УДК 620.92:004.94

1.7. Интеллектуальная цифровизация объектов возобновляемой энергетики на основе технологии цифровых двойников

Филькин М.Е., ЦЭМИ РАН, Москва

В статье раскрываются перспективы цифровой трансформации объектов возобновляемой энергетики на основе технологии цифровых двойников. Архитектура технологии цифровых двойников определяется как многоуровневая информационно-аналитическая система, включающая физический объект, средства цифрового восприятия, интеграцию данных, цифровое моделирование, интеллектуальный анализ и обратную связь. Выявлены основные функции цифрового двойника в контексте управления объектами энергетики: контроль технического состояния, прогнозирование эксплуатационного режима, прогнозное обслуживание, оптимизация эксплуатации и принятие решений. Показано как комбинация данных мониторинга, физических моделей и алгоритмов интеллектуального анализа позволяет выйти за рамки текущего контроля параметров и прогнозирования состояния оборудования и оценки альтернатив его эксплуатации. Особое внимание уделяется ограничениям при внедрении технологии цифровых двойников, связанным с качеством и согласованностью данных, интеграцией разрозненной цифровой инфраструктуры и кибербезопасностью. Указаны направления дальнейшего развития технологии, включая использование самообучающихся моделей, искусственного интеллекта, распределенных вычислений и координацию географически распределенных объектов энергетики. Вывод о возможности использования технологии цифровых двойников в качестве основы для умного управления жизненным циклом объектов возобновляемой энергетики.

Введение

Развитие возобновляемой энергетики приводит не только к увеличению объемов низкоуглеродной генерации, но и к качественному усложнению процессов управления энергетической инфраструктурой. По мере роста количества солнечных и ветровых электростанций, накопителей энергии и распределенных генерирующих объектов возрастает объем операционных данных, расширяется круг взаимосвязанных технологических процессов и усиливается влияние внешних факторов на режимы работы энергетических систем (Малых, 2022). В результате эффективность функционирования объектов возобновляемой энергетики все в большей степени определяется не столько установленной мощностью оборудования, сколько возможностью непрерывно анализировать его состояние, прогнозировать изменения эксплуатационных параметров и своевременно корректировать принимаемые управленческие решения.

По данным IRENA (IRENA, 2026), в последние годы мировой сектор возобновляемой энергетики демонстрирует устойчивую положительную динамику как по объемам установленной мощности (см. Табл.1), так и по масштабам ввода новых генерирующих объектов (Сергеева, 2024). Расширение использования возобновляемых источников энергии сопровождается формированием распределенной энергетической инфраструктуры, включающей тысячи территориально удаленных объектов, функционирующих в условиях постоянно изменяющихся природно-климатических факторов (Кудрявцева. и др., 2023). Данная специфика существенно усложняет процессы диспетчеризации, технического обслуживания, прогнозирования режимов работы и оценки эффективности эксплуатации энергетического оборудования.

Таблица 1. Установленная мощность мировой возобновляемой энергетики, ТВт

	2021	2022	2023	2024	2025
Гидроэнергетика	1,36	1,40	1,41	1,43	1,46
Прирост г/г	+2,1%	+2,5%	+1,1%	+1,1%	+2,0%
Ветровая энергетика	0,82	0,90	1,02	1,13	1,29
Прирост г/г	+12,4%	+9,6%	+12,8%	+11,2%	+14,0%
Солнечная энергетика	0,87	1,06	1,42	1,88	2,40
Прирост г/г	+20,1%	+22,2%	+34,6%	+32,2%	+27,3%
Всего ВИЭ	**3,08**	**3,38**	**3,88**	**4,46**	**5,16**
Прирост г/г	***+9,5%***	***+9,8%***	***+14,7%***	***+15,1%***	***+15,5%***

Источник: IRENA (IRENA, 2026), расчеты автора

Особенностью объектов возобновляемой энергетики является высокая зависимость их производительности от внешней среды. Изменение интенсивности солнечного излучения, скорости ветра, температуры окружающей среды и других факторов приводит к непрерывному изменению режимов генерации, что требует постоянной адаптации алгоритмов управления. Одновременно возрастает значение свое-

временного выявления деградации оборудования, прогнозирования остаточного ресурса основных узлов и оценки возможных последствий различных сценариев эксплуатации. Решение подобных задач становится невозможным без использования интеллектуальных методов обработки больших потоков данных, поступающих от многочисленных датчиков и информационных систем.

Цифровая трансформация энергетического сектора все в большей степени ориентируется не только на автоматизацию отдельных производственных процессов, но и на создание единого цифрового пространства, обеспечивающего непрерывное сопровождение объекта на протяжении всего его жизненного цикла. Такой подход предполагает объединение данных мониторинга, математического моделирования, методов искусственного интеллекта, прогнозной аналитики и инструментов поддержки принятия решений в единую интеллектуальную систему управления. Одной из наиболее перспективных технологий, позволяющих реализовать подобную концепцию, являются цифровые двойники. В отличие от традиционных цифровых моделей, цифровой двойник представляет собой динамическую виртуальную модель физического объекта, непрерывно синхронизируемую с его реальным состоянием посредством потоков операционных данных (Sharma et al., 2024). Это позволяет не только воспроизводить текущие режимы функционирования оборудования, но и анализировать причины возникающих отклонений, прогнозировать изменение технического состояния, моделировать альтернативные сценарии эксплуатации и оценивать эффективность принимаемых решений до их практической реализации. Благодаря интеграции с технологиями Интернета вещей (Internet-ot-Things, IoT), искусственного интеллекта (ИИ), машинного обучения (machine learning, ML) и облачных вычислений цифровые двойники постепенно превращаются в интеллектуальную основу управления современными объектами возобновляемой энергетики (Kabir et al., 2024).

Значительное количество мировых исследований посвящено применению цифровых двойников в энергетике, где рассматриваются прикладные аспекты данной технологии либо конкретные типы энергетического оборудования (Гвоздяный и др., 2024). Меньше внимания уделяется рассмотрению цифрового двойника как интегральной интеллектуальной платформы цифровизации объектов возобновляемой энергетики, обеспечивающей переход от мониторинга технического состояния к комплексному управлению эксплуатацией, прогнозированию режимов функционирования и поддержке принятия стратегических решений. Предлагаемое исследование посвящено роли технологии цифровых двойников в интеллектуальной цифровизации объектов возобновляемой энергетики, анализу архитектуры и принципам их функционирования, а также выявлению ключевых направлений применения цифровых двойников для повышения эффективности, надежности и интеллектуализации процессов управления современными энергетическими системами.

1. Архитектура цифрового двойника объекта возобновляемой энергетики

Эффективность цифрового двойника определяется не столько точностью виртуального воспроизведения физического объекта, сколько способностью объединять разнородные данные, математические модели и интеллектуальные алгоритмы в единую систему поддержки управления (Массель и др., 2026). В отношении объектов возобновляемой энергетики эта особенность приобретает принципиальное значение, поскольку их функционирование формируется под воздействием большого числа взаимосвязанных факторов, включая техническое состояние оборудования, изменчивость природно-климатических условий, параметры электрической сети и режимы работы смежных энергетических объектов. По этой причине архитектуру цифрового двойника целесообразно рассматривать как многоуровневую интеллектуальную систему, обеспечивающую непрерывную синхронизацию физического и цифрового пространства.

Первый уровень архитектуры образует сам объект возобновляемой энергетики, выступающий источником первичной информации. В зависимости от назначения цифрового двойника таким объектом может быть отдельная фотоэлектрическая панель, ветроэнергетическая установка, аккумуляторная система накопления энергии, преобразователь, электрическая подстанция либо энергетический комплекс в целом. Каждый из этих объектов характеризуется собственными физическими процессами, однако для всех них ключевым условием функционирования цифрового двойника остается возможность непрерывного получения достоверной информации о текущем состоянии оборудования и параметрах его эксплуатации.

Следующий уровень формируется системой цифрового восприятия, включающей измерительные устройства, интеллектуальные датчики, средства телеметрии и коммуникационную инфраструктуру (Kabir et al.,, 2024). Именно на этом этапе происходит преобразование физических процессов в цифровые данные, пригодные для последующей обработки. При этом значение имеет не только объем поступающей информации, но и ее пространственная и временная согласованность. Разрозненные измерения отдельных параметров не позволяют сформировать адекватное представление о состоянии объекта, тогда как их интеграция создает основу для построения целостной цифровой модели, отражающей взаимосвязь между технологическими процессами.

По мере увеличения числа источников информации возрастает роль уровня интеграции данных. Его назначение заключается в объединении потоков, поступающих от различных сенсорных устройств, информационных систем и внешних цифровых сервисов. Для объектов возобновляемой энергетики особую ценность приобретают сведения о метеорологических условиях, характеристиках электрической

нагрузки, режимах работы накопителей энергии и параметрах энергосистемы. Интеграция таких данных позволяет перейти от анализа отдельных эксплуатационных показателей к исследованию причинно-следственных связей, определяющих эффективность функционирования энергетического объекта.



Рис. 1. Схема архитектуры цифрового двойника ВИЭ (составлено автором)

Центральным элементом архитектуры выступает цифровое представление объекта, которое не ограничивается созданием его трехмерной геометрической модели. Цифровой двойник воспроизводит структуру оборудования, физические закономерности его функционирования, динамику изменения эксплуатационных характеристик и особенности взаимодействия с окружающей средой. Благодаря непрерывной синхронизации с реальным объектом цифровая модель постоянно уточняется по мере поступления новых данных, сохраняя соответствие фактическому состоянию оборудования. Это отличает цифровой двойник от традиционных имитационных моделей, параметры которых, как правило, остаются неизменными в течение расчетного периода.

Дальнейшая обработка информации осуществляется аналитическим ядром, объединяющим методы математического моделирования, интеллектуального анализа данных и алгоритмы машинного обучения (Массель и др., 2026). На данном уровне цифровой двойник переходит от регистрации событий к их интерпретации. Сопоставление фактических параметров с расчетными значениями позволяет выявлять скрытые отклонения, оценивать влияние отдельных факторов на эффективность работы оборудования и определять тенденции изменения его технического состояния. Одновременно формируются прогнозные сценарии, отражающие возможные режимы функционирования объекта при изменении внешних условий или эксплуатационных параметров.

В архитектуре цифрового двойника особое место занимает уровень интеллектуального управления. Его задача заключается не только в представлении результатов анализа, но и в формировании рекомендаций по выбору наиболее эффективных режимов эксплуатации. Для объектов возобновляемой энергетики это означает возможность предварительной оценки различных вариантов управления без вмешательства в работу реального оборудования. Виртуальная среда позволяет моделировать последствия изменения режимов генерации, конфигурации энергосистемы, графиков технического обслуживания и алгоритмов управления накопителями энергии, что существенно снижает риск принятия неэффективных решений.

Завершающим элементом архитектуры становится контур обратной связи, обеспечивающий непрерывное взаимодействие цифровой модели с физическим объектом. После реализации управляющего воздействия эксплуатационные параметры вновь поступают в цифровой двойник, где используются для корректировки моделей, уточнения прогнозов и накопления новых знаний о функционировании оборудования. Благодаря этому архитектура приобретает адаптивный характер: каждая новая итерация повышает точность моделирования и расширяет возможности интеллектуального анализа (рис. 1).

Таким образом, архитектура цифрового двойника объекта возобновляемой энергетики представляет собой не совокупность отдельных цифровых компонентов, а интегрированную интеллектуальную

систему, объединяющую процессы восприятия, анализа, моделирования и управления в рамках единого информационного контура. Именно взаимосвязь этих уровней обеспечивает переход от традиционного мониторинга технического состояния к прогнозному управлению эксплуатацией энергетических объектов, формируя технологическую основу их интеллектуальной цифровизации.

2. Интеллектуальные возможности цифровых двойников в управлении объектами возобновляемой энергетики

Интеллектуальный потенциал цифрового двойника наиболее полно раскрывается в процессе непрерывного мониторинга технического состояния объектов возобновляемой энергетики. В отличие от традиционных систем диспетчерского контроля, фиксирующих преимущественно текущие операционные параметры, цифровой двойник обеспечивает комплексную интерпретацию поступающих данных, сопоставляя их с физическими закономерностями функционирования оборудования, накопленной историей эксплуатации и прогнозируемыми режимами работы. Благодаря этому мониторинг перестает ограничиваться регистрацией отдельных событий и трансформируется в инструмент непрерывной оценки технического состояния энергетического объекта. Подобный подход особенно востребован при эксплуатации солнечных и ветровых электростанций, где эффективность оборудования определяется одновременным воздействием множества взаимосвязанных факторов. Помимо внутренних характеристик оборудования существенное влияние оказывают интенсивность солнечного излучения, скорость и направление ветра, температура окружающей среды, влажность, загрязнение поверхности фотоэлектрических модулей, режимы работы преобразовательной техники и параметры электрической сети. Изменение любого из этих факторов способно привести к снижению производительности оборудования, однако определить истинную причину отклонений исключительно на основании отдельных измерений зачастую невозможно.

Цифровой двойник решает данную задачу посредством объединения разнородных потоков информации в едином аналитическом пространстве. Данные, поступающие от интеллектуальных датчиков, систем телеметрии, метеорологических комплексов и элементов энергетической инфраструктуры, синхронизируются во времени и сопоставляются с расчетными характеристиками цифровой модели. Такой механизм позволяет анализировать взаимное влияние отдельных процессов и формировать целостное представление о текущем состоянии объекта.

Принципиальное отличие цифрового двойника заключается в способности выявлять не только уже возникшие неисправности, но и ранние признаки изменения эксплуатационных характеристик оборудования. Даже незначительные отклонения температуры силовой электроники, увеличение вибрации подшипников ветроэнергетических установок, снижение коэффициента преобразования солнечных модулей или изменение электрических параметров инверторов могут рассматриваться системой как взаимосвязанные проявления единого процесса деградации. Использование интеллектуальных алгоритмов позволяет отделять случайные колебания параметров от устойчивых тенденций, требующих последующего анализа.

По мере накопления эксплуатационной информации цифровой двойник постепенно формирует цифровую историю функционирования объекта. Каждая новая итерация наблюдений уточняет параметры математической модели, повышая точность оценки технического состояния оборудования. В результате система приобретает способность учитывать индивидуальные особенности эксплуатации конкретного энергетического объекта, что существенно снижает вероятность ложных диагностических заключений и повышает достоверность оценки его работоспособности.

Если мониторинг отражает текущее состояние объекта возобновляемой энергетики, то такая способность, как прогнозирование, ориентировано на оценку его будущего поведения при изменении внутренних и внешних условий эксплуатации. Именно способность работать с перспективными сценариями отличает цифровой двойник от большинства традиционных информационных систем, поскольку позволяет перейти от реагирования на уже произошедшие события к заблаговременной подготовке управленческих решений.

Для объектов возобновляемой энергетики задача прогнозирования имеет значительно более сложный характер, чем для традиционной генерации. Производительность солнечных и ветровых электростанций определяется стохастическими природными процессами, влияние которых невозможно полностью исключить или стабилизировать. Одновременно функционирование оборудования зависит от его технического состояния, степени износа отдельных узлов, конфигурации электрической сети, режима работы накопителей энергии и динамики потребления электроэнергии. Формирование достоверного прогноза требует одновременного учета всех перечисленных факторов, что практически невозможно при использовании разрозненных моделей.

Интеллектуальная архитектура цифрового двойника позволяет объединить физические модели энергетического оборудования, данные непрерывного мониторинга и методы искусственного интеллекта в рамках единого вычислительного контура. Благодаря этому становится возможным моделирование поведения объекта при различных комбинациях операционных и природно-климатических условий (Ugwu et al., 2026). Система способна оценивать ожидаемую выработку электроэнергии, прогнозировать изменение коэффициента полезного действия оборудования, определять вероятность возникновения

перегрузок и рассчитывать влияние отдельных факторов на устойчивость функционирования энергетического объекта.

По мере накопления новых данных прогнозные модели непрерывно уточняются. Каждое расхождение между расчетными и фактическими показателями используется для корректировки параметров цифрового двойника, что обеспечивает постепенное повышение точности прогнозирования. Благодаря механизму самообновления система не только отражает текущее состояние объекта, но и постоянно совершенствует собственные аналитические возможности, превращаясь в динамический инструмент интеллектуального сопровождения эксплуатации объектов возобновляемой энергетики.

Непрерывный мониторинг и прогнозирование режимов функционирования создают информационную основу для реализации одной из наиболее значимых функций цифрового двойника – предиктивного обслуживания оборудования. В отличие от традиционных подходов, основанных на регламентных интервалах ремонта или устранении уже возникших неисправностей, предиктивное обслуживание ориентировано на выявление признаков деградации оборудования задолго до достижения критического состояния. Такой подход позволяет учитывать реальные условия эксплуатации объекта и своевременно корректировать графики технического обслуживания с учетом фактического состояния его отдельных компонентов.

Для объектов возобновляемой энергетики данная задача приобретает особую актуальность вследствие неоднородности операционных нагрузок. Даже идентичные по конструкции ветроэнергетические установки или фотоэлектрические модули могут демонстрировать различную динамику износа в зависимости от климатических условий, интенсивности использования, особенностей монтажа и режима работы. Применение единых нормативных сроков обслуживания в подобных условиях не всегда обеспечивает требуемую эффективность: преждевременное проведение ремонтных работ увеличивает эксплуатационные расходы, тогда как их запаздывание повышает вероятность отказов оборудования и снижения объемов выработки электроэнергии. Использование цифрового двойника позволяет перейти к непрерывной оценке технического ресурса оборудования. Анализируя совокупность эксплуатационных параметров, система выявляет постепенные изменения характеристик, которые по отдельности могут находиться в пределах допустимых значений, однако в совокупности свидетельствуют о начале деградационных процессов. Подобная оценка формируется не на основе фиксированных пороговых значений, а посредством сопоставления текущего состояния объекта с его цифровой моделью и накопленной историей функционирования.

Дополнительным преимуществом предиктивного обслуживания является возможность оптимизации распределения эксплуатационных ресурсов. При наличии большого числа территориально распределенных объектов цифровой двойник позволяет ранжировать оборудование по степени технического риска, определять приоритетность проведения ремонтных работ и рационально распределять персонал, запасные части и материально-технические ресурсы. Подобный подход особенно важен для крупных солнечных и ветровых электростанций, где даже незначительное сокращение времени простоя оборудования оказывает заметное влияние на общую эффективность функционирования энергетического комплекса.

Предиктивное обслуживание направлено преимущественно на сохранение технической работоспособности оборудования. В свою очередь, оптимизация режимов эксплуатации ориентирована на достижение максимальной эффективности его функционирования в изменяющихся условиях внешней среды. Реализация данной функции становится возможной благодаря способности цифрового двойника непрерывно анализировать взаимосвязь между состоянием объекта, параметрами окружающей среды и результатами его работы.

Эксплуатация объектов возобновляемой энергетики сопровождается постоянным поиском компромисса между максимизацией выработки электроэнергии, обеспечением надежности оборудования и минимизацией эксплуатационных затрат. Повышение производительности зачастую связано с увеличением механических и тепловых нагрузок, тогда как снижение интенсивности эксплуатации способствует продлению срока службы оборудования, но сопровождается уменьшением объемов генерации (Igbokwe et al., 2024). Решение подобных многокритериальных задач требует учета большого количества взаимозависимых факторов, анализ которых существенно превышает возможности традиционных методов управления.

Цифровой двойник формирует единое вычислительное пространство, в котором моделируются различные варианты функционирования объекта при изменении операционных параметров. Виртуальное воспроизведение технологических процессов позволяет оценить последствия корректировки режимов работы без непосредственного вмешательства в функционирование реального оборудования (Belik et al., 2023). Благодаря этому становится возможным выбор таких параметров эксплуатации, которые обеспечивают наиболее рациональное сочетание энергетической эффективности, технической надежности и экономической целесообразности.

Необходимость оптимизации режимов эксплуатации особенно возрастает при высокой изменчивости природно-климатических условий. Для солнечных электростанций цифровой двойник способен учитывать изменение интенсивности солнечного излучения, температурный режим фотоэлектрических модулей, степень их загрязнения и влияние затенения на эффективность генерации. При эксплуатации ветроэнергетических установок анализируются скорость и направление ветрового потока, динамические

нагрузки на основные конструктивные элементы, режимы работы генератора и преобразовательного оборудования. Комплексный анализ указанных факторов позволяет своевременно корректировать эксплуатационные параметры и поддерживать устойчивую работу энергетического объекта при изменении внешних условий. В целом, оптимизация режимов эксплуатации выходит далеко за пределы регулирования отдельных технологических параметров. В архитектуре цифрового двойника она представляет собой непрерывный процесс интеллектуального поиска наиболее эффективных вариантов функционирования энергетического объекта с учетом его технического состояния, внешних воздействий и стратегических целей управления. Именно эта способность превращает цифровой двойник из инструмента цифрового моделирования в активный элемент интеллектуальной системы управления объектами возобновляемой энергетики.

Последовательное развитие функций мониторинга, прогнозирования, предиктивного обслуживания и оптимизации режимов эксплуатации закономерно приводит к формированию новой роли цифрового двойника в системе управления объектами возобновляемой энергетики. Если на начальных этапах цифровой двойник выступает инструментом получения и анализа информации, то по мере накопления данных и усложнения аналитических моделей он трансформируется в интеллектуальную систему поддержки принятия управленческих решений. В этом случае объектом анализа становятся не отдельные эксплуатационные параметры, а совокупность взаимосвязанных процессов, определяющих эффективность функционирования энергетического объекта на различных временных горизонтах.

Принятие решений в современной возобновляемой энергетике сопровождается высокой степенью неопределенности. Изменчивость природно-климатических условий, колебания нагрузки, техническое состояние оборудования, режимы работы накопителей энергии и параметры электрической сети формируют сложную динамическую среду, в которой последствия каждого управляющего воздействия проявляются не изолированно, а через систему многочисленных взаимозависимостей (You et al., 2022). По этой причине использование отдельных расчетных моделей или экспертных оценок не всегда позволяет объективно оценить возможные результаты принимаемых решений.

Интеллектуальная архитектура цифрового двойника позволяет преодолеть данное ограничение посредством объединения информации, поступающей из различных источников, с физическими моделями объекта и алгоритмами интеллектуального анализа данных. На этой основе формируется виртуальная среда, в которой управленческие решения могут быть предварительно проверены до их практической реализации. Такая возможность существенно снижает риск возникновения неблагоприятных последствий, поскольку позволяет оценить реакцию энергетического объекта на изменение эксплуатационных параметров без вмешательства в работу реального оборудования (You et al., 2022).

Цифровой двойник позволяет оценивать риски на основе совокупности накопленных операционных данных и результатов моделирования. Сопоставление этих данных дает возможность выявлять факторы, способные снизить надежность оборудования, оценивать вероятность неблагоприятных сценариев и заранее определять их возможные последствия для энергетического объекта. Управление рисками в таком случае строится не вокруг уже возникших отказов или критических отклонений, а вокруг их раннего выявления и своевременной корректировки режима работы.

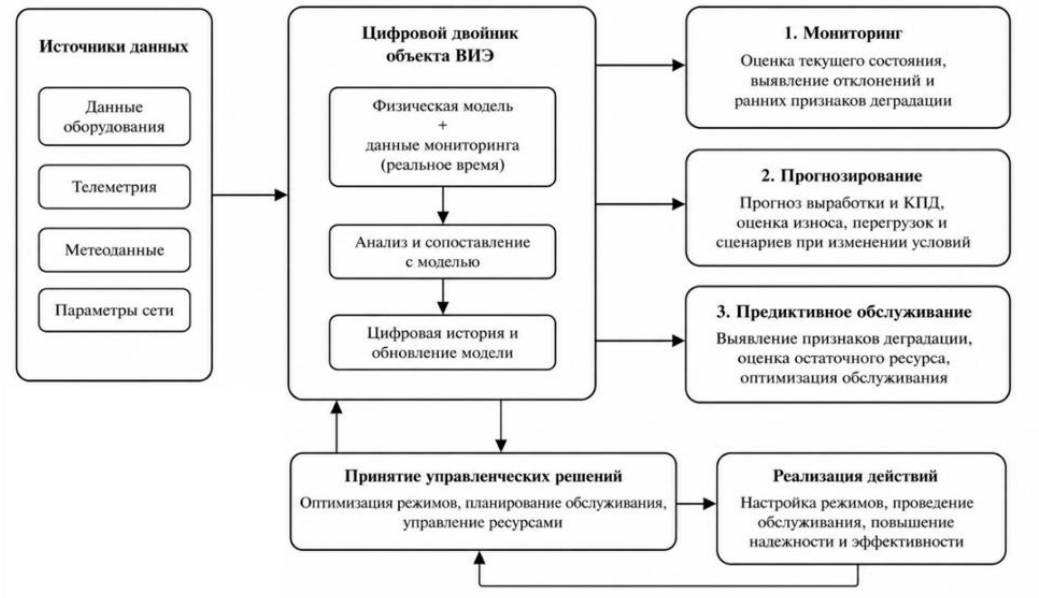


Рис. 2. Функциональная схема интеллектуальных возможностей цифрового двойника объектов возобновляемой энергетики (составлено автором)

По мере расширения масштабов возобновляемой энергетики существенно возрастает значение координации большого количества территориально распределенных объектов. В подобных условиях цифровой двойник перестает выполнять функции локальной системы сопровождения отдельной установки и становится инструментом поддержки управления энергетическими комплексами. Интеграция цифровых моделей солнечных электростанций, ветроэнергетических установок, накопителей энергии и элементов электрической сети позволяет оценивать последствия принимаемых решений не только для каждого объекта в отдельности, но и для всей энергетической инфраструктуры (Al-Shetwi et al., 2025). Это создает предпосылки для согласованного управления распределенной генерацией, повышения устойчивости энергоснабжения и более эффективного использования энергетических ресурсов.

Представляется, что цифровой двойник формирует качественно новый уровень управления объектами возобновляемой энергетики, при котором процессы мониторинга, прогнозирования, предиктивного обслуживания и оптимизации объединяются в едином интеллектуальном контуре принятия решений (Рис. 2). В результате управление приобретает не реактивный, а проактивный характер, основанный на комплексном анализе данных, сценарном моделировании и непрерывной адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации. Именно эта способность интегрировать разрозненные информационные потоки и преобразовывать их в обоснованные управленческие решения определяет роль цифрового двойника как ключевого элемента интеллектуальной цифровизации объектов возобновляемой энергетики.

3. Основные ограничения внедрения технологии цифровых двойников и направления дальнейшего развития

Несмотря на значительный потенциал цифровых двойников в интеллектуальном управлении объектами возобновляемой энергетики, их широкое практическое внедрение остается сопряженным с рядом технологических и организационных ограничений. Большинство из них связано не с возможностями самой технологии, а со сложностью формирования единой цифровой среды, способной обеспечить непрерывное взаимодействие физических объектов, информационной инфраструктуры и интеллектуальных алгоритмов (Kim et al., 2026). По мере усложнения энергетических систем возрастают требования к качеству исходных данных, согласованности программно-аппаратных решений и вычислительным ресурсам, необходимым для поддержания цифрового двойника в актуальном состоянии.

Одним из ключевых факторов остается достоверность информационной базы. Цифровой двойник формирует выводы на основе непрерывного потока данных, поэтому ошибки измерений, задержки передачи информации, неполнота телеметрии или несогласованность данных из различных источников способны существенно снизить точность моделирования и прогнозирования. Для распределенных объектов возобновляемой энергетики прогнозирование осложняется необходимостью одновременно учитывать состояние оборудования, параметры электрической сети и изменчивость природно-климатических условий.

Не менее важным ограничением является интеграция цифровых двойников с существующей энергетической инфраструктурой. На практике многие объекты используют разнородные информационные системы, разработанные в различное время и функционирующие на основе несовместимых протоколов обмена данными. В подобных условиях создание единого цифрового пространства требует разработки унифицированных механизмов взаимодействия, способных обеспечить корректный обмен информацией между оборудованием различных производителей и программными платформами.

Расширение масштабов цифровизации сопровождается увеличением объема передаваемой и обрабатываемой информации, что закономерно повышает требования к кибербезопасности энергетических объектов. Компрометация цифровой модели, несанкционированное изменение операционных данных или вмешательство в алгоритмы управления способны повлиять не только на качество принимаемых решений, но и на устойчивость функционирования энергетической инфраструктуры. По этой причине развитие цифровых двойников неразрывно связано с совершенствованием механизмов защиты данных, безопасного обмена информацией и контроля доступа к критически важным элементам цифровой среды.

Перспективным направлением в свете расширения интеллектуальных возможностей цифровых двойников становится использование самообучающихся моделей, способных автоматически уточнять собственные параметры по мере накопления эксплуатационных данных и адаптироваться к изменению условий функционирования энергетических объектов. Одновременно возрастает значение интеграции цифровых двойников с генеративным искусственным интеллектом, распределенными вычислениями и интеллектуальными энергетическими платформами, что позволит перейти от поддержки отдельных управленческих решений к комплексному управлению распределенными энергетическими системами в режиме реального времени.

Таким образом, дальнейшая эволюция цифровых двойников определяется не только совершенствованием методов цифрового моделирования, но и развитием единой интеллектуальной экосистемы, объединяющей данные, вычислительные технологии и инструменты принятия решений. Именно способность обеспечить адаптивное, безопасное и непрерывное управление сложными объектами возобновляемой энергетики будет определять роль цифровых двойников как одного из ключевых элементов цифровой трансформации энергетического сектора.

4. Заключение

Представляется, что развитие цифровых двойников откроет новые возможности для интеллектуальной цифровизации объектов возобновляемой энергетики, обеспечивая переход от локальной автоматизации отдельных процессов к комплексному управлению жизненным циклом энергетических систем. Комбинация операционных данных, математического моделирования, технологий искусственного интеллекта и сценарного анализа формирует единый интеллектуальный контур, способный не только отражать текущее состояние объекта, но и предсказывать его дальнейшее функционирование, оценивать последствия различных управленческих решений и адаптироваться к изменяющимся режимам работы.

Ключевая ценность цифрового двойника определяется не созданием виртуальной копии энергетического объекта, а его способностью объединять процессы мониторинга, прогнозирования, предиктивного обслуживания, оптимизации режимов работы и поддержки принятия решений в единой информационно-аналитической среде. Такой подход способствует повышению надежности функционирования объектов возобновляемой энергетики, более эффективному использованию энергетических ресурсов и снижению операционных рисков.

Дальнейшее развитие технологии целесообразно связывать с созданием самообучающихся цифровых двойников, интеграцией генеративного искусственного интеллекта, развитием распределенных вычислений и созданием единых цифровых платформ управления энергетическими экосистемами. Перспективным направлением исследований представляется разработка мультиагентных цифровых двойников, способных координировать работу территориально распределенных объектов генерации, накопителей энергии и интеллектуальных электрических сетей в режиме реального времени. Реализация подобных решений позволит перейти к новому уровню управления возобновляемой энергетикой, основанному на непрерывной адаптации, прогнозном анализе и интеллектуальной координации всех элементов энергетической инфраструктуры.

Список литературы

1. Гвоздяный С. Е., Мясков А. В. Российский и зарубежный опыт использования цифровых двойников в энергетике // Экономика промышленности. – 2024. – Т. 17, № 4. – С. 378-387. – EDN AWVRKB.
2. Кудрявцева О. В., Васильев С. В., Зорина Т. Г. Эффективность реализации программы поддержки возобновляемой энергетики (на примере солнечной энергетики) // Russian Journal of Economics and Law. – 2023. – Т. 17, № 4. – С. 745-774. – EDN QYSPYA.
3. Малых Е. Б. Развитие возобновляемой энергетики в мире в контексте геоэкономических интересов России // Экономика и управление. – 2022. – Т. 28, № 3. – С. 255-266. – EDN CNUQNY.
4. Массель Л. В., Цыбиков А. Р., Щукин Н. И. Методы построения умных цифровых двойников для проектирования возобновляемых источников энергии // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2026. – № 1(41). – С. 43-58. – EDN RVHDUB.
5. Сергеева С. А. Особенности стимулирования рынка возобновляемой энергетики России и перспективы его развития // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 4(60). – С. 148-153. – EDN UVCNTF.
6. Al-Shetwi A. Q., et al. Digital Twin Technology for Renewable Energy, Smart Grids, Energy Storage and Vehicle-to-Grid Integration: Advancements, Applications, Key Players, Challenges and Future Perspectives in Modernising Sustainable Grids // IET Smart Grid. – 2025. – Vol. 8, No. 1. – Art. e70026.
7. Belik M., Rubanenko O. Implementation of Digital Twin for Increasing Efficiency of Renewable Energy Sources // Energies. – 2023. – Vol. 16, No. 12. – Art. 4787.
8. Igbokwe N. C., et al. The Role of Digital Twins in Optimizing Renewable Energy Utilization and Energy Efficiency in Manufacturing // Siber International Journal of Digital Business. – 2024. – Vol. 1, No. 4. – P. 93-111.
9. IRENA. Renewable Energy Statistics 2026. – Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2026. – ISBN 978-92-9260-758-6.
10. Kabir M. R., Halder D., Ray S. Digital Twins for IoT-Driven Energy Systems: A Survey // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 177123-177143.
11. Kim M., Ghobadi F., Tayerani Charmchi A. S., Lee M., Lee J. Digital Twins for Clean Energy Systems: A State-of-the-Art Review of Applications, Integrated Technologies, and Key Challenges // Sustainability. – 2026. – Vol. 18, No. 1. – Art. 43.
12. Sharma P., et al. Overview of Digital Twins in Renewable Energy // 2024 1st International Conference on Trends in Engineering Systems and Technologies (ICTEST). – IEEE, 2024. – P. 1-6.
13. Ugwu C. N., et al. Integration of AI-Driven Digital Twins for Real-Time Optimization of Renewable Energy Grids // Frontiers in Energy Research. – 2026. – Vol. 14. – Art. 1748233.
14. You M., et al. Digital Twins Based Day-Ahead Integrated Energy System Scheduling under Load and Renewable Energy Uncertainties // Applied Energy. – 2022. – Vol. 305. – Art. 117899.

References in Cyrillics

1. Gvozdyany S. E., Myaskov A. V. Rossiyskiy i zarubezhnyy opyt ispol'zovaniya tsifrovykh dvoynikov v energetike [Russian and Foreign Experience in the Use of Digital Twins in the Energy Sector] // Ekonomika promyshlennosti. – 2024. – T. 17, № 4. – S. 378–387. – EDN AWVRKB.

2. Kudryavtseva O. V., Vasiliev S. V., Zorina T. G. Effektivnost' realizatsii programmy podderzhki vozobnovlyaemoy energetiki (na primere solnechnoy energetiki) [Efficiency of the Implementation of the Renewable Energy Support Program (Using Solar Energy as an Example)] // Russian Journal of Economics and Law. – 2023. – T. 17, № 4. – S. 745–774. – EDN QYSPYA.
3. Malykh E. B. Razvitie vozobnovlyaemoy energetiki v mire v kontekste geoekonomicheskikh interesov Rossii [Development of Renewable Energy in the World in the Context of Russia's Geoeconomic Interests] // Ekonomika i upravlenie. – 2022. – T. 28, № 3. – S. 255–266. – EDN CNUQNY.
4. Massel L. V., Tsybikov A. R., Shchukin N. I. Metody postroeniya umnykh tsifrovykh dvoynikov dlya proektirovaniya vozobnovlyaemykh istochnikov energii [Methods for Constructing Smart Digital Twins for the Design of Renewable Energy Sources] // Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. – 2026. – № 1(41). – S. 43–58. – EDN RVHDUB.
5. Sergeeva S. A. Osobennosti stimulirovaniya rynka vozobnovlyaemoy energetiki Rossii i perspektivy ego razvitiya [Features of Stimulating the Russian Renewable Energy Market and Prospects for Its Development] // Ekonomika ustoychivogo razvitiya. – 2024. – № 4(60). – S. 148–153. – EDN UVCNTF.

Ключевые слова

цифровой двойник, возобновляемая энергетика, искусственный интеллект, интеллектуальная цифровизация, прогнозная аналитика, интеллектуальные энергетические системы, архитектура цифрового двойника

Филькин Михаил Евгеньевич – кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Центральный экономико-математический институт РАН
ORCID 0000-0002-7378-1309
mfilkin@mail.ru

Filkin M. Intelligent digitalization of renewable energy facilities based on digital twin technology

Keywords

digital twin, renewable energy, artificial intelligence, intelligent digitalization, predictive analytics, intelligent energy systems, digital twin architecture

DOI: 10.34706/DE-2026-05-07

JEL: Q42, Q47

Abstract

The article explores the prospects for the digital transformation of renewable energy facilities based on digital twin technology. The architecture of digital twin technology is defined as a multi-level information and analytical system comprising the physical asset, digital sensing tools, data integration, digital modeling, intelligent analysis, and feedback. The main functions of a digital twin in the context of energy facility management are identified: technical condition monitoring, operational regime forecasting, predictive maintenance, operational optimization, and decision-making. It is shown how the combination of monitoring data, physical models, and intelligent analysis algorithms makes it possible to go beyond the current monitoring of parameters to forecasting equipment condition and assessing alternative operating scenarios. Particular attention is paid to the limitations of implementing digital twin technology associated with data quality and consistency, the integration of fragmented digital infrastructure, and cybersecurity. Directions for further development of the technology are identified, including the use of self-learning models, artificial intelligence, distributed computing, and the coordination of geographically distributed energy facilities. The possibility of using digital twin technology as a basis for smart lifecycle management of renewable energy facilities is concluded.