

Научная статья

УДК 004.942

DOI 10.25205/1818-7900-2022-20-4-76-99

Поиск подходящей архитектуры для разработки цифрового двойника гибридных энергетических систем в изолированных от сетевых энергосистем средах с использованием ТРИЗ-эволюционного подхода

Георгий Андреевич Тимофеев

Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Комсомольск-на-Амуре, Россия

gtimjob@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-7648-7878>

Аннотация

Данная работа посвящена исследованию архитектуры цифровых двойников. Разумеется, неизбежно, что технологиям создания цифровых двойников, заимствуемым из машиностроительных отраслей, присущи специфические недостатки, такие как необходимость в массивных затратных программных инструментах и высококвалифицированном персонале, хорошо заметная в немногочисленных примерах цифровых двойников энергосистем. Не хватает однозначно интерпретируемых достоверных данных в стандартных машиночитаемых форматах, адекватных математических моделей, приборного оснащения. В статье предложены подходы к преодолению этих недостатков при проектировании и эксплуатации систем цифровых двойников.

Ключевые слова

цифровые двойники, ТРИЗ-эволюция, гибридные энергетические системы, архитектура цифровых двойников, изолированные среды, промышленные энергетические системы, виртуальное и физическое прототипирование, интеграция

Для цитирования

Тимофеев Г. А. Поиск подходящей архитектуры для разработки цифрового двойника гибридных энергетических систем в изолированных от сетевых энергосистем средах с использованием ТРИЗ-эволюционного подхода // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2022. Т. 20, № 4. С. 76–99. DOI 10.25205/1818-7900-2022-20-4-76-99

Searching for an Appropriate Architecture for the Development of Digital Twins for Hybrid Energy Systems in Isolated Environments Using the TRIZ Evolutionary Approach

Georgy A. Timofeev

Komsomolsk-on-Amur State University
Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

gtimjob@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-7648-7878>

Abstract

This work is devoted to the study of the architecture of digital twins. Of course, it is inevitable that the technology of creating digital twins, borrowed from engineering, realizing specific turnovers, such as the need for massive costly soft-

© Тимофеев Г. А. , 2022

ware tools and highly qualified personnel, is clearly visible in the few examples of digital dual power systems. There is a lack of unambiguously interpreted data values in standard machine-readable formats, adequate mathematical models, and instrumentation. The article proposed approaches to overcome the shortcomings in the design and operation of digital twin systems.

Keywords

digital twins, TRIZ-evolution, hybrid energy systems; architecture of digital twins, isolated environments, industrial energy systems, virtual and physical prototyping, integration

For citation

Timofeev G. A. Searching for an Appropriate Architecture for the Development of Digital Twins for Hybrid Energy Systems in Isolated Environments Using the TRIZ Evolutionary Approach. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 76–99. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2022-20-4-76-99

Введение

В настоящее время в России и мире всё активнее исследуются и решаются вопросы замены ископаемого топлива на возобновляемые источники энергии. В некоторых населенных пунктах, не имеющих доступа к централизованным энергосетям [1], могут быть использованы автономные гибридные энергетические системы (АГЭС). Различные условия потребления энергии в таких населенных пунктах могут создавать трудности в оценке энергообеспеченности. Также большое количество исследователей отмечают, что основные проблемы АГЭС связаны с накопителями энергии (электрические аккумуляторы, суперконденсаторы, водородные накопители, гидронакопители) [10–13, 50, 51].

На данный момент существует множество вариантов решения проблем, связанных с заменой ископаемого топлива на возобновляемые источники энергии и энергообеспеченностью автономных гибридных энергетических систем. Одним из наиболее эффективных методов является использование технологии цифровых двойников (ЦД). Эта технология позволяет детально изучить работу системы, оценить ее эффективность и сделать необходимые коррективы для оптимизации ее работы. Также использование цифрового двойника позволяет проводить моделирование ситуаций и исследование их влияния на работу системы, что помогает предотвратить непредвиденные ситуации и снизить риски.

Для систематизации знаний о цифровых двойниках предлагается использовать ТРИЗ-эволюционный подход. Развернувшаяся в последние десятилетия информационная революция обострила потребность в создании и развитии новых методов извлечения и систематизации знаний, которые обеспечивали бы возможность изучения и структурирования огромного объема информации за ограниченное время. Разрешение данного противоречия может быть достигнуто с помощью ТРИЗ-эволюционного подхода. ТРИЗ (теория решения изобретательских задач) – это область знаний, которая исследует механизмы развития искусственных систем с целью создания практических методов решения инновационных задач [3, 4]. Благодаря своей высокой эффективности и универсальности ТРИЗ завоевала международное признание и успешно применяется и развивается в множестве (118) областей человеческой деятельности, в первую очередь в промышленном производстве, науке и образовании [5, 6].

Цель данного исследования – систематизация знаний о существующих механизмах реализации цифровых двойников и определение наиболее подходящей архитектуры для реализации цифрового двойника для автономных гибридных энергетических систем, которые не имеют централизованной энергосети.

В связи с этим были решены следующие задачи:

- 1) выявить определение, что такое цифровой двойник;
- 2) выявить основные концепции архитектуры для реализации цифровых двойников;
- 3) определить критерии оптимальности для достижения оптимальных конфигураций использования источников энергии.

- 4) определить главные противоречия, которые стали «движущими силами» каждой новой архитектуры;
- 5) установить приемы разрешения этих противоречия на основе ТРИЗ-инструментов;
- 6) сформировать ТРИЗ-эволюционная карту для цифровых двойников;
- 7) определить вариант цифровых двойников для гибридных энергетических систем, предназначенных для поселений Крайнего Севера, изолированных от сетевых энергосистем.

1. Определение и основные концепции

Цифровой двойник – система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями. Объединяя различные математические и компьютерные модели в единую систему, можно получить новую сущность – цифровой двойник, которая позволяет всесторонне описать изделие и системно подойти к разработке, производству и эксплуатации изделий [7]. По структуре цифровой двойник – это сложный комплекс взаимосвязанных компьютерных моделей, способных представить объект-оригинал, его состояние и поведение при разных параметрах объекта или среды. В литературе по цифровым двойникам не хватает однозначно интерпретируемых достоверных данных в стандартных машиночитаемых форматах, адекватных математических моделей, приборного оснащения для автономных гибридных энергетических систем, лишенных обеспечения центральной системы энергосети. В рамках этого раздела будут рассмотрены различные варианты, которые упоминаются в научной литературе.

В рамках данного исследования был сформирован поисковый запрос digital twin Energy system и «цифровой двойник энергетических систем» для наукометрических баз данных, что привело к формированию реестра из 269 статей. Далее, для формирования морфологической таблицы, реестр был отфильтрован в соответствии с тематикой исследования. На основе ключевых слов, аннотаций и содержания статей были выявлены факторы «Классификация источника энергии», «Программная платформа» и «Архитектура цифрового двойника». Для каждого фактора в статьях были идентифицированы варианты и определены их упоминания в источниках. Результатом данного этапа является морфологическая таблица (см. табл.).

Изучая базовые концепции цифровых двойников, можно выделить архитектуру, описанную в научной статье [16]. В основной базовой концепции ЦД были выделены три основных аспекта: физическое пространство, виртуальное пространство и их связь для обмена данными и информацией. Эта концепция известна в промышленной сфере как киберфизическая система (CPS) или, более конкретно, киберфизическая производственная система (CPPS). CPS описывает как автономные, так и кооперативные элементы и подсистемы на всех уровнях производства, которые могут взаимодействовать друг с другом в зависимости от ситуации. Целью CPS является создание элементов, которые могут получать и обрабатывать данные, что позволяет им самостоятельно выполнять определенные задачи и взаимодействовать с людьми. CPS можно охарактеризовать физическим активом и его кибернетическим аналогом, что означает, что цифровой двойник (DT) может быть рассмотрен только как цифровая модель внутри CPS

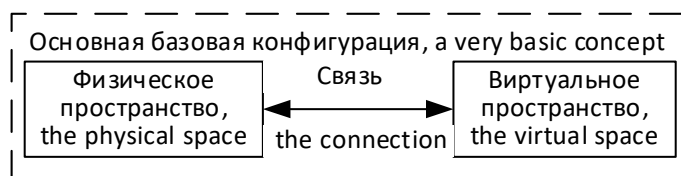


Рис. 1. Основная базовая конфигурация ЦД

Fig. 1. Basic concept

Морфологическая таблица

Morphological Table

Факторы	Var. 01	Var. 02	Var. 03	Var. 04	Var. 05	Var. 06
Классификация источника энергии	Солнечная энергия	Ветровая энергия	Ядерная энергия	Водородная энергия	—	—
	[17, 22, 23, 31, 38, 43] всего 6	[18, 32, 33, 35, 36, 37] всего 6	[30, 42] всего 2	[40, 41] всего 2	—	—
Программная платформа	RT MATLAB/Simulink	Amazon Web Services	Predix	Prod-romos	CFD ANSYS Fluent	Plant Simulation
	[15, 19, 20, 25, 29, 34, 57] всего 7	[20] всего 1	[17] всего 1	[19] всего 1	[21] всего 1	[25] всего 1
Архитектура цифрового двойника	5D-DT, GDTA, Intelligent Digital Twin	Эталонная структура для цифровых двойников	COGNITWIN, IoT	—	—	—
	[15] всего 1	[16, 24, 26, 27, 28] всего 5	[17, 18, 39, 44, 45, 46, 47, 48] всего 8	—	—	—

[16]. Понимание этой концепции важно для определения наиболее подходящей архитектуры для реализации цифрового двойника для автономных гибридных энергетических систем, оставшихся без центральной системы энергосетей. Требования общества: увеличить, точность и надежность данных.

2. Первый этап ТРИЗ

Идеальный конечный результат: цифровая копия физического объекта или процесса с различными подсистемами, самовзаимодействующими друг с другом с целью получения точных и надежных данных от физического объекта.

Техническое противоречие №1: при увеличении надежности данных недопустимо увеличиваются потери информации.

Главный параметр №1: надежность данных.

Главный параметр №2: потери информации.

В рамках **первого этапа эволюции** был применен принцип **предварительного действия**. Это позволило создать процесс преобразования данных в информацию между виртуальным и физическим объектом, а также другие необходимые уровни для функционирования системы. На рис. 2 представлена схема данного этапа ТРИ-эволюции.

Концепция киберфизической системы (CPS) или киберфизической производственной системы (CPPS) широко известна в промышленной сфере. Для реализации CPS была предложена пятиуровневая архитектура, известная как 5C architecture, состоящая из следующих уровней:

- 1) интеллектуального соединения;
- 2) преобразования данных в информацию;

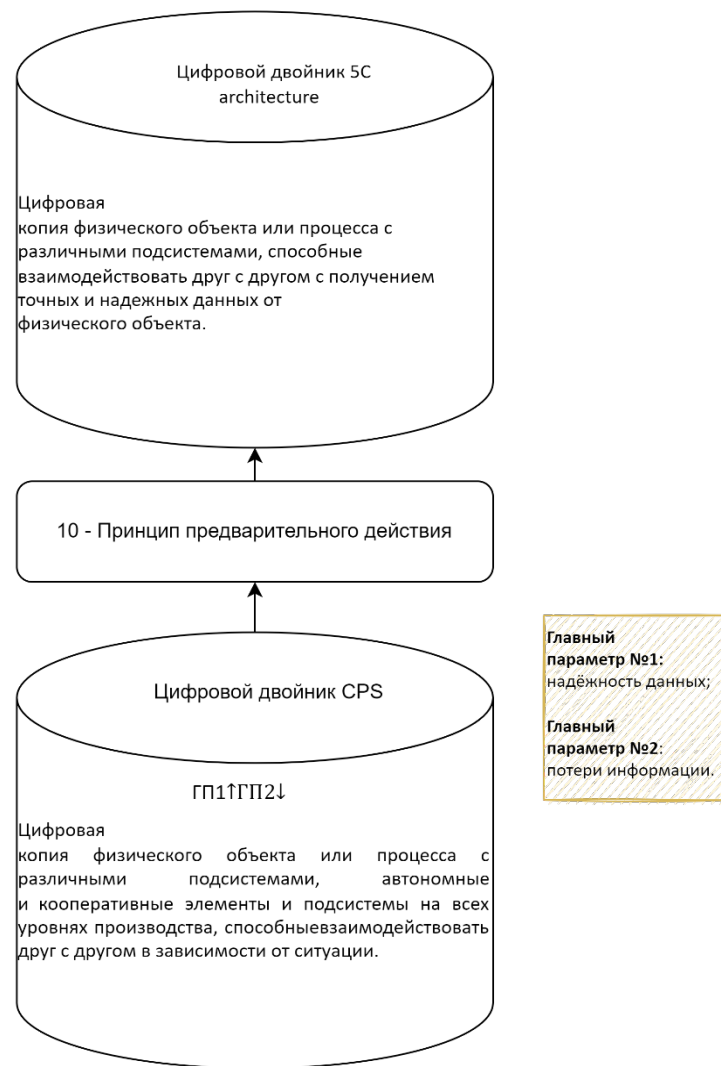


Рис. 2. ТРИЗ-эволюция модели CPS в 5C architecture
Fig. 2. TRIZ evolution of the CPS model into 5C architecture

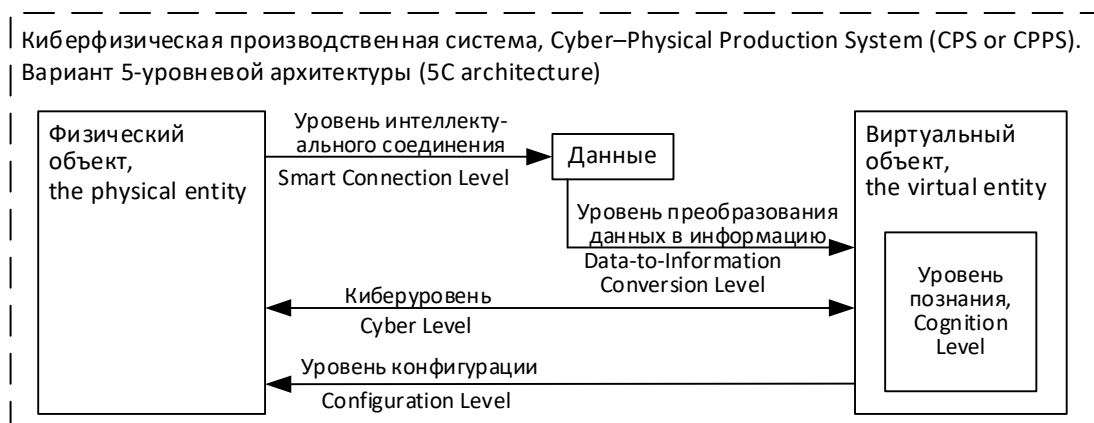


Рис. 3. Пятиуровневая архитектура для CPS/ CPPS (5C architecture)
Fig. 3. Five-level architecture for CPS/CPPS (5C architecture)

- 3) киберуровень;
- 4) познания;
- 5) конфигурации. [15]

Требование общества: разработка архитектуры, которая позволит уменьшить потерю информации и добиться оптимального соответствия между виртуальным и физическим объектом. В рамках данного этапа была разработана концепция, которая описывает архитектуру, имеющую возможность получать и обрабатывать данные, позволяющую самостоятельно выполнять определенные задачи и взаимодействовать. В соответствии с требованиями общества к минимизации потери информации и достижению оптимального соответствия виртуального и физического объекта на этом этапе были разработаны архитектуры, которые позволяют системам получать и обрабатывать данные самостоятельно, но они не рассматривают взаимодействие со сложными системами и требуют улучшения.

3. Второй этап ТРИЗ

Идеальный конечный результат: цифровая копия физического объекта или процесса с различными подсистемами, с платформой виртуальных сущностей, состоящих из множества моделей виртуальных сущностей, организующая информацию для зеркального отображения определенного аспекта физической сущности.

Техническое противоречие №2: при уменьшении потери информации недопустимо увеличиваются потери времени.

Главный параметр №2: потеря информации.

Главный параметр №3: потери времени.

Приемы разрешения:

- 1) ПРИНЦИП ПОСРЕДНИКА;
- 2) ПРИНЦИП КОПИРОВАНИЯ.

В рамках второго этапа эволюции **принцип посредника** был реализован путем внедрения промежуточных объектов между **виртуальным** и **физическим** объектом. Это позволило реализовать передачу действия между ними. В этом контексте были внедрены дополнительные посредники, такие как платформа управления данными и платформа услуг. Схема этого этапа ТРИЗ-эволюции представлена на рис. 4.

Эталонная структура для цифровых двойников является ключевым компонентом в контексте архитектуры 5C CPS. Для предлагаемой системы были идентифицированы основные строительные блоки ЦД, включая их свойства (структуру и взаимосвязь). Компоненты архитектуры на верхнем уровне включают платформы:

- 1) физических сущностей;
- 2) виртуальных сущностей;
- 3) управления данными;
- 4) услуг.

«Платформа виртуальных сущностей» представляет собой коллекцию моделей виртуальных сущностей, включающую информацию для отображения специфических аспектов физической сущности. Она отвечает за создание и обслуживание «семантических моделей», таких как геометрические, физические, поведенческие, модели правил и модели процессов, физической сущности, для создания ее виртуального представления.

«Платформа управления данными» осуществляет функции сбора, управления и хранения данных, включая сбор, передачу, интеграцию, обработку, очистку, анализ и извлечение информации. «Платформа услуг» состоит из моделей услуг и слоя управления услугами, которые организуют услуги для конкретных приложений [16]. На рис. 5 представлена схема этой архитектуры.

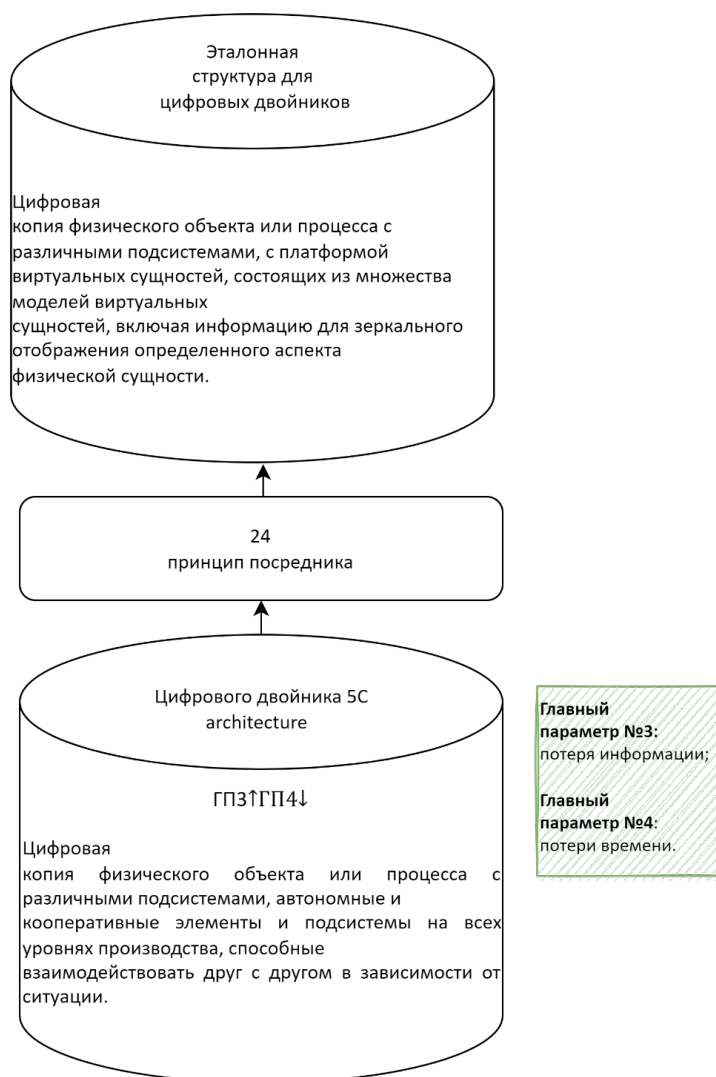


Рис. 4. ТРИЗ-эволюция модели из 5C architecture в «Эталонная структура для цифровых двойников»

Fig. 4. TRIZ model evolution from 5C architecture to “Reference structure for digital twins”

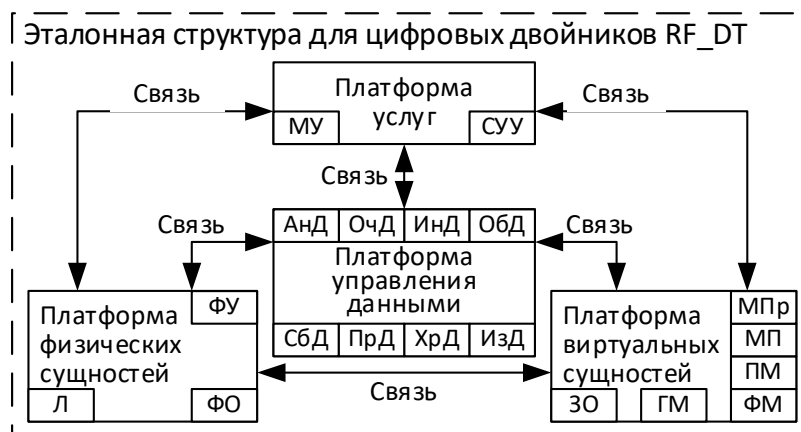


Рис. 5. Архитектура пятимерного цифрового двойника (5D-DT)

Fig. 5. Architecture of a 5D digital twin (5D-DT)

На рис. 6 представлена схема преобразования архитектуры 5C CPS в модель цифрового двойника, а также отображена взаимосвязь между физическим объектом и его цифровой моделью. Эта модель представляет собой альтернативное видение этапа ТРИЗ-эволюции.

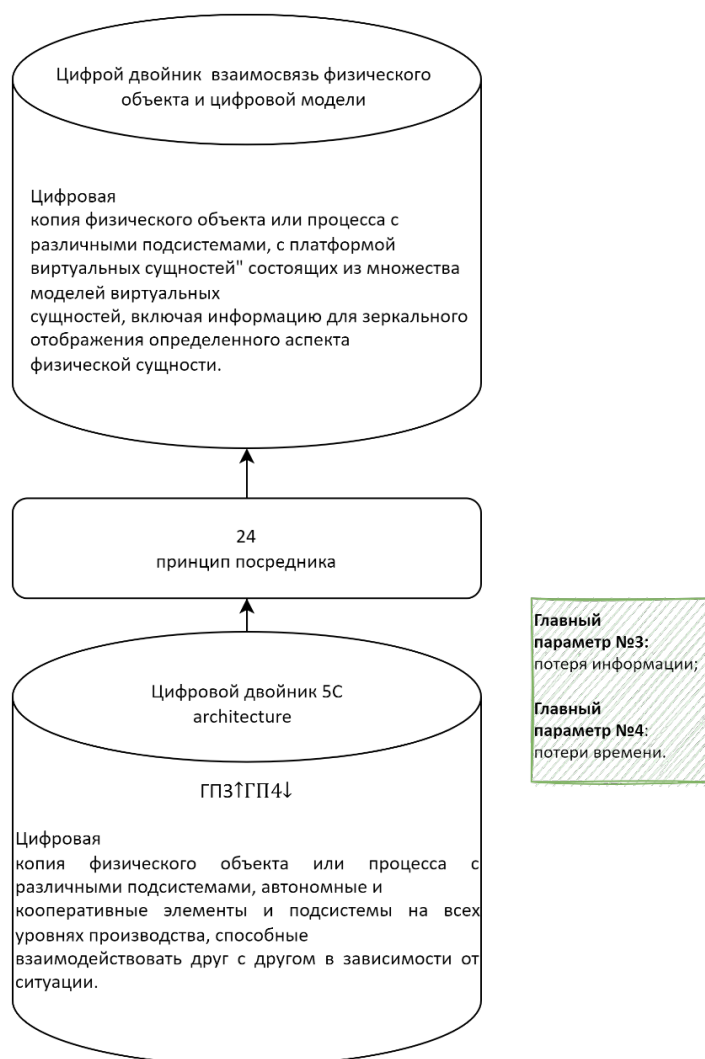


Рис. 6. ТРИЗ-эволюция модели цифрового двойника и взаимосвязь физического объекта и цифровой модели
Fig. 6. TRIZ evolution of the digital twin model and the relationship between a physical object and a digital model

Следующая модель является альтернативным видением данного этапа ТРИЗ-эволюции.

Модель выражается через пять вспомогательных компонентов (рис. 7) [26]:

- 1) датчики и исполнительные механизмы из физического мира;
- 2) интеграция;
- 3) данные;
- 4) аналитика;
- 5) постоянно обновляемое приложение цифрового двойника.

Датчики, распределенные по всему производственному процессу, создают сигналы, которые позволяют ЦД собирать оперативные данные и данные об окружающей среде, касающиеся физического процесса в реальном мире. Реальные эксплуатационные данные и данные об окружающей среде, полученные от датчиков, объединяются с данными компании, такими как спецификация (BOM), корпоративные системы и проектные спецификации.

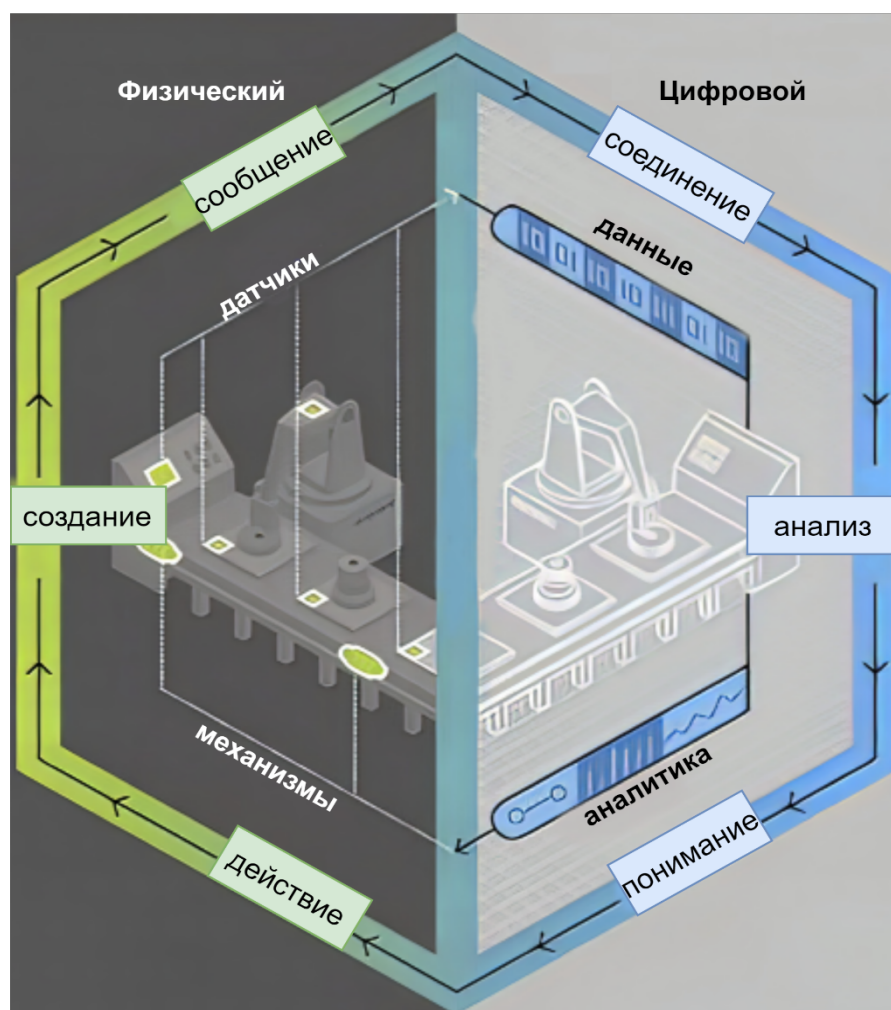


Рис. 7. Модель цифрового двойника и взаимосвязь физического объекта и цифровой модели

Fig. 7. Digital twin model and relationship between physical object and digital model

На рис. 8 представлена схема преобразования модели из архитектуры 5С в модель цифрового двойника системы на основе данных, полученных из системы диспетчерского управления предприятием. Данная модель представляет собой альтернативный вариант представления этапа ТРИЗ-эволюции.

Предложенная методология предназначена для создания цифровых дубликатов холодильной системы на основе данных, которые хранятся в системе диспетчерского управления предприятием. Методология использует теорию нечетких множеств, и алгоритм автоматического извлечения правил дает возможность определить зависимости между измерениями холодильной системы и ее поведением в реальном мире. Это позволяет создать более точную модель цифрового двойника системы водяного охлаждения [24], как показано на рис. 9. Архитектура получения цифровых двойников системы водяного охлаждения, основанная на использовании теории нечетких множеств и алгоритма автоматического извлечения правил, является перспективным подходом для повышения эффективности и оптимизации реальных физических систем.

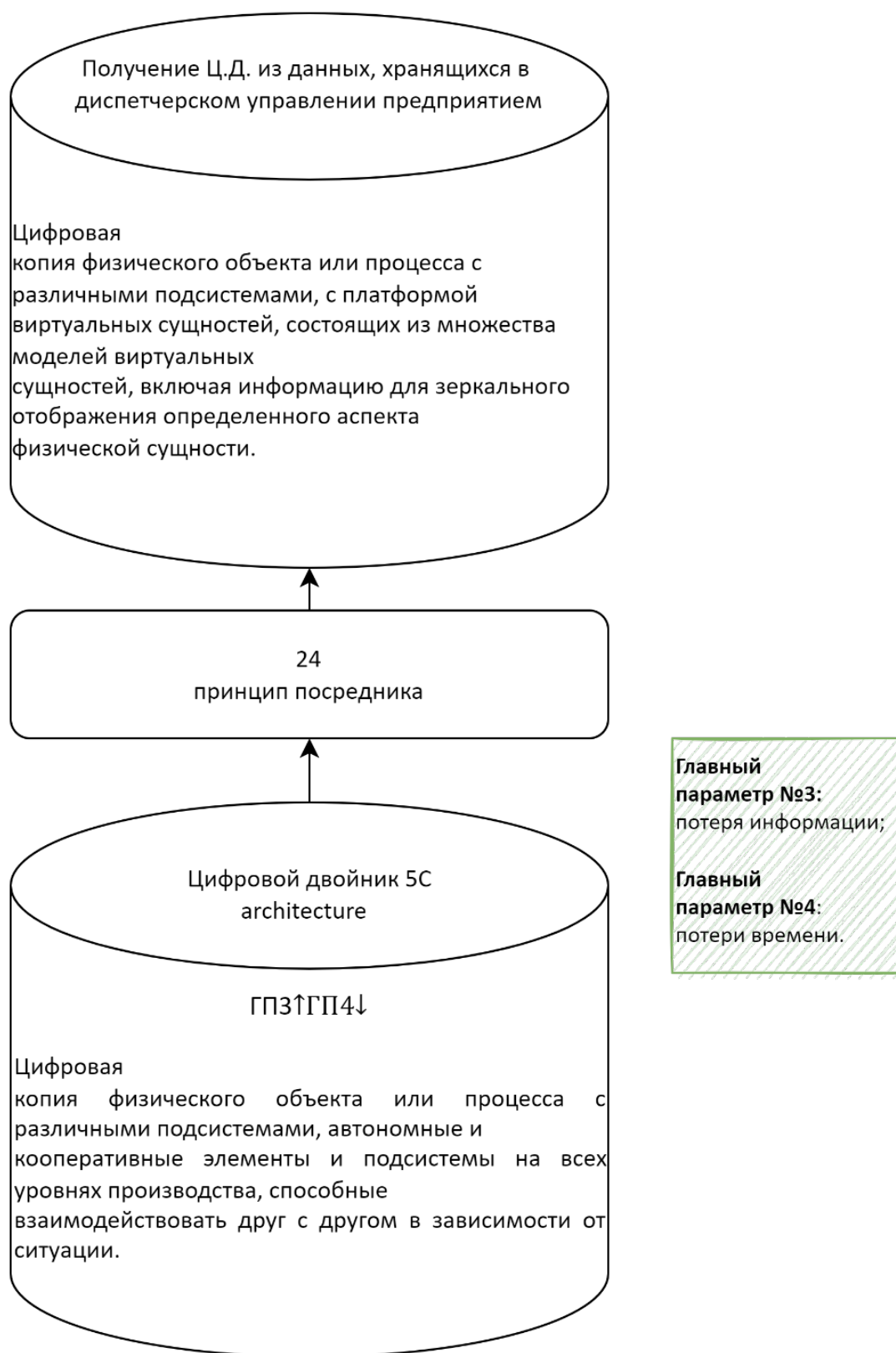


Рис. 8. ТРИЗ-эволюция модели в модель получения цифровых двойников системы из данных

Fig. 8. TRIZ evolution into a model of receiving system's digital twins from data

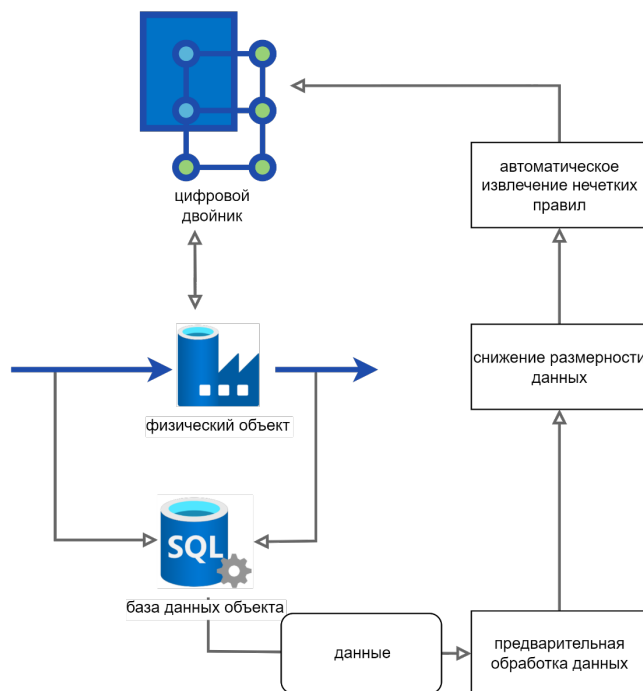


Рис. 9. Модели получения цифровых двойников системы из данных
Fig. 9. Models of receiving digital twin of a system from data

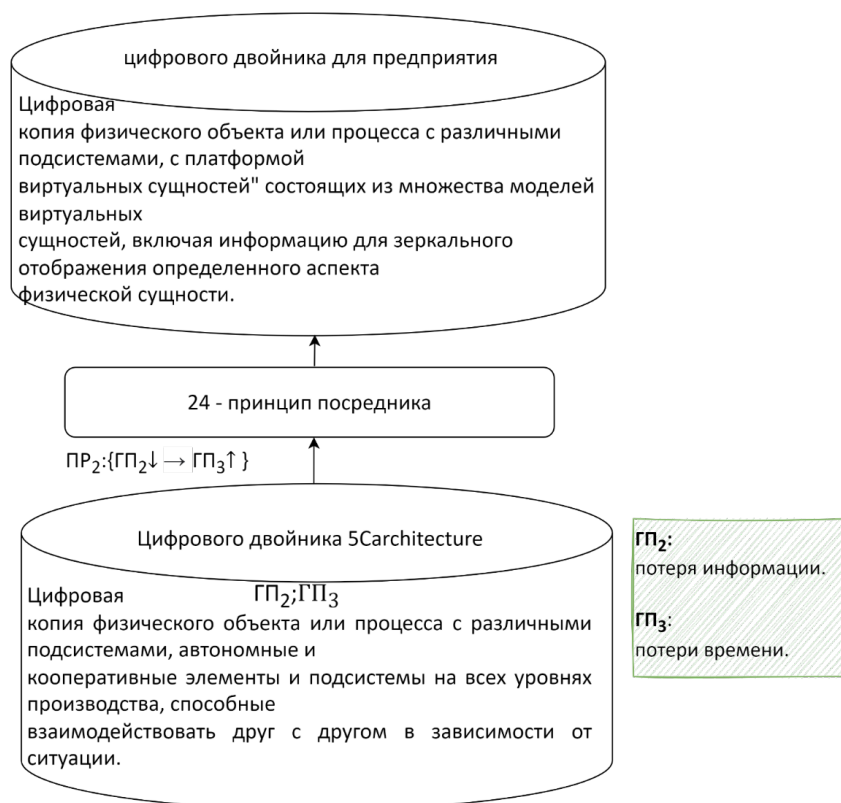


Рис. 10. ТРИЗ-эволюция из 5C architecture в модель цифрового двойника предприятия холодильной системы
Fig. 10. TRIZ evolution from 5C architecture to a digital twin model of the refrigeration system enterprise

На рис. 10 представлена схема ТРИЗ-эволюции из 5C architecture в модель цифрового двойника предприятия холодильной системы. Данная модель представляет собой альтернативное представление этапа ТРИЗ-эволюции.

На рис.11 представлена схема ТРИЗ-эволюции модели из 5C architecture в модель цифрового двойника предприятия холодильной системы. В рамках предлагаемой методологии цифровой двойник предприятия может быть создан для охвата всех процессов организации, включая закупку товаров для производства, логистику и услуги. Он включает в себя все данные о технологических процессах, эффективности методов управления качеством и планировании последующих операций на производстве. Авторы считают, что технология цифрового двойника предоставляет огромное количество возможностей для моделирования самых разных ситуаций, которые могут возникнуть на производстве, вплоть до критических, не подвергая риску само производство [28].

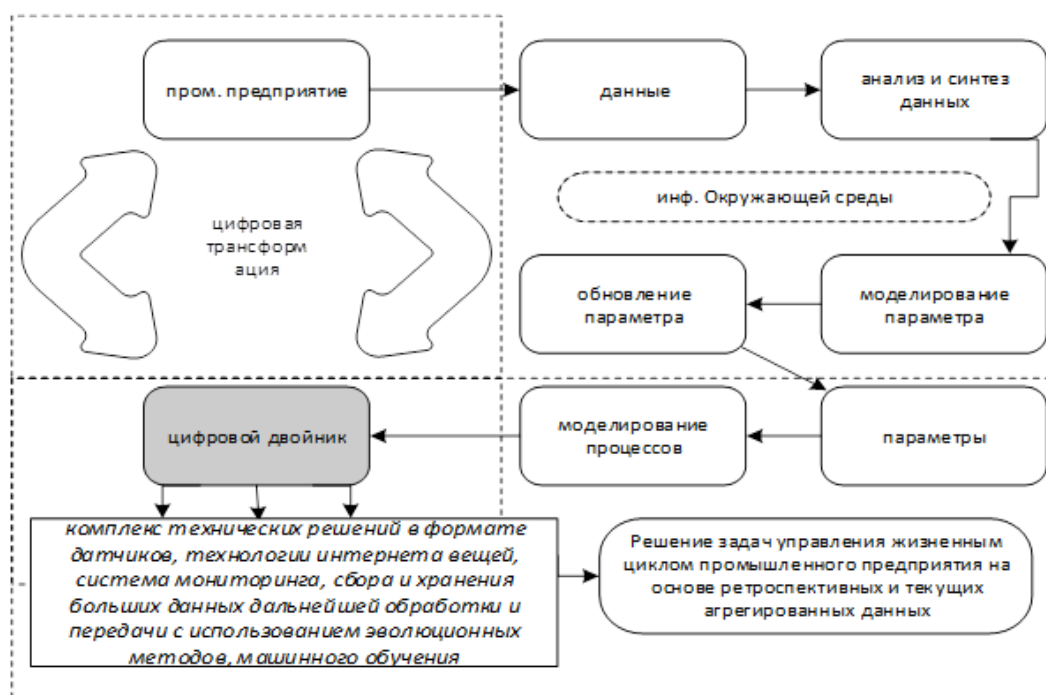


Рис. 11. Модель цифрового двойника предприятия

Fig. 11. Enterprise digital twin model

На данном этапе концепции описывают возможность интеграции различных функциональных компонентов в модель цифрового двойника [16; 24]. Для описания математической модели есть примеры, где используется теория нечетких множеств и алгоритм автоматического извлечения правил [24]. В соответствии с концепцией цифрового двойника (ЦД) может быть разработана модель, которая интегрирует несколько функциональных компонентов в один цифровой образ. В частности, ЦД предприятия может охватывать все процессы, которые происходят в организации, от закупки товаров для производства до логистики и услуг [28]. Данные архитектуры цифрового двойника могут быть расширены и применены для гибридных энергетических систем, которые предназначены для изолированных от сетевых энергосистем поселений Крайнего Севера. Это подтверждает гибкость концепции ЦД и ее возможность адаптации к различным системам, в том числе и к такой крупной системе, как система предприятия [28].

Требования общества: обеспечить архитектуру ЦД оболочкой для визуализации.

3. Третий этап ТРИЗ

Идеальный конечный результат: цифровая копия физического объекта или процесса, которая инкорпорирует различные подсистемы, включающие платформу виртуальных сущностей, которые могут взаимодействовать друг с другом, а также включающие визуализацию модели.

Техническое противоречие №3: увеличивая удобство эксплуатации, недопустимо ухудшается адаптация, универсальность.

Главный параметр №4: удобство эксплуатации.

Главный параметр №5: адаптация, универсальность.

Приемы разрешения: 24. ПРИНЦИП ПОСРЕДНИКА;

26. ПРИНЦИП КОПИРОВАНИЯ.

Принцип дробления был применен на 3 этапе эволюции: между виртуальным и физическим объектом были интегрированы промежуточные объекты, которые выполняют дополнительные функции, чтобы увеличить удобство эксплуатации. На рис. 12 представлена схема ТРИЗ-эволюции модели 2 этапа в модель COGNITWIN. Эта модель представляет собой альтернативное представление этапа ТРИЗ-эволюции.

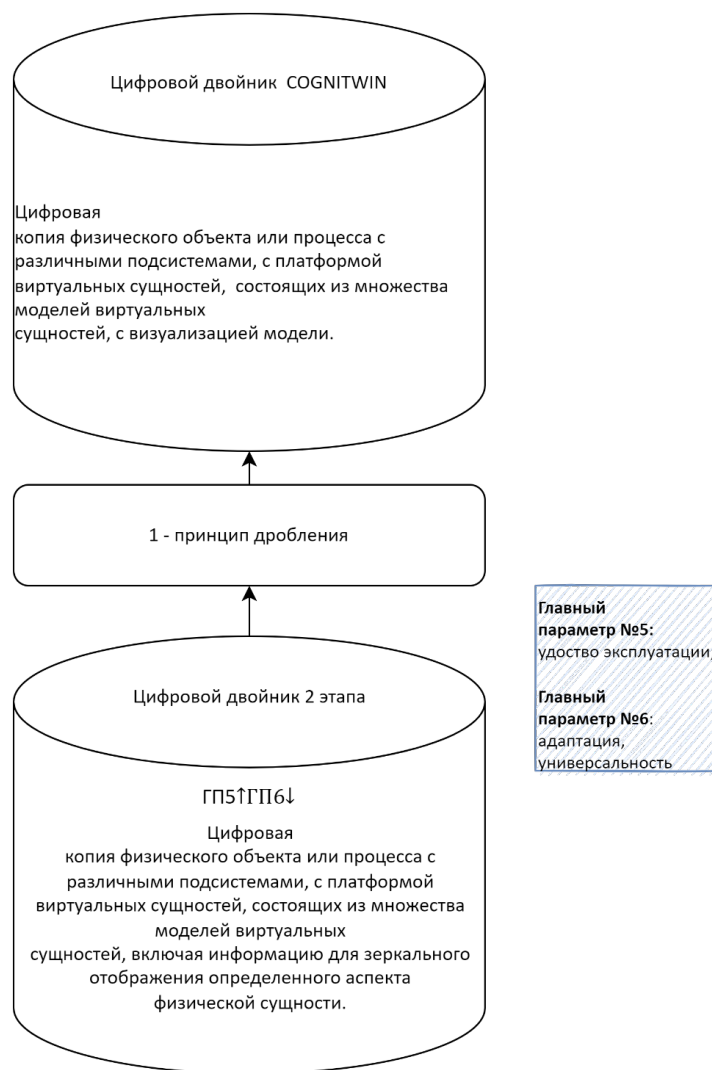


Рис. 12. ТРИЗ-эволюция модели 2-го этапа в модель COGNITWIN

Fig. 12. TRIZ evolution of the 2nd stage model into the COGNITWIN model



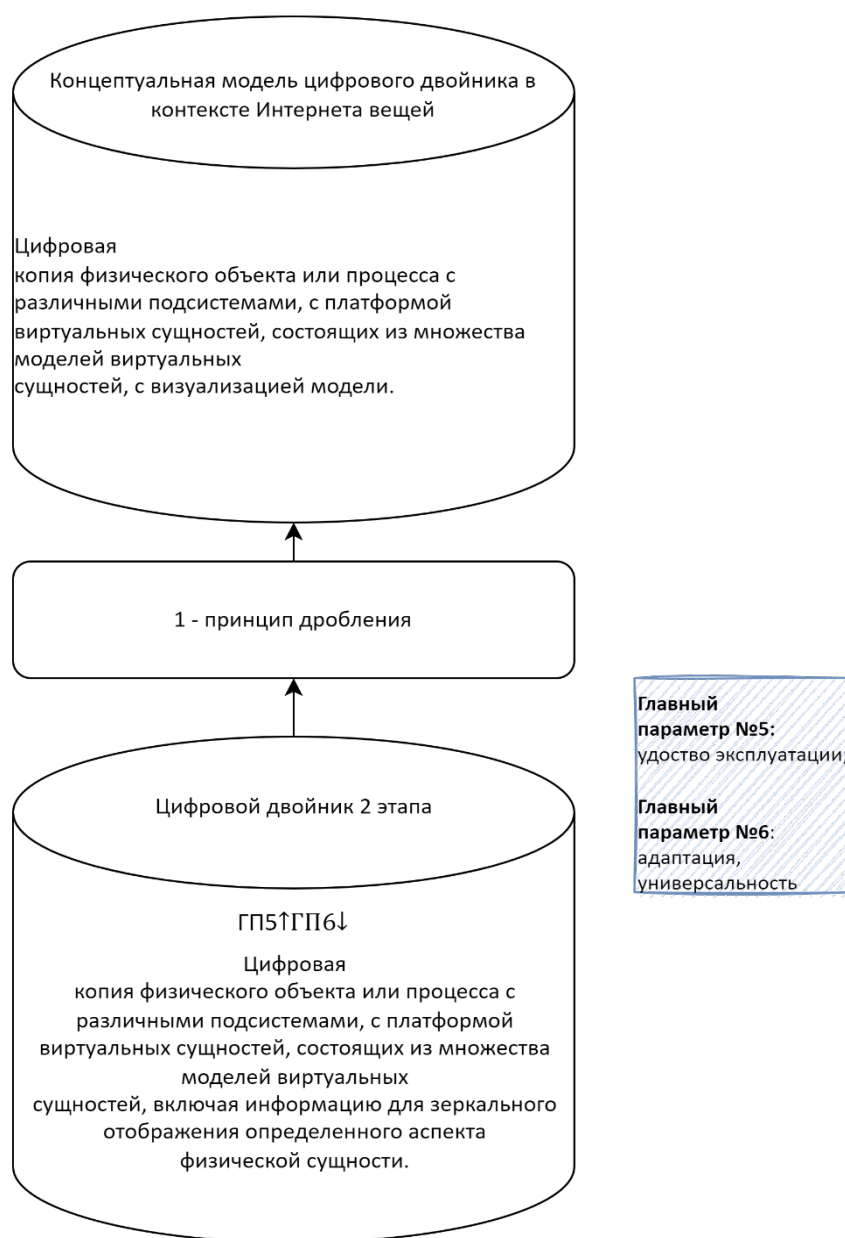


Рис. 14. ТРИЗ-эволюция модели 2-го этапа в модель «Концептуальная модель цифрового двойника в контексте интернета вещей»

Fig. 14. TRIZ evolution of the 2nd stage model into the model “Digital Twin Model in the Context of the Internet of Things”

Еще одна модель Cognitive Twin Toolbox (COGNITWIN) с особым акцентом на **обрабатывающую промышленность** (рис. 13) [46]. Имеет три уровня двойников:

- 1) цифровой двойник;
- 2) гибридный двойник;
- 3) когнитивный двойник.

Когнитивный двойник предлагает **пять уровней**:

- 1) управления моделями;
- 2) сбора и подготовки данных;

- 3) управления сервисами;
- 4) управления двойниками;
- 5) взаимодействия с пользователем.

На рис. 14 представлена диаграмма ТРИЗ-эволюции модели 2 этапа в концептуальную модель цифрового двойника в контексте интернета вещей. Эта модель представляет собой альтернативное представление данного этапа ТРИЗ-эволюции.

В качестве альтернативного видения данного этапа ТРИЗ-эволюции предлагается использование «концептуальной модели цифрового двойника». Данная модель описывает структуру на пяти уровнях, которые состоят из различных компонентов, обеспечивающих эффективное функционирование системы:

- 1) физическое пространство;
- 2) коммуникационная сеть;
- 3) виртуальное пространство;
- 4) аналитика и визуализация данных;
- 5) приложение.

В концепции описывается система соединения различных предметов и устройств в Интернете, позволяющая им обмениваться данными и управляться удаленно. Может включать в себя различные виды устройств – от смартфонов и компьютеров до датчиков и других маленьких устройств, которые могут быть встроены в окружающую среду. Задачи различных слоев очень похожи на уже упомянутые слои в других фреймворках. Описаны два концептуальных варианта использования в области автомобилестроения и умного здравоохранения, но не представлена реальная реализация предложенной модели (рис. 15).

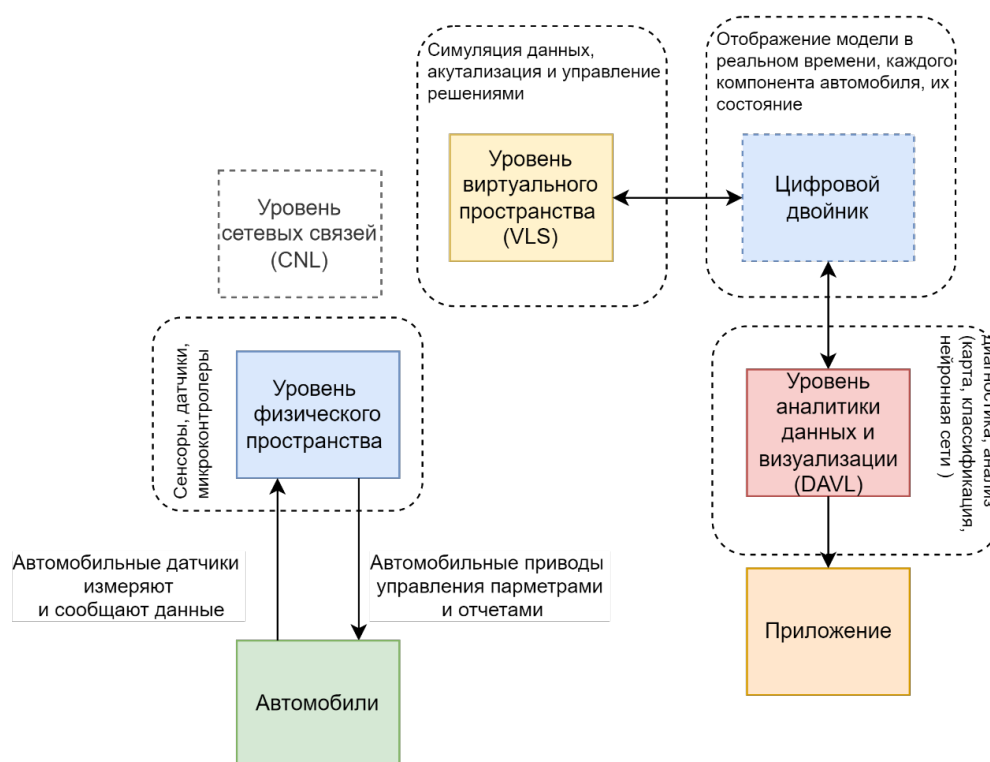


Рис. 15. Схема концептуальной модели ЦД
Fig. 15. Scheme of the conceptual model of CD

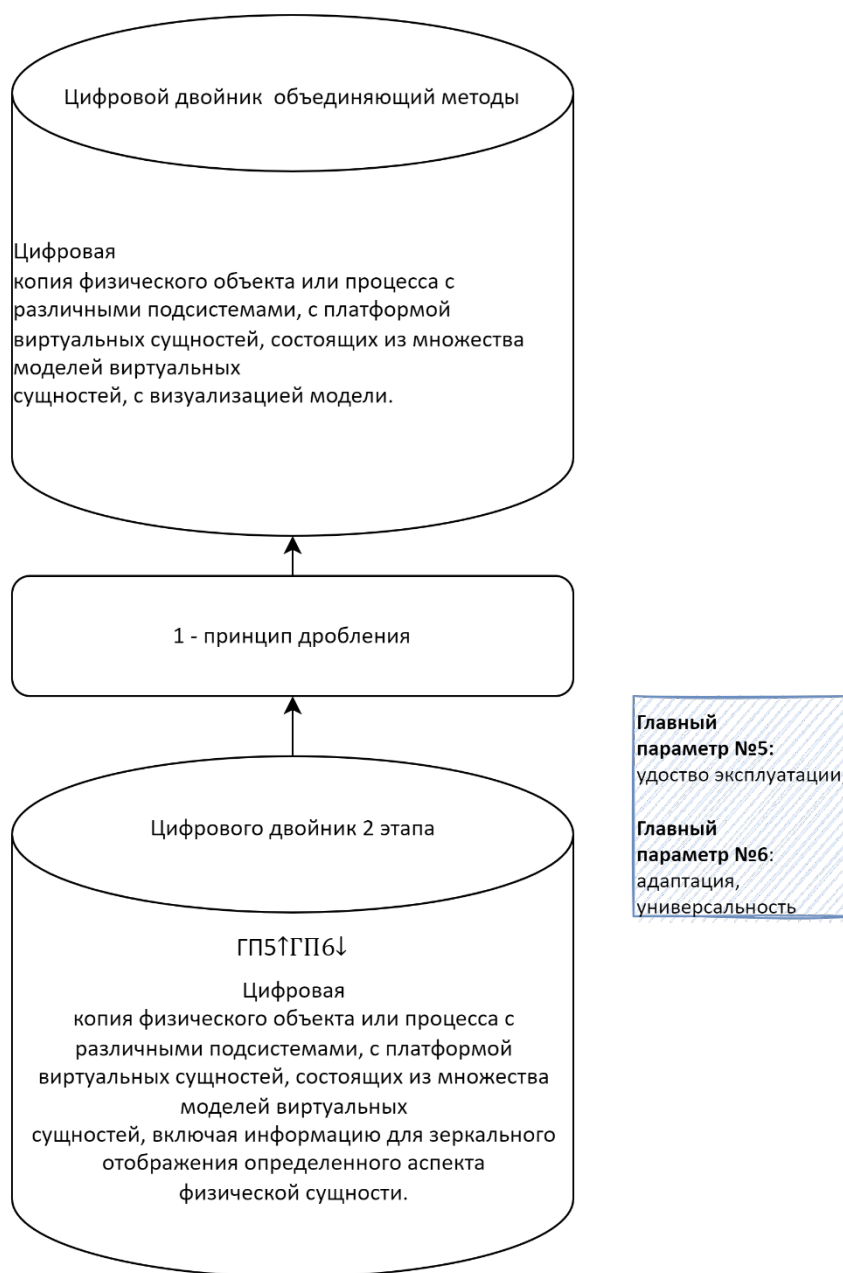


Рис. 16. ТРИЗ-эволюция модели 2 этапа в модель ЦД, объединяющего методы
 Fig. 16. TRIZ evolution of the 2nd stage model into the model of CD that combines methods

На рис. 16 представлена схема ТРИЗ-эволюции, отображающая процесс перехода от модели 2 этапа к концептуальной модели цифрового двойника в контексте интернета вещей. Эта модель представляет собой альтернативное представление данного этапа ТРИЗ-эволюции. Предложенная концепция создания цифровых двойников основана на использовании комплексного метода, который объединяет технологии имитационного моделирования, модули оптимизации (например, генетические алгоритмы), базу данных и подсистему анализа многомерных данных (например, онлайн-аналитическую обработку). Особенностью предложенного метода является обеспечение непрерывной интеграции рассматриваемых подсистем с поддержкой функциони-

рования всех программных модулей в режиме реального времени (рис. 17) [39]. Предлагаются следующие взаимодействующие подсистемы:

- 1) подсистема имитационного моделирования, предназначенная для расчета значений множественных характеристик предприятия при заданных сценарных условиях;
- 2) модуль оптимизации (генетический алгоритм), который агрегирует через целевые функции с имитационной моделью производственной компании и обеспечивает возможность поиска наилучших (рациональных, субоптимальных) решений при существующих ограничениях;
- 3) база данных, играющая ключевую роль в сборе и обработке актуальных данных по предприятию, а также исходных данных для имитационных моделей. Она также служит для хранения результатов имитационного моделирования;
- 4) подсистема визуализации и управления имитационными моделями, доступ к различным функциям имитационных моделей, например, вызов оптимизационных экспериментов, сохранение результатов расчетов;
- 5) подсистема оперативной аналитической обработки (OLAP), позволяющая анализировать результаты моделирования и оптимизации с детализацией соответствующих агрегированных данных;
- 6) подсистема интеллектуального анализа данных, обеспечивающая анализ взаимосвязей между ключевыми характеристиками информационной модели производства, а также обновление значений всех влияющих факторов и коэффициентов значимости. Результаты анализа сохраняются в базе данных системы.

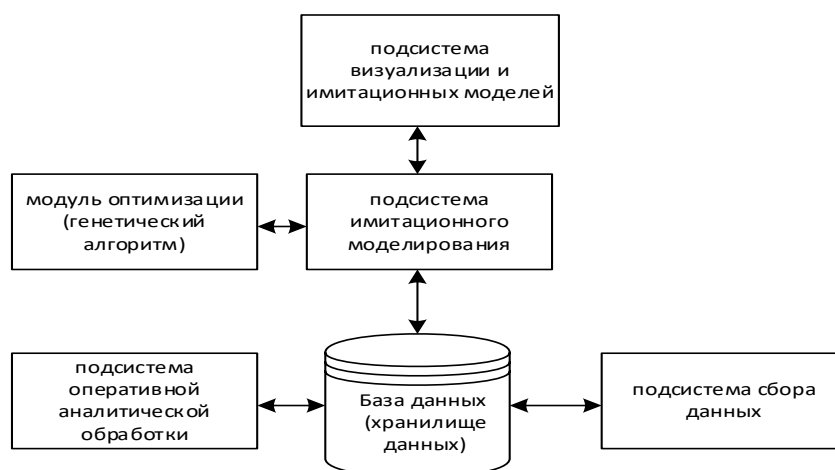


Рис. 17. Схема модели ЦД на использовании комплексного метода

Fig. 17. Scheme of the CD model based on the complex method

В данном исследовании предлагается архитектура устойчивого интеллектуального производства, управляемого цифровыми двойниками, которая представлена на рис. 18 [47]. Эта структура состоит из:

- 1) базовой платформы;
- 2) производственного оборудования;
- 3) производственной системы;
- 4) производственного сервиса.

Данные базовой платформы поступают из уровня оборудования платформы, который включает в себя оборудование, агрегат, производственную линию и производственный цех. После того как платформа получает данные с уровня устройств, она объединяет облачные вычисления, искусственный интеллект, интернет вещей и другие технологии. Затем всесторон-

не рассматривает экологические, экономические и социальные факторы и объединяет людей, оборудование и технологии для предоставления данных для виртуального и физического прототипирования. Устойчивое интеллектуальное производственное оборудование сопоставляет с виртуальными и физическими прототипами.

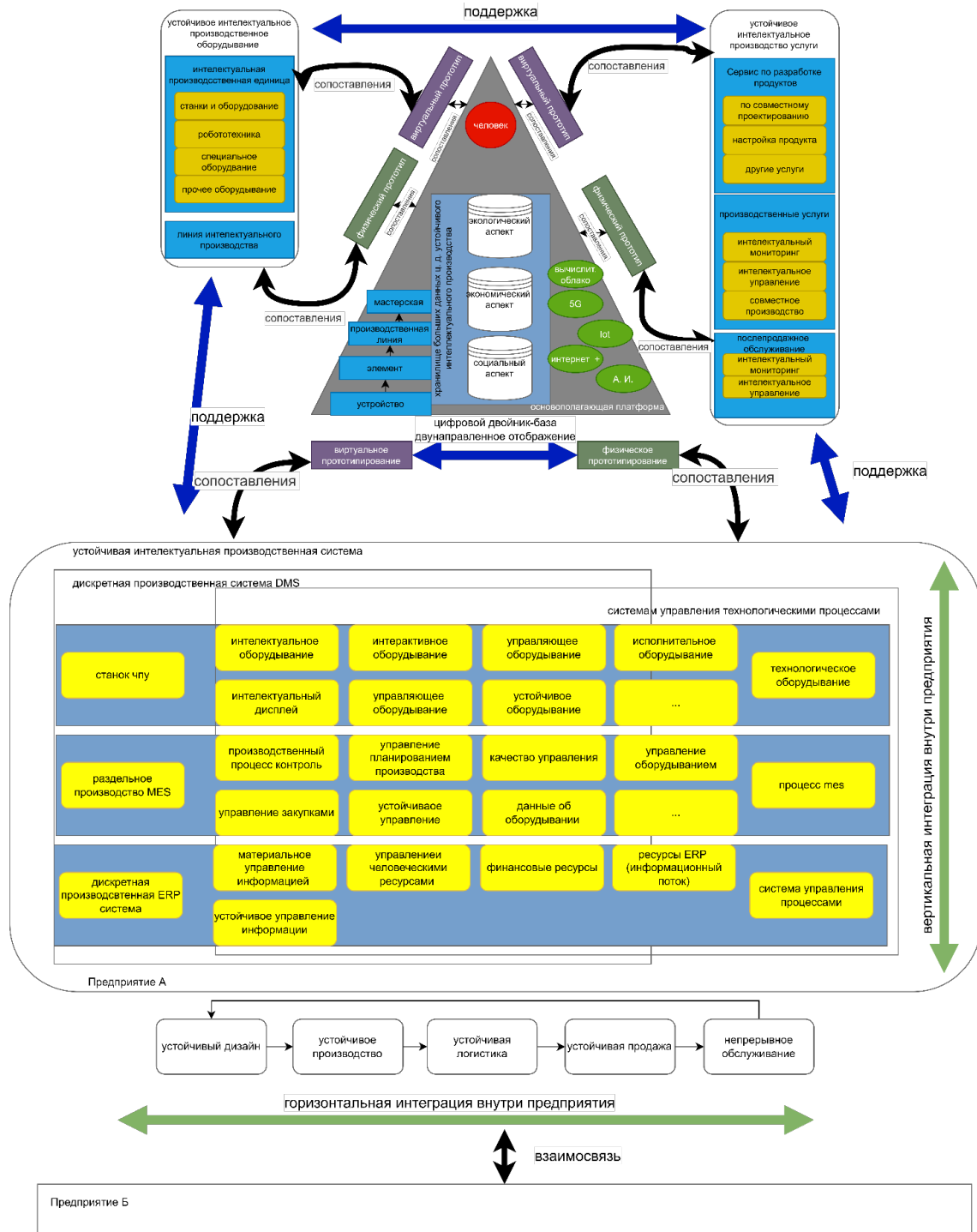


Рис. 18. Архитектура структуры устойчивого интеллектуального производства, управляемого цифровыми двойниками

Fig. 18. Architecture of the structure of sustainable intelligent production managed by digital twins

Выбрав фактор «архитектура цифрового двойника», как наиболее значимый, была составлена ТРИЗ-эволюция цифровых двойников (рис. 19).

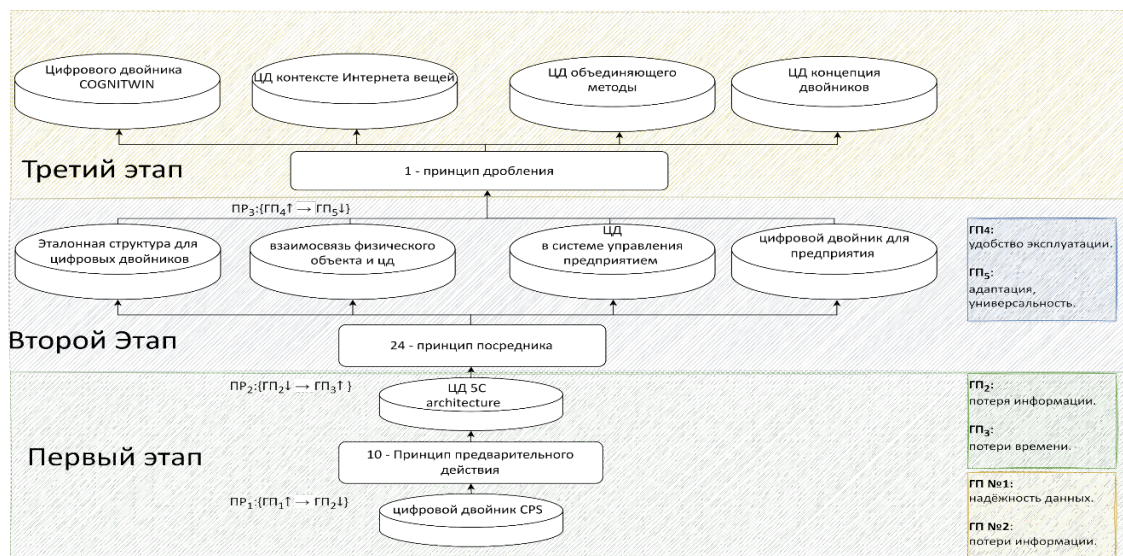


Рис. 19. ТРИЗ-эволюция цифровых двойников
Fig. 19. TRIZ evolution of digital twins

Она позволяет идентифицировать ключевые технологические проблемы и найти наиболее эффективные решения для их решения. Использование ТРИЗ-эволюционной карты может помочь в разработке новых и более инновационных продуктов и технологий.

Заключение

В рамках этой статьи были систематизированы знания о существующих механизмах реализации цифровых двойников и их архитектуры. При помощи ТРИЗ-эволюционного подхода проанализировано развитие цифровых двойников. Определены главные **противоречия**:

- 1) при увеличении надежности данных недопустимо увеличиваются потери информации;
- 2) при уменьшении потери информации недопустимо увеличиваются потери времени;
- 3) при увеличении удобства эксплуатации недопустимо ухудшаются адаптация, универсальность.

Также были выявлены приемы, которые стали «движущими силами» каждой новой модели, предложены приемы разрешения этих противоречий на основе **ТРИЗ-инструментов**:

- 1) предварительного действия;
- 2) принципа посредника;
- 3) принципа дробления.

Была создана ТРИЗ-эволюционная карта (рис. 19), отражающая развитие моделей цифровых двойников в различных альтернативных решениях. Для создания цифровых двойников для гибридных энергетических систем, предназначенных для поселений Крайнего Севера, был выбран вариант архитектуры концепции создания цифровых двойников комплексного подхода [39]. Он был выбран потому, что включает все необходимые модули, а также, что особенно важно, обеспечивает непрерывную интеграцию рассматриваемых подсистем с поддержкой функционирования всех программных модулей в режиме реального времени. Архитектура была выбрана из-за наличия всех необходимых модулей и обеспечения непрерывной интегра-

ции рассматриваемых подсистем, а также поддержки функционирования всех программных модулей в режиме реального времени.

Список литературы

1. Об утверждении Программы комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры городского округа «Город Хабаровск» на период до 2035 года // Администрация города Хабаровска URL: <https://clck.ru/32D7W8> (дата обращения: 01.10.2022).
2. **Васильев Г. В., Бердонос В. Д.** Эффективная методика поиска источников в наукометрических базах данных // Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности: Материалы I Международной научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 20–25 марта 2021 года. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. С. 194–198. DOI 10.17084/978-5-7765-1488-3-2021-194. – EDN MJZWZD.
3. **Животова А. А., Бердонос В. Д.** Перспективные направления развития систем машинного перевода // Информатика и системы управления. 2022. № 2(72). С. 116–128. DOI 10.22250/18142400_2022_72_2_116. – EDN TZDCVP.
4. **Altshuller G.** The innovation algorithm: TRIZ, systematic innovation, and technical creativity. Worcester, Massachusetts: Technical Innovation Center, 1999.
5. **Gadd K.** TRIZ for Engineers: Enabling Inventive Problem Solving. John Wiley & Sons, 2011.
6. Creativity, learning techniques and TRIZ / T. Bertoncelli, O. Mayer, M. Lynass // Procedia CIRP. 2016. Vol. 39. P. 191–196.
7. ГОСТ Р 57700.37 – 2021 Компьютерные модели и моделирование Цифровые двойники изделий. Утв. и введен в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 16 сентября 2021 г. №9 979-ст. Москва: Стандартинформ, 2021. V, 11 с.
8. Отчет | Предложения Счетной палаты // Счетная палата Российской Федерации URL: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/b99/b998773313b87e724ed09f287754d180.pdf> (дата обращения: 01.06.2022).
9. Цифровой двойник // Моделирование и цифровые двойники URL: <https://www.cadfem-cis.ru/service/digital-twin/#:~:text=Цифровой%20двойник%20%28Digital%20Twin%29%20-,%20воздействий%20помех%20и%20окружающей%20среды> URL: (дата обращения: 13.06.2022).
10. **Безруких П.** Возобновляемая энергетика: сегодня – реальность, завтра – необходимость. М.: Лесная страна, 2007. 120 с.
11. **Риполь-Сарагоси Т. Л., Кууск А. Б.** Возобновляемые и нетрадиционные источники энергии: учебное пособие. Ростов н/Д: Рост. гос. ун-т. путей сообщения, 2019. 122 с.
12. **Рудаков А. И., Хузятова Р. Р.** Гибридные источники энергии для электроснабжения энергетических систем // Мировая наука. 2019. № 6(27). С. 394–396.
13. **Лукутин Б. В., Суржикова О. А., Шандарова Е. Б.** Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография. М.: Энергоатомиздат, 2008. 231 с.
14. **Куприяновский В. П., Климов А. А., Воропаев Ю. Н. и др.** Цифровые двойники на базе развития технологий BIM, связанные онтологиями, 5G, IoT и смешанной реальностью для использования в инфраструктурных проектах и IFRABIM // International Journal of Open Information Technologies. 2020. Т. 8. № 3. С. 55–74.
15. **Steindl G., Stagl M., Kasper L., Kastner W., Hofmann R.** 2020. Ge-neric Digital Twin Architecture for Industrial Energy Systems. DOI 10.3390/app10248903
16. **Snijders R., Pileggi P., Broekhuijsen J., Verriet J., Wiering M., Kok K.** 2020. Machine Learning for Digital Twins to Predict Responsiveness of Cyber-Physical Energy Systems.

17. **Sultanov M. M., Arakelyan E. K., Boldyrev I. A., Lunenko V. S., Menshikov P. D.** Digital twins application in control systems for distributed generation of heat and electric energy. 2021. Pp. 89–101 DOI 10.24425/ather.2021.137555
18. **Darbali–Zamora R., Johnson J., Summers A., Jones C. B., Hansen C., Showalter C.** State Estimation–Based Distributed Energy Resource Optimization for Distribution Voltage Regulation in Telemetry–Sparse Environments Using a Real–Time Digital Twin. 2021. DOI 10.3390/en14030774
19. **Ahn E. Y., Lee J., Bae J., Kim J. M.** Analysis of Emerging Geotechnologies and Markets Focusing on Digital Twin and Environmental Monitoring in Response to Digital and Green New Deal. Vol. 20. P. 609–617 DOI 10.9719/EEG.2020.53.5.609
20. **Lydon G. P., Caranovic S., Hischier I., Schlueter A.** Coupled simulation of thermally active building systems to support a digital twin. 2019. DOI 10.1016/j.enbuild.2019.07.015
21. **Arafet K., Berlanga R.** Digital Twins in Solar Farms: An Approach through Time Series and Deep Learning. 2021. DOI 10.3390/a14050156
22. **Bai L. C., Zhang Y.T., Wei H. Q., Dong J. B., Tian W.** Digital Twin Modeling of a Solar Car Based on the Hybrid Model Method with Data–Driven and Mechanistic .2021. DOI 10.3390/app11146399
23. **Junior C. A A. D., Villanueva J. M. M., Almeida R. J. S. D., de Medeiros I. E. A.** Digital Twins of the Water Cooling System in a Power Plant Based on Fuzzy Logic. 2021. DOI 10.3390/s21206737
24. **Mawson V. J., Hughes B.** The development of modelling tools to improve energy efficiency in manufacturing processes and systems. 2019. P. 95–105. DOI 10.1016/j.jmsy.2019.04.008
25. **Jakobi M., Kunath L., Witzig A.** BIM Use–Case: Model–Based Performance Optimization. 2018. P. 1395–1402. DOI 10.18086/eurosun2018.11.07
26. **Parrott A.** Industry 4.0 and the digital twin manufacturing meets its match A. Parrott, L. Warshaw. [Электронный ресурс]. URL: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry–4–0/digital–twin–technologysmart–factory.html>.
27. **Массель Л. В., Ворожцова Т. Н.** Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики // Онтология проектирования. 2020. Т. 10, № 3(37). С. 327–337. DOI 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337
28. **Golovina T., Polyanin A., Adamenko A., Khegay E., Schepinin V.** Digital Twins as a New Paradigm of an Industrial Enterprise. 2020. P. 1115–1124. DOI 10.14716/ijtech.v11i6.4427
29. **Garcia H. E., Aumeier S. E., Al–Rashdan A. Y., Rolston B. L.** Secure embedded intelligence in nuclear systems: Framework and methods. 2020. DOI 10.1016/j.anucene.2019.107261
30. **Jain P., Poon J., Singh J. P., Spanos C., Sanders S. R., Panda S. K.** A Digital Twin Approach for Fault Diagnosis in Distributed Photovoltaic Systems. 2020. P. 940–956. DOI 10.1109/TPEL.2019.2911594
31. **Tutelea L. N., Deaconu S. I., Popa G. N.** Reduced Cost Low Speed Wind or Hydro Energy Conversion System with Twin Stator Windings Induction Generator. 2014. P. 317–324.
32. **Wang M. M., Wang C. Y., Hnydiuk–Stefan A., Feng S. Z., Atilla I., Li Z.** Recent progress on reliability analysis of offshore wind turbine support structures considering digital twin solutions. 2021. DOI 10.1016/j.oceaneng.2021.109168
33. **Gong H. J., Rooney T., Akeyo O. M., Branecky B., Ionel D. M.** Equivalent Electric and Heat–Pump Water Heater Models for Aggregated Community–Level Demand Response Virtual Power Plant Controls. 2021. P. 141233–141244. DOI 10.1109/ACCESS.2021.3119581
34. **Ganesh S., Perilla A., Torres J. R., Palensky P., van der Meijden M.** Validation of EMT Digital Twin Models for Dynamic Voltage Performance Assessment of 66 kV Offshore Transmission Network. 2021. DOI 10.3390/app11010244
35. **Etxegarai A., Valverde V., Eguia P., Perea E.** Analysis of Loss of Life of Dry–Type WTSU Transformers in Offshore Wind Farms. 2020. P.448–455.

36. **Alsmadi Y. M., Xu L. Y., Wang A. M.** Development of a Computer Twins–Based Wind Farm Testbed. 2015. P. 1005–1012.
37. **Trancossi M., Cannistraro G., Pascoa J.** Thermoelectric and solar heat pump use toward self sufficient buildings: The case of a container house. 2020. DOI 10.1016/j.tsep.2020.100509
38. **Boikov A. V., Savelev R. V., Payor V. A., Erokhina O. O.** THE CONTROL METHOD CONCEPT OF THE BULK MATERIAL BEHAVIOR IN THE PELLETIZING DRUM FOR IMPROVING THE RESULTS OF DEM–MODELING. 2019. Art. 41548. DOI 10.17580/cisistr.2019.01.02
39. **Gandzha S., Aminov D., Sogrin A.** Development of Water Submersible Gyro Generator of Combined Excitation for Energy Development of Small and Medium Rivers. 2020.
40. **Behling N., Williams M. C., Managi S.** Fuel cells and the hydrogen revolution: Analysis of a strategic plan in Japan. 2015. P. 204–221. DOI 10.1016/j.eap.2015.10.002
41. **Oti A. H., Farrell P., Abanda F. H., McMahon P., Mahamadu A. M., Mzyece D., Akintola A. A., Prinja N.** A BIM–driven framework for integrating rules and regulations in the decommissioning of nuclear power plants. DOI 10.1108/CI-11-2020-0186
42. **Manzoor M. T., Lenci G., Tetreault–Friend M.** Convection in volumetrically absorbing solar thermal receivers: A theoretical study. 2021. P. 1358–1368. DOI 10.1016/j.solener.2021.06.048
43. **Glaessgen E. H.** The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. 2012.
44. **Радионо́в А. А., Кара́ндаев А. С., Логи́нов Б. М., Гаси́ярова О.** Концептуальные направления создания цифровых двойников электротехнических систем агрегатов прокатного производства.
45. **Kořinek M., Tázlar O., Štekerová K.** Digital Twin Models: BIM Meets NetLogo. 2021.
46. **Abburu S., Berre A. J., Jacoby M., Roman D., Stojanovic L., Stojanovic N.** COGNITWIN – Hybrid and Cognitive Digital Twins for the Process Industry. 2020. Pp. 1–8. DOI 10.1109/ICE/ITMC49519.2020.9198403
47. **He B., Bai K.–J.** Digital twin–based sustainable intelligent manufacturing: a review. 2021. DOI 10.1007/s40436-020-00302-5
48. **Ghosh A. K., Ullah S., Teti R., Kubo A.** Developing sensor signal–based digital twins for intelligent machine tools.
49. **Васильев Г. В., Бердоносков В. Д.** Разработка и сравнение моделей прогнозирования потребления электроэнергии с помощью рекуррентных нейросетей с долгой краткосрочной памятью // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 года. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. С. 203–206. EDN FDYOTE.
50. **Васильев Г. В., Бердоносков В. Д.** Анализ моделей потоков энергий гибридных энергетических систем // Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности: Материалы I Международной научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 20–25 марта 2021 года. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. С. 191–194. DOI 10.17084/978-5-7765-1488-3-2021-191

Информация об авторе

Георгий Андреевич Тимофеев, ассистент, кафедра «Проектирование, управление и разработка информационных систем», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Information about the Author

Georgy A. Timofeev, assistant, Department “Projecting, Management and Development of Information Systems”, Komsomolsk-on-Amur State University

*Статья поступила в редакцию 17.12.2022;
одобрена после рецензирования 05.03.2023; принята к публикации 05.03.2023
The article was submitted 17.12.2022;
approved after reviewing 05.03.2023; accepted for publication 05.03.2023*