка цифрового двойника ветрогенератора [7, 8].

Основное отличие представленной работы заключается в том, что предложено использовать информацию, полученную на этапе решения задач функционирования объектов, для дальнейшего решения задач развития ветроэнергетических установок, интеграции их в общей изолированной энергосистеме на основе цифровых двойников, и последующей интеграции в едином цифровом пространстве. Помимо этой работы авторы параллельно решают задачи проектирования цифрового двойника солнечной электростанции.

За счет использования одного и того же подхода: онтологического инжиниринга, определения тех информационных потоков, которые необходимы для работы каждого ЦД в отдельности, и совместного функционирования в единой системе, предполагается решить вопрос их общей интеграции в едином информационном пространстве.

Анализ исследований, выполняемых в области использования концепции цифровых двойников [18, 19], подтверждает актуальность их построения для объектов ветровой электроэнергетики.

2. Онтологический инжиниринг при построении ЦД ВЭС. Применение онтологий в структуре ЦД приводится в работе [19]. Онтологический инжиниринг для построения ЦД был так же применен при построении ЦД солнечной электростанции (СЭС) [20]. В рамках данной работы были использованы классические этапы онтологического инжиниринга относительно разработки ЦД ВЭС.

Ниже представлены их результаты:

1. На этом этапе была поставлена цель – построить систему онтологий ветровой электростанции и интегрировать её в уже имеющуюся онтологию ТЭК, а также формализовать знания в области ветровой электроэнергетики для построения цифрового двойника. Определить область действия или «границы» онтологии и тип онтологии, прежде чем перейти к шагу 2. Разрабатываемая онтология относится к типу «легких онтологий» будет использована для построения цифровой тени и цифрового двойника.
2. На этом этапе была собрана вся необходимая информация, которая относится к описываемой области. Основная цель этого этапа – отбор и вербализация всех основных объектов и понятий в области. В результате были отобраны основные объекты и понятия, которые относятся к следующим областям:
 - система генерации;
 - возобновляемые источники энергии;
 - ветровые электростанции;
 - оборудование ВЭС.
3. Следующим этапом является определение всех основных объектов и концептов предметной области (основных уровней абстракции). Выявление структурированной иерархии является одной из основных целей на данном этапе. Иерархия, построенная с использованием результатов предыдущего шага, представлена ниже:
 - электроэнергетические системы;
 - системы генерации;
 - возобновляемые источники энергии;
 - ветровые электростанции;
 - оборудование ВЭС.

4. Последний этап посвящен верификации визуальной структуры путем исключения любых излишеств, синонимии и противоречий. На этом шаге были переработаны концепты и связи между ними, что привело к улучшению понятности и читаемости системы онтологий. В результате выполнения четырехступенчатого алгоритма была построена система онтологий ветровой электростанции. На рис. 1 приведена метаонтология, концепты которой, отмеченные значком, могут быть детализированы (пример для оборудования ВЭС приведен на рис. 2)



Рис. 1. Метаонтология ветровых электростанций

3. Математическая модель. В рамках данной работы для ЦД был выбран подход, предлагаемый Оганесяном Э.В., Бекировым Э.А. и др. [21]. В соответствии с ним приведем описание математической модели для определения параметров работы ветроэнергетической установки, которая необходима для построения ЦД ВЭС.

Для вычисления генерируемой мощности ветроэнергетической установки требуется использовать такие параметры: скорость ветра, коэффициент использования энергии ветра, быстроходность, КПД и площадь ометаемой поверхности.

В формуле (1) проводится расчет мощностной характеристики ВЭУ в зависимости от скорости ветра:

$$P_{ВЭУ}(V_i) = \rho C_P S_0 \eta \frac{V_i^3}{2} 10^{-3}, \quad (1)$$

Далее необходимо рассчитать характеристику коэффициента использования энергии ветра C_P от быстроходности Z ($Z_{opt} < Z < Z_{max}$) (2).

$$C_P = C_{Pmax} - \frac{C_{Pmax}}{(Z_{max} - Z_{opt})^2} (Z - Z_{opt})^2, \quad (2)$$

где C_{Pmax} – максимальный коэффициент использования энергии ветра.

При $Z \leq Z_{opt}$:

$$C_P = C_{Pmax} - \left(\frac{Z}{Z_{opt}}\right)^2 \left(3 - 2\frac{Z}{Z_{opt}}\right), \quad (3)$$

Для нахождения быстроходности используется следующее выражение.

$$Z = \frac{\omega R}{V_0}, \quad (4)$$

Где ω – угловая скорость; R – радиус ветроколеса; V_0 – скорость набегающего потока воздуха.

Эффективная выходная удельная мощность ΔP на 1 м^2 ометаемой поверхности ветротурбины (ВТ) вычисляется по формуле:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ВП}} C_p \eta, \quad (5)$$

где $\Delta P_{\text{ВП}} = \rho 10^{-3} \frac{V_{\text{НОМ}}^3}{2}$ – удельная мощность ветрового потока при скорости ветра $V_{\text{НОМ}}$; ρ – плотность воздуха (зима – 1,25, лето 0,72 кг/м³); C_p – средний коэффициент использования энергии ветра (принят равным 0,31); $\eta = \eta_A \eta_{\text{РЕД}} \eta_{\text{ЭГ}}$ – суммарный КПД ВЭУ; η_A – аэродинамический КПД ВТ (принят в пределах 0,91..0,916); $\eta_{\text{РЕД}}$ – КПД редуктора (принят в пределах 0,95..0,96); $\eta_{\text{ЭГ}}$ – КПД электрогенератора, зависящий от его мощности.

После расчетов величины ΔP определяется площадь ометаемой поверхности ВТ:

$$S_0 = \frac{P_{\text{ВЭУНОМ}}}{\Delta P} \quad (6)$$

Представленная математическая модель определяет необходимые параметры и имеет преимущества, которые связаны с учетом изменения погодных условий и взаимодействия элементов ветроэнергетической установки.

Рассмотренная модель необходима для получения данных о поведении системы. Использование этих данных дает возможность цифровому двойнику прогнозировать поведение объекта и решать задачу управления его жизненным циклом

4. Проектирование ЦД ВЭС. При проектировании и функционировании цифрового двойника ветровой электростанции необходимо использовать большой массив данных, например, характеристики погодных условий, характеристики оборудования и т.д. Этот набор данных необходимо организовать и хранить. В нашем случае было решено использовать реляционную базу данных PostgreSQL.

Проектирование базы данных велось на основе онтологий (рис. 1 и 2), построенных в пункте “онтологический инжиниринг”. В результате проектирования были выделены следующие сущности:

- характеристики погоды;
- характеристики ветрогенератора;
- характеристики сетевого инвертора;
- изолированная система;
- сетевой инвертор;
- расчет сетевого инвертора;
- ветрогенератор;
- расчет ветрогенератора;
- изолированная система_Погода.

Логическая модель данных приведена на рис.3.

Для понимания роли и места базы данных в общей архитектуре ЦД ВЭС на основе онтологии построена архитектура типового ЦД, представленная на рис. 4.

Архитектура включает в себя следующие блоки.

- Цифровая тень:

Состоит из программы цифровой тени, которая отвечает за работу с базой данных и из методов машинного обучения, которые необходимы для воссоздания модели поведения системы, а также для воссоздания пропущенных данных, необходимых для работоспособности всего цифрового двойника;

- Программный комплекс:

Необходим для обеспечения работоспособности всей системы, так как реализует интерфейс приложения, математическую модель и систему сбора оперативной информации, использующуюся для внесения управляющего воздействия посредством системы управления;

• Система управления:

Применяется для внесения управляющего воздействия на реальный объект, который моделирует цифровой двойник.

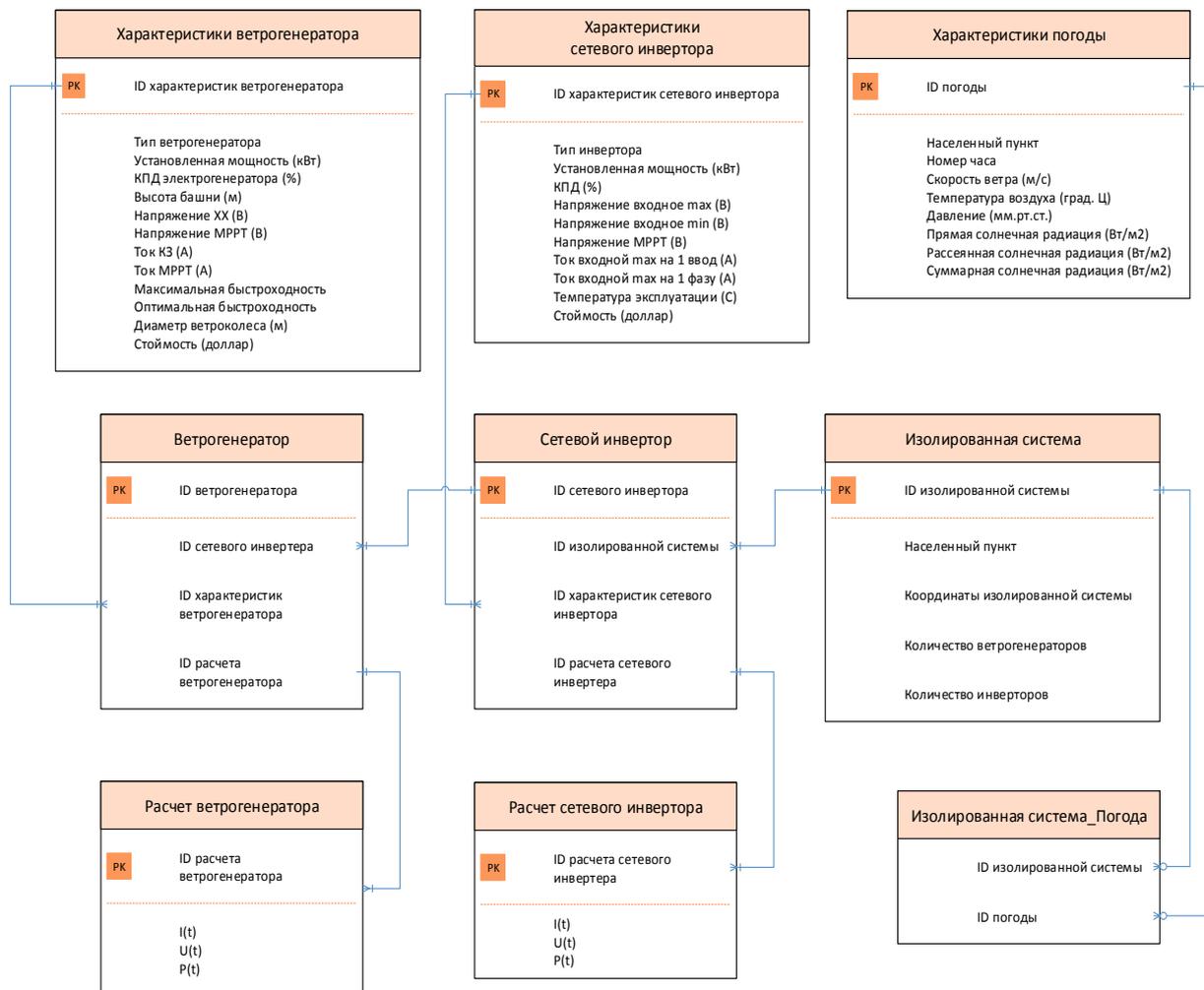


Рис. 3. Логическая модель данных

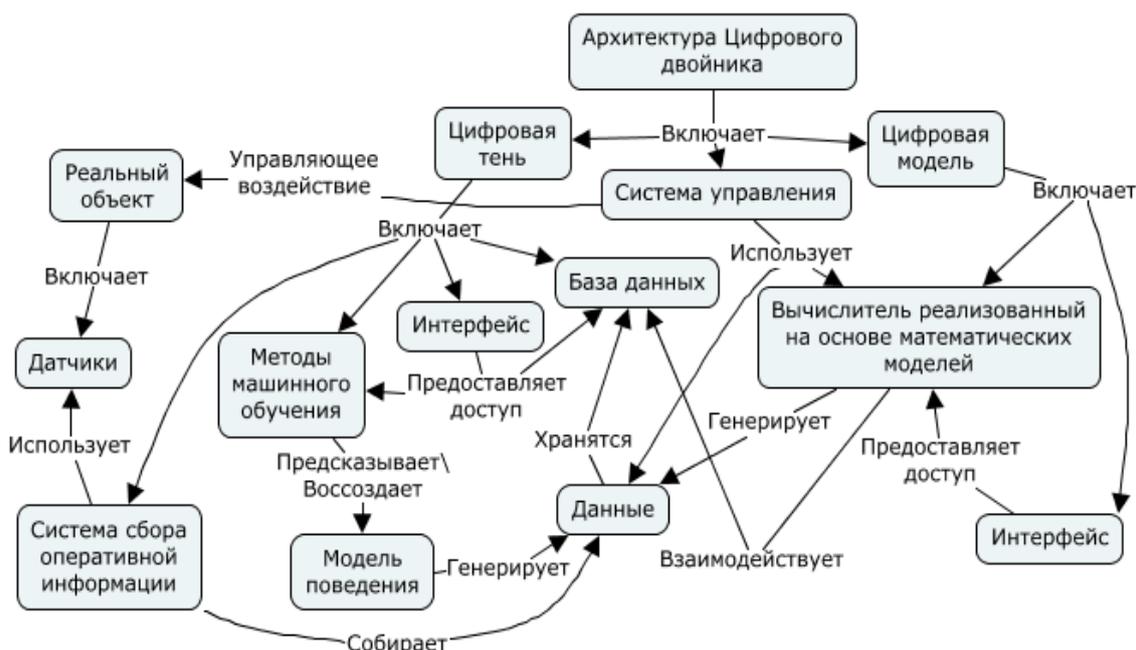


Рис. 4. Онтология цифрового двойника

5. Интерфейс для работы с базой данных. Работу с базой данных можно выполнять с использованием инструментов администрирования, предоставляемых СУБД PostgreSQL. Интерфейс для редактирования представлен на рис.5.

	locality character varying (15)	hour_number integer	wind_speed smallint	wind_temperature real	pressure real	direct_solar_rad real	diffuse_solar_rad real
84	Baikalsk	105037	1	-11.5	724.4	36.269047	250.0527
85	Baikalsk	105036	1	-11.5	724.4	5.906586	178.32928
86	Baikalsk	105035	2	-11.5	724.4	0	102.317955
87	Baikalsk	105034	3	-11.5	724.4	0	0

Рис. 5. Интерфейс PostgreSQL

Для добавления записей в таблицу и их удаления необходимо использовать SQL-запросы, что, в свою очередь, усложняет работу с ЦД. Вследствие этого было решено разработать свой интерфейс работы с базой данных, обеспечивающий следующие возможности:

- добавление форм для редактирования (добавления/изменения/удаления) таблиц;
- разработка формы, предоставляющей возможность подключения ветрогенератора к инверторам по особым условиям (количество портов в инверторе, подключение в инвертор только одинаковых ветрогенераторов и т.д.).

Пример разработанного интерфейса представлен на рис. 6.

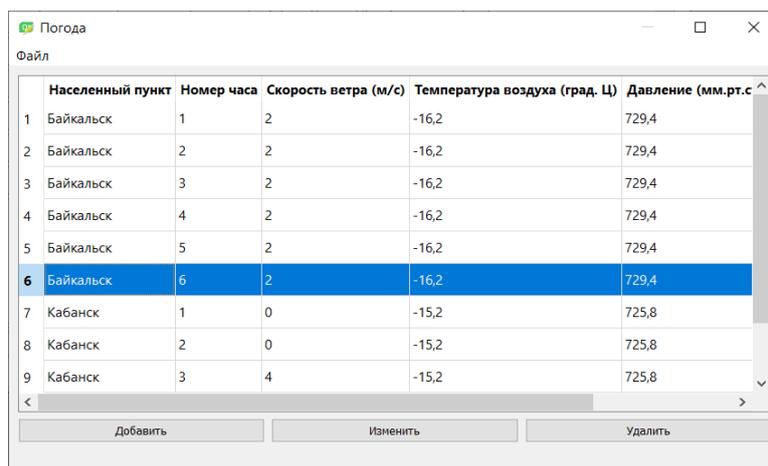


Рис. 6. Интерфейс программы для редактирования записей в таблице «Характеристики погоды»

Заключение. В статье рассмотрено существующее состояние в области разработки цифровых двойников, обозначены основные проблемы этих исследований, связанные, в первую очередь, с трудностями их интеграции с ЦД других энергетических систем. Детально описан онтологический подход, который использовался при проектировании цифрового двойника и базы данных для ветровой электростанции. Рассмотрен онтологический инжиниринг, как необходимый этап построения цифрового двойника ВЭС. Показана структура базы данных, её основные компоненты и их взаимосвязи на основе онтологических моделей. Основным назначением онтологий при разработке цифровых двойников является формальное описание и интеграция всех компонентов: математических моделей, баз данных и баз знаний (онтологий). В рамках развития этой работы предлагается усовершенствовать информационную модель, включающую базу данных, методы машинного обучения и систему сбора оперативной информации, за счет преобразования ее в цифровую тень. Преобразование приведет к улучшению сопровождения цифрового двойника, так как модуль с основными вычислениями (математической моделью) и модуль, предназначенный для работы с данными (цифровая тень) будут разделены.

В дальнейшем также необходимо подготовить систему к работе с большими массивами данных, собираемых с реального объекта. При работе с реальными объектами электроэнергетики появляется такая проблема, как большие объемы данных, поступающих с датчиков, которые необходимо хранить и обрабатывать. Для решения этой проблемы предлагается использовать методы Big Data, что, в свою очередь, позволит обрабатывать данные в допустимое время.

В результате выполнения вышеперечисленного появится возможность верификации модели по данным, получаемым от реального объекта, и, в случае необходимости, ее дальнейшей корректировки.

Благодарности. Результаты получены в рамках выполнения базового проекта ИСЭМ СО РАН АААА-А21-121012090007-7 по госзаданию FWEU-2021-0007 и проекта по гранту РФФИ №20-07-00994

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения 25.03.2022).
2. Суслов К.В. Развитие систем электроснабжения изолированных территорий России с использованием возобновляемых источников энергии / К.В. Суслов // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2017. – Т. 21. – № 5. – С. 131-142. – DOI: 10.21285/1814-3520-2017-5-131-142
3. Никитина Е. Попали в сети: как работают цифровые двойники в электроэнергетике./ Е. Никитина. – URL: <https://pro.rbc.ru/news/5db1b59a9a79474bb142a3fe> (дата обращения 25.03.2022).
4. Цифровой двойник, Индустрия 4.0. Информатизация и системы управления в промышленности. – URL: <https://zen.yandex.ru/media/isup/cifrovoy-dvoynik-industriia-40-5b83b7155b279900a96c54e8>.
5. Garfinkel J. Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2019 // Gartner Tech. Rep, 2018, Oct.
6. Ebrahimi A. Challenges of developing a digital twin model of renewable energy generators // 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2019, pp. 1059-1066, DOI: 10.1109/ISIE.2019.8781529
7. Pimenta, F., Pacheco, J., Branco, C. M., Teixeira, C. M., & Magalhães, F. 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
8. Jahanshahi Zeitouni, M., Parvaresh, A., Abrazeh, S., Mohseni, S.-R., Gheisarnejad, M., & Khooban, M.-H. 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
9. 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
10. Karl Merz, Valentin Chabaud, Paula B. Garcia-Rosa and Konstanze Kolle A hierarchical supervisory wind power plant controller. Journal of Physics: Conference Serie. 2018, DOI: 10.1088/1742-6596/2018/1/012026
11. H. Solman, J. K. Kirkegaard, M. Smits, B. V. Vliet, S. Bush Digital twinning as an act of governance in the wind energy sector. Environmental Science & Policy. 2022, v. 127, pp. 272-279, DOI: 10.1016/j.envsci.2021.10.027

12. F. Dembski, U. Wössner, M. Letzgs, M. Ruddat and C. Yamu Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany. Sustainability. 2020, 12(6), 2307, DOI: 10.3390/su12062307
13. E. Glaessgen and D. Stargel, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles" // 53rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 2012.
14. Digital solutions for wind farms. URL: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/onshore-wind/digital-wind-farm> (accessed: 20.03.2022)
15. H. Pargmann, D. Euhausen, R. Faber, Intelligent Big Data Processing for Wind Farm Monitoring and Analysis Based on Cloud-Technologies and Digital Twins. 2018 the 3rd IEEE International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis. 2018, pp. 233-237.
16. Obafemi O. Olatunji, Paul A. Adedeji, N. Madushele, Tien-Chien Jen, 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
17. D.J. Wagg, K. Worden, R.J. Barthorpe, P. Gardner, Digital twins: State-of-the-art and future directions for modeling and simulation in engineering dynamics applications. ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. 2020, В 6 (3), pp. 1–17, DOI: 10.1115/1.4046739
18. Андриюшкевич, С.К. Подходы к разработке и применению цифровых двойников энергетических систем / С.К. Андриюшкевич, С.П. Ковалев, Е. Нефедов // Цифровая подстанция, 2019. – № 12. – С.38-43.
19. Ковалёв, С.П. Проектирование информационного обеспечения цифровых двойников энергетических систем / С.П. Ковалёв // Системы и средства информатики, 2020. – Т.30. – №1. – С. 66-81.
20. Ludmila Massel, Nikita Shchukin and Alexey Cybikov International Conference of Young Scientists "Energy Systems Research 2021". Vol. 289, Digital twin development of a solar power plant, DOI: 10.1051/e3sconf/202128903002
21. Оганесян Э.В., Бекиров Э.А., Асанов М.М. Математическая модель для определения параметров работы ветроэнергетической установки / Э.В. Оганесян, Э.А. Бекиров, М.М. Асанов // Строительство и техногенная безопасность, 2016. – №3 (55). – С. 82-86.

Массель Людмила Васильевна, профессор, доктор технических наук, зав. отделом систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, massel@isem.irk.ru, ORCID: 0000-0002-0351-0415, Россия, Иркутск, Лермонтова д.130

Массель Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, amassel@gmail.com, AuthorID: 173012, SPIN-код: 2940-2510, Россия, Иркутск, Лермонтова д.130

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

Цыбиков Алексей Ринчинович, инженер-исследователь отдела систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, tsibikow@mail.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова д.130

UDC 004.89

doi:10.38028/ESI.2022.25.1.007

Digital twin development of a wind farm: problem statement and construction

Liudmila V. Massel, Alexey G. Massel, Nikita I. Shchukin, Alexey R. Tsybikov

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,

Russia, Irkutsk, *niksha14@mail.ru*

Abstract. The article is devoted to the development of a digital twin (DT) of a wind farm. A review of existing solutions in this area is made. The approach to the construction of DT, based on ontological engineering, is considered in detail. The main steps of ontological engineering are described. A fragment of the system of ontologies of wind systems is given. A mathematical model for determining the operation parameters of a wind power plant, used in the construction of DT, is considered. The article also focuses on the design of a DT architecture, including a digital shadow, a digital model, and a control system. Also in the article is the stage of implementation of the prototype DT wind farm.

Keywords: digital twin, ontologies, databases, wind energy

Acknowledgements: The results were obtained as part of the implementation of the basic project ISEM SB RAS AAAA-A21-121012090007-7 under the state order FWEU-2021-0007 and RFBR grant no. 20-07-00994

REFERENCES

1. Energeticheskaya strategiya RF na period do 2035 goda [Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035]. URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (data obrashcheniya 25.03.2022).
2. Suslov K.V. Razvitie sistem elektrosnabzheniya izolirovannyh territorij Rossii s ispol'zovaniem vozobnovlyaemyh istochnikov energii [Development of power supply systems of russian isolated territories using renewable energy sources]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, T. 21, no. 5, pp. 131-142, DOI: 10.21285/1814-3520-2017-5-131-142
3. Nikitina E. Popali v seti: kak rabotayut cifrovye dvojniki v elektroenergetike [Caught in the net: how digital twins work in the power industry], URL: <https://pro.rbc.ru/news/5db1b59a9a79474bb142a3fe> (data obrashcheniya 25.03.2022).
4. Cifrovoj dvojniki, Industriya 4.0. Informatizatsiya i sistemy upravleniya v pro-myshlennosti [Digital twin, Industry 4.0. Informatization and control systems in industry, URL: <https://zen.yandex.ru/media/isup/cifrovoi-dvojniki-industriia-40-83b7155b279900a96c54e8>.
5. Garfinkel J. Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2019. Gartner Tech. Rep, 2018, Oct.
6. Ebrahimi A. Challenges of developing a digital twin model of renewable energy generators // 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2019, pp. 1059-1066, DOI: 10.1109/ISIE.2019.8781529
7. Pimenta, F., Pacheco, J., Branco, C. M., Teixeira, C. M., & Magalhães, F. 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
8. Jahanshahi Zeitouni, M., Parvaresh, A., Abrazeh, S., Mohseni, S.-R., Gheisarnejad, M., & Khooban, M.-H. 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
9. 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
10. Karl Merz, Valentin Chabaud, Paula B. Garcia-Rosa and Konstanze Kolle A hierarchical supervisory wind power plant controller. Journal of Physics: Conference Serie. 2018,

- DOI: 10.1088/1742-6596/2018/1/012026
11. H. Solman, J. K. Kirkegaard, M. Smits, B. V. Vliet, S. Bush Digital twinning as an act of governance in the wind energy sector. *Environmental Science & Policy*. 2022, v. 127, pp. 272-279, DOI: 10.1016/j.envsci.2021.10.027
 12. F. Dembski, U. Wössner, M. Letzger, M. Ruddat and C. Yamu Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany. *Sustainability*. 2020, 12(6), 2307, DOI: 10.3390/su12062307
 13. E. Glaessgen and D. Stargel, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles" // 53rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 2012.
 14. Digital solutions for wind farms. URL: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/onshore-wind/digital-wind-farm> (accessed: 20.03.2022)
 15. H. Pargmann, D. Euhausen, R. Faber, Intelligent Big Data Processing for Wind Farm Monitoring and Analysis Based on Cloud-Technologies and Digital Twins. 2018 the 3rd IEEE International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis. 2018, pp. 233-237.
 16. Obafemi O. Olatunji, Paul A. Adedeji, N. Madushele, Tien-Chien Jen, 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
 17. D.J. Wagg, K. Worden, R.J. Barthorpe, P. Gardner, Digital twins: State-of-the-art and future directions for modeling and simulation in engineering dynamics applications. *ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst.* 2020, B 6 (3), pp. 1–17, DOI: 10.1115/1.4046739
 18. Andryushkevich, S.K. Podhody k razrabotke i primeneniyu cifrovyyh dvojniov energeticheskikh sistem [Approaches to the development and application of digital twins of energy systems]. *Tsifrovaya podstantsiya [Digital substation]*. 2019, no. 12, pp.38-43.
 19. Kovalyov, S.P. Proektirovanie informacionnogo obespecheniya cifrovyyh dvojniov energeticheskikh system [Information architecture of the power system digital twin]. *Sistemy i sredstva informatiki [Systems and means of informatics]*. 2020, vol.30, no. 1, pp. 66-81.
 20. Ludmila Massel, Nikita Shchukin and Alexey Cybikov International Conference of Young Scientists "Energy Systems Research 2021". Vol. 289, Digital twin development of a solar power plant, DOI: 10.1051/e3sconf/202128903002
 21. Oganesyanyan E.V., Bekirov E.A., Asanov M.M. Matematicheskaya model' dlya opredeleniya parametrov raboty vetroenergeticheskoy ustanovki [Mathematical model for determination of wind turbine operation parameters]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' [Construction and technogenic safety]*. 2016, no. 3 (55), pp. 82-86.

Liudmila V. Massel, professor, Head of the Department of Artificial Intelligence Systems in Energy, Institute of Energy Systems. L. A. Melentiev SB RAS, massel@isem.irk.ru, ORCID: 0000-0002-0351-0415, Russia, Irkutsk, st. Lermontova d.130

Alexey G. Massel, Ph. D, Senior Research Fellow of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Industry of the Institute of Energy Systems named after. L. A. Melentiev SB RAS, amassel@gmail.com, AuthorID:173012, SPIN: 2940-2510, Russia, Irkutsk, Lermontova d.130

Nikita I. Shchukin, Research Engineer of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Industry of the Institute of Energy Systems. L. A. Melentiev SB RAS, niksha14@mail.ru, SPIN: 6038-0410, ORCID: 0000-0001-8331-335X, Russia, Irkutsk, st. Lermontova d.130

Alexey R. Tsybikov, Research Engineer of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Industry of the Institute of Energy Systems named after. L. A. Melentiev SB RAS, tsybikow@mail.ru, Russia, Irkutsk, st. Lermontova d.130

Статья поступила в редакцию 20.03.2022; одобрена после рецензирования 25.03.2022; принята к публикации 29.03.2022.

The article was submitted 03.20.2022; approved after reviewing 03.25.2022; accepted for publication 03.29.2022