



Методика формирования цифрового паспорта сложного промышленного объекта

В.Л. Баденко, ORCID: 0000-0002-3054-1786 <badenko_vl@spbstu.ru>
В.К. Ядыкин, ORCID: 0000-0003-3603-4635 <v.yadikin@ont.spbstu.ru>
В.В. Камский, ORCID: 0009-0002-9471-1454 <vl.kamsky@gmail.com>
А.О. Мохирева, ORCID: 0000-0002-5527-0345 <mohirevaarina@mail.ru>

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.*

Аннотация. В статье представлена методика формирования цифрового паспорта сложного промышленного объекта. Цель работы заключается в интеграции разрозненных данных об объекте (проектных, эксплуатационных, технических) в единую информационную систему – «цифровой паспорт», обеспечивающую актуализацию информации на всех этапах жизненного цикла. Для достижения этой цели проведён обзор современного состояния исследований и практики в области цифровых двойников и информационного моделирования, определены требования к структуре и содержанию цифрового паспорта. Разработана поэтапная методика, включающая сбор и оцифровку исходных данных, построение информационной 3D-модели объекта, интеграцию модели с базой данных технической документации и параметров, а также указана необходимость развертывание цифровой платформы для эксплуатации и обновления паспорта. Ключевыми составляющими методики являются этапы: разметка исходных данных, декомпозиция требований, составления матриц взаимного влияния элементов системы друг на друга, формализация моделей и формирование справочника моделей, формирование системной архитектуры объекта, онтологические модели системы и предметной области.

Ключевые слова: цифровой паспорт; промышленный объект; сложная техническая система; BIM; TIM; MBSE; управление эксплуатацией.

Для цитирования: Баденко В.Л., Ядыкин В.К., Камский В.В., Мохирева А.О. Методика формирования цифрового паспорта сложного промышленного объекта. Труды ИСП РАН, том 38, вып. 4, часть 1, 2026 г., стр. 271–288. DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(4)-15.

The method of forming a digital passport of a complex industrial facility

V.L. Badenko, ORCID: 0000-0002-3054-1786 <badenko_vl@spbstu.ru>
V.K. Yadykin, ORCID: 0000-0003-3603-4635 <v.yadikin@ont.spbstu.ru>
V.V. Kamsky, ORCID: 0009-0002-9471-1454 <vl.kamsky@gmail.com>
A.O. Mohireva, ORCID: 0000-0002-5527-0345 <mohirevaarina@mail.ru>

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
29 Politechnicheskaya str., St. Petersburg, 195251, Russia.*

Abstract. The article presents a method of forming a digital passport of a complex industrial facility. The purpose of the work is to integrate disparate data about the facility (design, operational, technical) into a single information system – the "digital passport", which ensures the updating of information at all stages of the life cycle. To achieve this goal, a review of the current state of research and practice in the field of digital twins and information modeling has been conducted, and requirements for the structure and content of a digital passport have been determined. A step-by-step methodology has been developed, including the collection and digitization of source data, the construction of an informational 3D model of the object, the integration of the model with a database of technical documentation and parameters, and the need to deploy a digital platform for the operation and updating of the passport. The key components of the methodology are the following stages: markup of the source data, decomposition of requirements, compilation of matrices of mutual influence of system elements.

Keywords: digital passport; industrial facility; complex technical system; BIM; TIM; MBSE; operation management.

For citation: Badenko V.L., Yadykin V.K., Kamsky V.V., Mohireva A.O. The method of forming a digital passport of a complex industrial facility. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 38, issue 4, part 1, 2026. pp. 271-288 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(4)-15.

1. Введение

В эпоху цифровой трансформации промышленности возрастает потребность в эффективном управлении данными о сложных технических объектах на протяжении всего их жизненного цикла. К таким объектам относятся промышленные установки, энергетическое оборудование, инфраструктурные комплексы и другие объекты капитального строительства. Традиционно данные об объекте (проектах, технологиях, эксплуатационных параметрах, ремонтах и модернизациях) хранятся в разрозненных источниках – чертежах, паспортных формах, отчетах, базах данных различных отделов. Отсутствие единой комплексной информации затрудняет принятие решений по эксплуатации и развитию объекта, ведет к дополнительным затратам времени и ресурсов на поиск и проверку сведений. Поэтому можно говорить о необходимости в системах, способных предоставлять актуальную и структурированную информацию о таких объектах.

Одним из перспективных подходов к решению данной проблемы является концепция **цифрового двойника** объекта, которая в последние годы активно развивается в разных отраслях. Цифровой двойник (ЦД) представляет собой виртуальную модель физического объекта, содержащую все существенные сведения о нем. Согласно определению ГОСТ 57700.37–2021, цифровой двойник – это совокупность математических и компьютерных моделей, отражающих различные характеристики и свойства изделия, объединённых в единую систему [1]. Цифровой двойник позволяет всесторонне описать объект и управлять им на каждом этапе жизненного цикла – от разработки и производства до эксплуатации и утилизации. В стратегии развития строительной отрасли РФ до 2030 года понятие цифрового двойника объекта капитального строительства уточняется как «*синхронизированная цифровая копия объекта, представляющая виртуальную модель, воспроизводящую форму*

оригинального объекта и все характерные для него процессы, позволяющая однозначно фиксировать все изменения и прогнозировать жизненный цикл объекта» [2]. Иными словами, цифровой двойник призван аккумулировать всю информацию об объекте и обновляться по мере внесения изменений, обеспечивая актуальность данных.

В инженерной практике для описания интегрированной информационной модели объекта часто используется термин «**цифровой паспорт**». Цифровой паспорт промышленного объекта можно рассматривать как частный случай реализации цифрового двойника, акцентирующий внимание на структурированном хранении и управлении данными. В частности, цифровой паспорт определяется как упорядоченный электронный массив данных, содержащий полные и актуальные сведения об объекте и ходе работ на нем. Каждый элемент объекта в таком паспорте имеет уникальный идентификатор и вписан в иерархическую структуру, что позволяет оперативно находить необходимую информацию и работать с технической документацией [3]. Ожидается, что создание единого цифрового паспорта сложного объекта устранил разрозненность данных и повысит прозрачность процессов его эксплуатации.

Практическая значимость цифровых двойников (паспортов) подтверждается первыми проектами. Так, в строительной отрасли внедрение цифровых двойников объектов капитального строительства рассматривается как ключевой элемент цифровизации управления жизненным циклом [3].

Как правило, у предприятий есть потребность в повышении производительности труда. Повышение производительности выражается в минимизации работы человека для создания продукта предприятия, минимизации переделок и снижении объема потребляемых ресурсов. Для этого необходима автоматизация процессов, выполняемых человеком, для чего выполняется цифровизация объектов и процессов предприятия, однако сейчас это происходит разрозненно и зачастую в качестве программного обеспечения (ПО) для этих процессов выбирают более универсальные решения, которые представленных на рынке. То есть процесс цифровой трансформации рассматривается с точки зрения того, как представить объекты и процессы в удобном виде для существующей функциональности программных решений.

Опыт авторов данной статьи показывает, что задачи обработки данных или оцифровки данных ставятся несистемно. Часто, процесс цифровизации не приводит к ожидаемым результатам, т. е. повышения производительности не происходит. Данная проблема поднимает вопрос эффективности методов оцифровки.

Традиционные подходы к управлению промышленными объектами как системами, основанные на разрозненных данных и статичных документах, больше не удовлетворяют потребности промышленных предприятий в условиях возрастающей сложности и взаимосвязанности различных процессов и зачастую отсутствует понимание сути существующего состояния за пределами внешних проявлений (входов и выходов) [4].

Мы полагаем, что необходимо идти от обратного и сначала описать существующее состояние, как если бы его нужно было оцифровать с нуля, без существующих продуктов. То есть для перехода в состояние «как надо», необходимо понять в первую очередь «как есть». Однако после понимания текущего состояния для его цифровизации необходима соответствующая системная модель, поскольку цифровая система не может работать, если ее составляющие не имеют единства в терминологии и совместимости различных сущностей. Для реализации такой системной модели нужен единый источник информации об объекте согласно его системной архитектуре (СА). [5].

Кроме того, в жизненном цикле промышленного объекта цифровизация необходима как для повышения производительности в рамках существующих рабочих эксплуатационных процессов, так и с целью модернизации и перехода на новую компонентную базу [6]. А значит, информация, собранная в едином источнике, должна быть использована для

принятия решений как на текущей, так и на последующих стадиях жизненного цикла объекта. И для того, и для другого необходимо формализованное понимание сущностей (требований, процессов и компонентов) и их жизненного цикла. Отсутствие этого понимания приводит к фрагментации данных, отсутствию связи между различными компонентами и ограниченным возможностям интеграции с внешними системами [7].

Формализация этой задачи понимания взаимосвязей и состояния «как есть» является задачей системной инженерии и может быть реализована соответствующими методами. При этом, поскольку мы рассматриваем задачу с точки зрения цифровой трансформации, необходимо сразу говорить о модельно-ориентированной системной инженерии, и использовать соответствующие методы. Основа этих методов лежит в структурировании значимых данных об объекте, то есть в формировании системной архитектуры объекта. В модельно-ориентированной системной инженерии таким решением может стать информационная модель, построенная на основе исходных данных, системной архитектуры и согласованная с участниками процесса.

Для удобства восприятия и отделения от информационного моделирования зданий (BIM), такую модель будем называть цифровым паспортом промышленного объекта. В отличие от разрозненных документов, цифровой паспорт формализует взаимодействие всех компонентов объекта между собой и их связь с внешней средой. Наличие актуальной системно-структурированной информации об объекте позволит использовать цифровые решения с прогнозными моделями, учитывающими различные сценарии эксплуатации и модернизации.

Ранее авторами была сформирована методика создания системной архитектуры существующего объекта [8-9]. Целью данного исследования является формализовать последующий этап – формирование цифрового паспорта, как инструмента, используемого в работе с промышленным объектом.

2. Обзор литературы

Цифровой паспорт промышленного объекта, как инструмент информационной поддержки принятия решений по управлению жизненным циклом технического сложного объекта/системы, развивается на основе концепции системной архитектуры, которая включает в себя описание и организацию всех сущностей объекта, их взаимосвязей и процессов. В литературе цифровой паспорт рассматривается как эволюция от традиционных подходов к документации и управлению сложными системами к управлению на основе моделей [10]. Он представляет собой динамическую модель, основанную на актуализируемых данных, которая позволяет не только описывать объект, но и управлять его жизненным циклом.

Системная архитектура, лежащая в основе цифрового паспорта, является ключевым элементом его реализации. Она представляет собой согласованную всеми заинтересованными сторонами структурно-функциональное представление объекта, включающую описание всех системных сущностей (требований, функций, компонентов, процессов) и их связей. Это обеспечивает целостное представление объекта как сложной системы, взаимодействующей как внутри себя, так и с внешней средой. Важной частью реализации цифрового паспорта является согласование этих сущностей, что позволяет создать основу для работы с объектом на всех уровнях его эксплуатации и модернизации.

Принятое нами определение цифрового паспорта отличается от определения цифрового паспорта промышленной продукции [11]:

- «совокупность идентификационных параметров промышленной продукции определенного вида, содержащая сведения о производителе такой продукции, ее технических, эксплуатационных и функциональных характеристиках и свойствах, сведения о применяемых к такой продукции стандартах и коды, соответствующие

промышленной продукции согласно российским и международным системам классификации, каталогизации (при наличии), формируемая в электронной форме в государственной информационной системе промышленности в целях идентификации промышленной продукции и обеспечения получения достоверной информации о промышленных товарах);

и от определения цифрового паспорта ОКС в Москве [12]:

- «электронный документ, содержащий набор сведений, материалов об объекте капитального строительства или отдельном этапе строительства, реконструкции объекта капитального строительства».

В цифровом паспорте промышленного объекта хранятся данные, информация и знания об объекте в объеме, имеющимся у заинтересованных сторон и включают то, что необходимо для реализации задач жизненного цикла данного промышленного объекта и взаимодействия с ним всех заинтересованных сторон.

В определении был использовано выражение «системно структурированных данных», поскольку необходимо общее название сущности, соединяющей в себе и данные и информацию и знания. Из определений ГОСТ «Менеджмент знаний»: Данные – это объективные факты, которые не могут интерпретироваться вне контекста и дальнейших пояснений; Информация – это структурированные данные, обладающие актуальностью и целями, которые могут быть вписаны в контекст, классифицированы, оценены и откорректированы; Знания – это связанная информация, которая позволяет проводить сравнение, определять степень взаимодействия и принимать решения. Таким образом все 3 сущности можно свести к сущности данных, и мы будем иметь просто данные, структурированные данные и связанные структурированные данные. Под системно структурированными данными при этом мы понимаем совокупность этих трех сущностей, соотношенных с сущностями системы (промышленного объекта). Предполагается что на определенном периоде данные могут быть структурированы не полностью: например для периода когда паспортизация выполнена не для всего объекта и отдельные сущности (например оборудование) учтены в общей архитектуре, однако системный анализ данной сущности «во внутрь» не выполнялся и она рассматривается как черный ящик, а совокупность данных о ней хранится в цифровом паспорте «как есть». Единственным атрибутом этих данных является их соотношение с конкретной сущностью (агрегированной). Аналогично и для структурированных данных и связанных структурированных данных.

По международной практике системного инжиниринга, если системная документация недоступна, требуется реверс-инжиниринг, чтобы сохранить правильную конфигурацию системы «как есть» и понять поведение системы перед внесением каких-либо изменений [13]. В исследовании подчеркивается важность реверс инжиниринга для представления существующей архитектуры системы, включая определение архитектуры программного обеспечения до внесения каких-либо изменений. Это же можно распространить на все иные виды исходных данных, включая модели и информацию от заинтересованных сторон.

Ниже приведены основные требования к реализации цифрового паспорта. Отсылки в основном указывают на исследования о цифровых двойниках, однако, по нашему мнению, в настоящее время следует выделить цифровой паспорт как отдельную сущность, что не мешает использованию базовых требований, ранее рассматривавшихся как требования к цифровым двойникам:

- Поддержка управления жизненным циклом – цифровой паспорт должен обеспечивать управление всеми этапами жизненного цикла объекта, от проектирования до вывода из эксплуатации [14]. Это требует наличия механизмов для обновления информации, связанных с изменениями в структуре объекта, его компонентах или процессах. Задача известна достаточно давно [15] и здесь цифровой

паспорт является лишь отражением наиболее удобного способа ее реализации в цифровую эпоху.

- Коммуникации всех заинтересованных сторон.
- Взаимодействие с внешними системами – цифровой паспорт должен поддерживать возможность взаимодействия с другими цифровыми паспортами и системами на уровне предприятия или отрасли [16]. Это особенно важно в условиях интеграции промышленных объектов в более крупные системы, где необходимо учитывать взаимозависимости и обмен данными.
- Согласованность и полнота данных – цифровой паспорт должен включать полное описание всех сущностей объекта и их взаимосвязей. Это требует использования формализованных данных, представленных в едином формате и согласованных всеми участниками процесса [17]. Данные, включаемые в цифровой паспорт, должны быть актуализированы и структурированы в соответствии с системной архитектурой [18].
- Интеграция данных и процессов – цифровой паспорт должен обеспечивать возможность интеграции данных из различных источников, включая документы, результаты измерений и наблюдений, модели и информацию от заинтересованных сторон. Важно, чтобы интеграция данных происходила в реальном времени, что позволит поддерживать актуальность информации на всех этапах жизненного цикла объекта [19].
- Модульность и гибкость – структура цифрового паспорта должна быть модульной, что позволит обновлять и изменять отдельные компоненты системы по мере необходимости. Это особенно важно в условиях постоянной модернизации объектов и изменений в их эксплуатационных характеристиках.
- Возможность прогнозирования и моделирования – цифровой паспорт должен поддерживать работу с прогнозными моделями, которые позволяют предсказать поведение объекта в будущем. Это включает моделирование сценариев эксплуатации, аварийных ситуаций и изменений внешних условий, что особенно важно для сложных промышленных объектов, которые взаимодействуют с другими системами [20].

3. Методы

Предлагаемый метод направлен на создание цифрового описания объекта на основе принципов MBSE и онтологического моделирования. Метод включает сбор и структурирование исходных данных об объекте из документации, наблюдений и экспертных источников, определение границ рассматриваемой системы, выделение сущностей в группах «требования – функции – компоненты – процессы», построение их иерархической семантической модели с атрибутами, выявление связей между сущностями с помощью матриц отношений и последующую сборку целостной онтологической модели. Результатом применения метода является цифровой паспорт объекта, представляющий его состав, свойства, процессы и взаимосвязи в машиноинтерпретируемом виде. Метод носит итеративный характер и позволяет по мере уточнения данных дополнять, согласовывать и балансировать цифровое описание объекта.

Данный метод был разработан и опубликован в статье авторов [8] применен к гидротехнической отрасли, а также представлен на рис. 1 и рис. 2. В данной работе приводится несколько иная интерпретация этого метода, с апробацией в нефтегазовой отрасли.

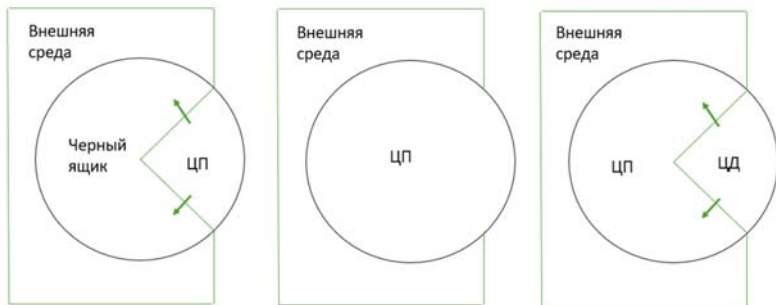


Рис. 1. Схема реализации цифровой трансформации промышленного объекта. От отсутствия системной архитектуры и неструктурированных данных по объекту к цифровому паспорту и цифровому двойнику.

Fig. 2. Scheme for implementing digital transformation of an industrial facility. From the absence of a system architecture and unstructured data on the facility to a digital passport and a digital twin.

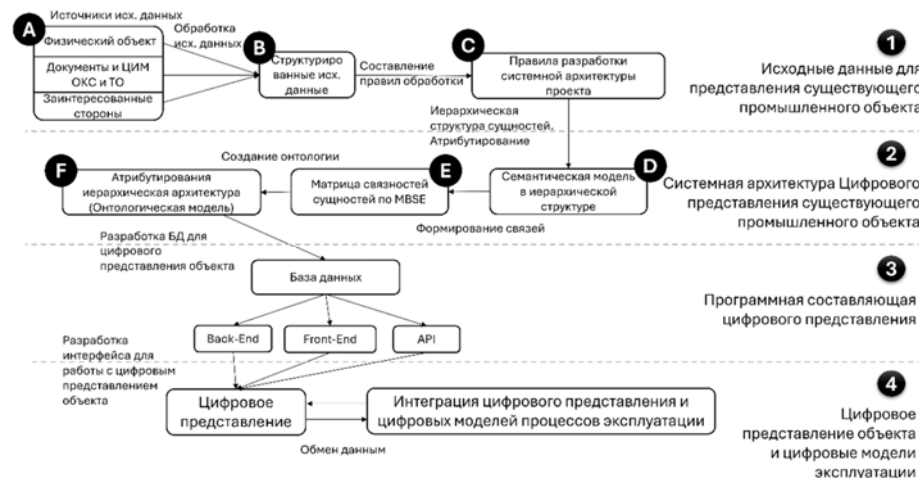


Рис. 3. Алгоритм формирования системной архитектуры и цифрового паспорта существующего технического объекта.

Fig. 2. Algorithm for creating a system architecture and a digital passport for an existing technical facility.

4. Результаты

Метод был протестирован на примере газораспределительной станции (ГРС) для построения системной архитектуры объекта для создания цифрового паспорта, без учета программной реализации БД, клиентской и серверной части.

1) Сбор исходных данных из источников исходных данных.

Источниками исходных данных были локальные документы самой ГРС – проектная документация, инструкции должностные, а также нормативная документация, в том числе СТО Газпром, также в качестве источников рассматривались заинтересованные стороны – проектировщики и эксплуатанты ГРС, также была использована компьютерная модель процесса, реализуемого в существующей автоматизированной системе управления технологическим процессом (АСУТП).

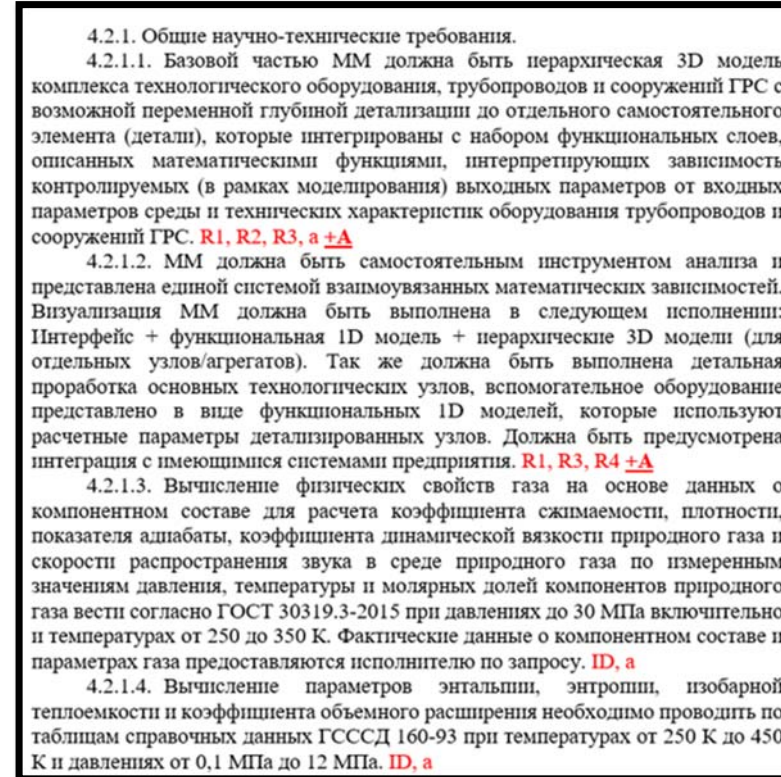


Рис. 4. Пример разметки исходных данных от заинтересованной стороны (техническое задание заказчика). Каждому абзацу присписывается определенный класс объекта для последующей обработки и структурирования.

Fig. 3. An example of markup of source data from a stakeholder (customer's technical specifications). Each paragraph is assigned a specific object class for subsequent processing and structuring.

2) Структурирование и разметка исходных данных.

Вся собранная информация была размечена, разбита в текстовом виде на сущности (требования, функции компоненты, процессы и модели) и атрибуты для последующего уточнения (рис. 4).

3) Формализация правил формирования и обновления системной архитектуры и цифрового паспорта.

По результатам разметки и предварительного определения сущностей, моделей и атрибутов были сформулированы правила формирования системной архитектуры. Цель данного этапа – сформировать правила применительно к конкретному объекту, которые будут дополнять общие правила формирования системной архитектуры, либо при согласовании заинтересованными сторонами будут отступать от общих правил в связи со спецификой конкретного объекта и контекстом взаимодействия участников. Примеры правил приведены ниже курсивом:

- *Правило формирования семантической модели: Состав справочника терминов определяется основными сущностями (требования, функции, процессы,*

- компоненты), самой системой, а также процессами эксплуатации (до 2-го уровня декомпозиции включительно).
- Обоснование: нет необходимости включать более детализированные процессы, поскольку верхнеуровневое описание будет описывать ключевую информацию, которая релевантна и на нижних уровнях иерархии, для последующего использования в других справочниках.
- Правило наименования: В справочнике требований столбец названий требования заполняют в формате «Требование к процессу X», где X – конкретный элемент (unit) процессов. Например «Требование к процессу ремонта узла редуцирования».
- Обоснование: для существующего объекта известны существующие процессы, к которым предъявляются требования.
- В данном случае в описании правил использовалась форма «правило + обоснование», однако авторы считают более ценным использовать форму «правило + обоснование + пример», при наличии такой возможности, поскольку конкретный пример помогает находить противоречия и недостатки в правилах на ранних этапах их формирования.
- 4) Формирование семантической модели.
- На основе размеченных и структурированных исходных данных была сформирована иерархическая структура сущностей (Рис. 5) и составлены справочники определений (Рис. 6).



Рис. 5. Пример иерархической декомпозиции верхнеуровневого требования.
Fig. 4. An example of hierarchical decomposition of a top-level requirement.

Справочник терминов и понятий		
Термины	Пояснение	Комментарии и регистрация изменений
Газораспределительная станция	Технологический комплекс, присоединенный к линейной части магистрального газопровода, предназначенный для изменения параметров природного газа перед подачей в сети газораспределения, включая очистку, редуцирование, мероприятия по предотвращению гидратообразования (подогрев), одоризацию, а также измерения расхода газа	СТО Газпром 2-2.3-1122-2017
Узел редуцирования ГРС	Подсистема ГРС, выполняющая функцию уменьшения давления газа для подачи потребителю	Определение принято в рамках данного кейса
Система	Любая совокупность технических, социальных и природных взаимосвязанных составляющих, в которой существует достаточная координация между этими частями, чтобы рассматривать их как единое целое было целесообразным.	на основе определения INCOSЕ SEBOOK, p.105

Рис. 6. Пример справочника общих терминов, использующихся в системной архитектуре ЦП.
Fig. 7. Example of a dictionary of common terms used in the digital passport system architecture.

- 5) Атрибутирование всех сущностей.
- На Рис. 8 в справочнике приведены присвоенные атрибуты, однако они были определены и согласованы после формирования справочника сущностей. Для сущностей на нижних уровнях декомпозиции были использованы атрибуты, относящиеся к конкретным физико-техническим или процессным аспектам, а для сущностей более верхнего уровня были использованы интегральные атрибуты. Например, атрибут статуса для требования безопасности ГРС, принимающий значение 1 при соблюдении безопасности всех требований нижнего уровня (безопасности в отдельных узлах), определяемых измеряемыми и наблюдаемыми показателями.
- 6) Определение связей между всеми формализованными сущностями.
- В рамках тестовой реализации было выполнено определение взаимосвязей между сущностями для узла редуцирования ГРС. Для определения обоих направлений связей, наличие каждого направления и его характеристика определялось отдельно (то есть связь может быть односторонней исходя из принципа работы системы и конкретных компонентов и процессов). Для каждой связи были определены атрибуты, которые ее определяют и выражают описание зависимости. Каждой связи была подобрана соответствующая модель и в матрице связанностей наименование модели было отражено на пересечениях, отражающих данную связь (Рис.9). Поскольку каждое направление связей учитывается отдельно, матрица является несимметричной. Каждая ячейка пересечения отвечает на вопрос «какой моделью описывается влияние сущности из заголовка столбца на сущность в заголовке строки»?

Справочник терминов и понятий		
Термины	Пояснение	Комментарии и регистрация изменений
Газораспределительная станция	Технологический комплекс, присоединенный к линейной части магистрального газопровода, предназначенный для изменения параметров природного газа перед подачей в сети газораспределения, включая очистку, редуцирование, мероприятия по предотвращению гидратообразования (подогрев), одоризацию, а также измерения расхода газа	СТО Газпром 2-2.3-1122-2017
Узел редуцирования ГРС	Подсистема ГРС, выполняющая функцию уменьшения давления газа для подачи потребителю	Определение принято в рамках данного кейса
Система	Любая совокупность технических, социальных и природных взаимосвязанных составляющих, в которой существует достаточная координация между этими частями, чтобы рассматривать их как единое целое было целесообразным.	на основе определения INCOSE SEBOOK, p.105

Рис. 8. Пример справочника общих терминов, использующихся в системной архитектуре ЦП.
Fig. 6. Example of a dictionary of common terms used in the digital passport system architecture.

Справочник моделей по системе «узел редуцирования в ГРС»

ID	Название модели	Семантическое описание модели	Атрибуты и параметры модели	Место хранения модели
LM.1	Логическая модель работы входного запорного крана	Если запорный кран закрыт, регуляторы давления не активируются, показания с датчиков не снимаются. Модель работает как логический переключатель	k_1 = 1 открыт k_1 = 0 закрыт	Excel XXX-1
CM.1	Газодинамическая мат. модель	Модель находится в техническом слое, которая на основании входных данных рассчитывает выходные: Входные данные модели - давление на входе и площади сечения в регуляторе; Выходные данные - давление на выходе.	p_1 = давление на входе, S = площадь сечения в регуляторе p_2 = давление на выходе	Ansys XXX-1
CM.2			T_1 = температура на входе, S = площадь сечения в регуляторе T_2 = температура на выходе	Ansys XXX-2
LM.2	Условие безопасности	Если кран закрыт, безопасность обеспечена	B_1 = 1 - безопасность не обеспечена	Excel XXX-2

Рис. 10. Фрагмент справочника моделей.
Учитываются атрибуты сущностей и место хранения модели.
Fig. 8. A fragment of the model reference.
The entity attributes and model storage location are taken into account.

		Сущности		Матрица взаимосвязей		Матрица взаимосвязей		Матрица взаимосвязей		
		Сущность	Матрица взаимосвязей	Сущность	Матрица взаимосвязей	Сущность	Матрица взаимосвязей	Сущность	Матрица взаимосвязей	
P1.1		Магистраль	P1.1.1	Входная труба	P1.1.2	датчики давления и температуры	P1.1.3	Выходная труба	P1.1.4	Изолирующая вставка
P1.2		Узел переключения	P1.2.1	Краны на входе	P1.2.2	Краны на выходе	P1.2.3	Обводная линия	P1.2.5	Предохранительные клапаны
P1.3		Узел очистки	P1.3.1	Датчики давления	P1.3.2	Горизонтальный циклон	P1.3.3	Сетчатый фильтр	P1.3.3	Датчики давления

Рис. 9. Матрица связанностей сущностей с отражением моделей, описывающих каждую связь.
Fig. 7. A matrix of entity relationships that reflects the models that describe each relationship.

7) Формализация моделей.

В показанном примере в матрице уже расставлены ссылки на модели. Они отражают сформированную на данном шаге индексацию и определения каждой модели. Пример справочника моделей, сформированных на данном шаге, приведен на Рис. 10.

- 8) Внесение определений используемых моделей в семантическую модель системы.
- На этом шаге и при формировании справочника формировалось вербальное описание модели и процедуры ее работы, входных и выходных данных. При этом согласованию заинтересованными сторонами подлежит именно вербальное описание, а математическое описание и реализацию в той или иной среде можно считать исключительно технической задачей нахождения подходящей формы представления данному вербальному описанию.
- 9) Определение связей требований, функций, компонентов и процессов с моделями (в том числе связанности моделей между собой) и дополнение матрицы связанности моделями.
- В рамках эксперимента этот этап был реализован в виде графа, соответствующего технологическому процессу, и последовательности передачи данных между различными моделями, дополнение матрицы не производилось (Рис. 11).
- 10) Формирование системной архитектуры.

Проводится итеративное повторение шагов 1-9 с дополнением и корректировками до момента, когда все составляющие будут согласованы (если иное не предусмотрено в разработанных правилах формирования СА).

В рамках эксперимента результирующая архитектура была сформирована в виде комплекта файлов, содержащих все составляющие СА цифрового паспорта (Рис. 12), а также в специализированном ПО для формирования СА Archi [21] (рис. 11).

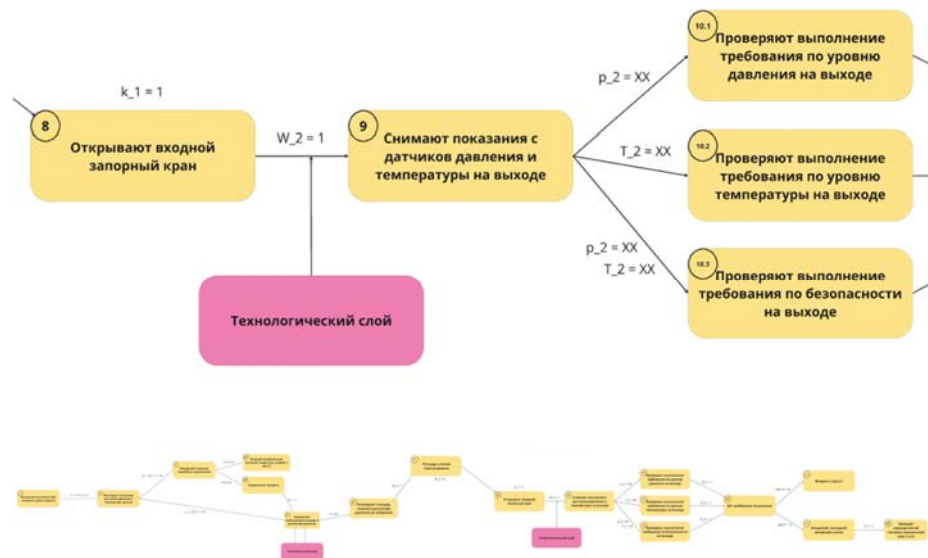


Рис. 11. Связанность моделей и передаваемых показателей атрибутов и параметров.

Fig. 9. The relationship between models and the attributes and parameters that are transmitted.



Рис. 12. Комплект, представляющий системную архитектуру в рамках проводимой тестовой реализации.

Fig. 13. A set that represents the system architecture within a case.

11) Формирование базы данных согласно сформированной архитектуре и программная реализация серверной и клиентской части, а также прикладной программный интерфейс (API) для внешнего программного обеспечения.

Данный шаг является предметом дальнейших исследований и не выполнялся в рамках данного эксперимента.

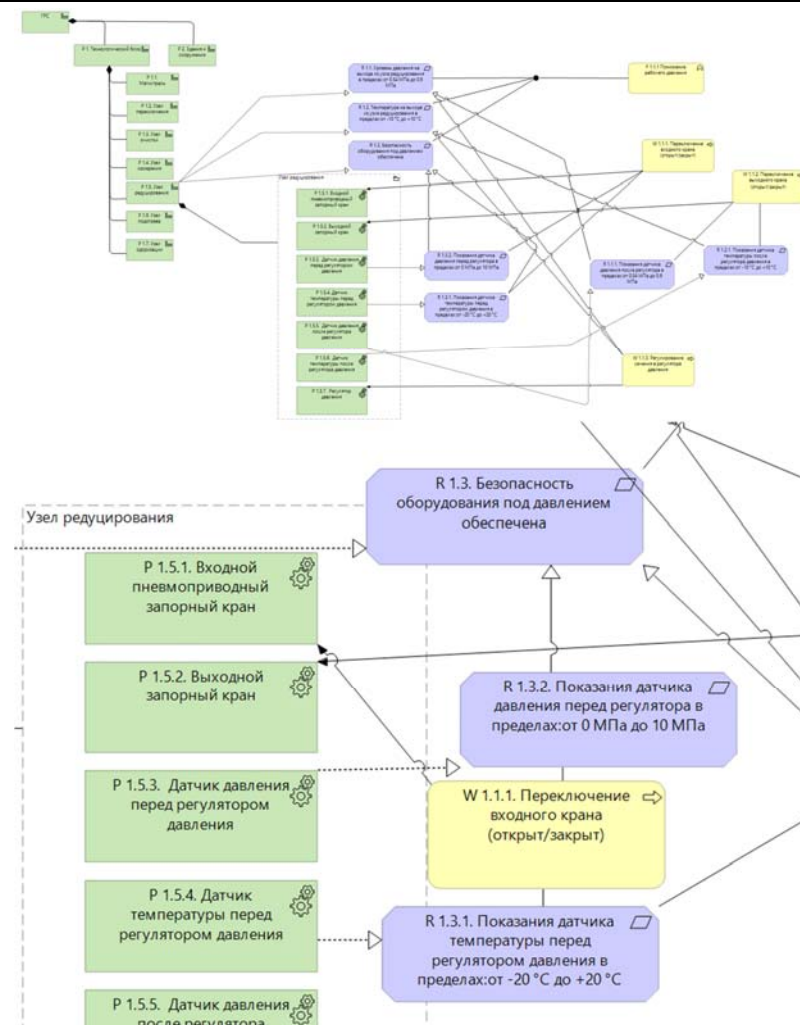


Рис. 14. Фрагмент системной архитектуры для узла редуцирования в нотации Archimate.

Fig. 15. A fragment of the system architecture for a reduction node in Archimate notation.

5. Обсуждение

Ключевой задачей дальнейшей проработки системной архитектуры является создание цифрового паспорта как инструмента. Такой цифровой паспорт по своей сути может быть реализован и как набор связанных программных документов (матриц, справочников, схем), и как совокупность информации в специализированном ПО. Прежде всего, требуется дальнейшее совершенствование инструментальных средств, поддерживающих методику: разработка программных модулей для автоматизированного ввода и обновления данных, конвертации моделей и документов, интеграции с датчиками и системами реального времени. Перспективным направлением является внедрение элементов искусственного

интеллекта для анализа накопленных данных цифрового паспорта – например, машинное обучение для диагностики аномалий в поведении оборудования или рекомендации по оптимизации режимов работы. Отдельная задача – обеспечение кибербезопасности и защиты данных цифрового паспорта, особенно при подключении его к внешним сетям и устройствам (IoT): в будущем исследования должны уделить внимание стандартам безопасности и резервирования информации, содержащейся в цифровых двойниках важных объектов. Также дальнейшего изучения требует вопрос унификации формата цифрового паспорта. Разработка отраслевых стандартов (на национальном и международном уровне), описывающих структуру и состав данных цифрового паспорта для различных типов объектов, позволит значительно облегчить обмен такими паспортами между организациями и регуляторными органами, повысит совместимость решений разных поставщиков.

6. Выводы

В рамках исследования был сформирован подход к созданию и использованию цифрового паспорта на реальном объекте.

Ключевым можно считать содержание и организация состава цифрового паспорта, а именно системной архитектуры, представленные в данной статье:

- Справочники определений предметной области (в данном примере – ГРС);
- Справочники определений сущностей объекта (требования, функции, компоненты процессы);
- Справочники моделей;
- Иерархическая структура сущностей;
- Матрица связанностей сущностей;
- Схема связанностей моделей;
- Структурированные исходные данные;
- Правила формирования и обновления.

При этом форма представления паспорта может меняться в зависимости от предметной области и конкретных решаемых задач и быть реализована в любом подходящем программном обеспечении, обеспечивающем необходимые API связи с системами аналитики и поддержки принятия решений.

Необходим переход к модельно-ориентированному подходу, когда цифровой паспорт является информационной моделью промышленного объекта, и вся связанная онтология предметных областей, конкретных изделий и процессов реализована в соответствующих моделях, имеющих сквозное применение и согласованность.

Список литературы / References

- [1]. ГОСТ Р 57700.37-2021. Computer Models and Simulation. Digital Twins of Products. General Provisions, 2021.
- [2]. Распоряжение Правительства РФ от 31 октября 2022 г. № 3268-р. Об утверждении Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства РФ на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г., 2022.
- [3]. COTES Инжиниринг. Цифровой паспорт промышленного объекта – описание продукта на официальном сайте. Доступно по ссылке: <https://Cotes.Ru/Czifrovoy-Pasport/>, обращение 05.04.2026.
- [4]. Grieves M.; Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*; 2016.
- [5]. Cimino C., Negri E., Fumagalli L. Review of Digital Twin Applications in Manufacturing. *Comput. Ind.* 2019, 113, DOI: 10.1016/j.compind.2019.103130.

- [6]. Lee J., Bagheri B., Kao H.A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manuf. Lett.* 2015, 3, DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
- [7]. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Trans. Ind. Informatics* 2019, 15, DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
- [8]. Badenko V., Yadykin V., Kamsky V., Mohireva A., Bezborodov A., Melekhin E., Sokolov N. Method for Developing the System Architecture of Existing Industrial Objects for Digital Representation Tasks. *Syst.* 2024, vol. 12, pp. 355 2024, 12, 355, DOI: 10.3390/SYSTEMS12090355.
- [9]. Bolshakov N., Badenko V., Yadykin V., Tishchenko E., Rakova X., Mohireva A., Kamsky V., Barykin S. Cross-Industry Principles for Digital Representations of Complex Technical Systems in the Context of the MBSE Approach: A Review. *Appl. Sci.* 2023, 13, DOI: 10.3390/app13106225.
- [10]. Carvalho C., Silva C.J., Abreu M.J. Circular Economy: Literature Review on the Implementation of the Digital Product Passport (DPP) in the Textile Industry. *Sustain.* 2025, 17, DOI: 10.3390/su17051802.
- [11]. Федеральный Закон от 25 декабря 2023 г. № 658-ФЗ, 2023. Статья 3. Пункт 24.
- [12]. Приложение 1 к Постановлению Правительства Москвы от 4 октября 2022 г. № 2125-ПП “Порядок формирования и актуализации цифровых паспортов объектов капитального строительства, ведения реестра цифровых паспортов объектов капитального строительства”.
- [13]. Seacord R.C., Plakosh D., Lewis G.A. *Modernizing Legacy Systems: Software Technologies, Engineering Process and Business Practices*; Addison-Wesley Longman Publishing Co, 2003.
- [14]. Stark R., Freseman C., Lindow K. Development and Operation of Digital Twins for Technical Systems and Services. *CIRP Ann.* 2019, 68, DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.024.
- [15]. Nonaka I., Takeuchi H. The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. *Long Range Plann.* 1996, 29, DOI: 10.1016/0024-6301(96)81509-3.
- [16]. Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzack S. Shaping the Digital Twin for Design and Production Engineering. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 2017, 66, DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.040.
- [17]. Çebi F., Bayraktar D. An Integrated Approach for Supplier Selection. *Logist. Inf. Manag.* 2003, 16, DOI: 10.1108/09576050310503376.
- [18]. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification. In *Proceedings of the IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51.
- [19]. Boschert S., Rosen R. Digital Twin-the Simulation Aspect. In *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and Their Designers*, 2016.
- [20]. Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. In *Proceedings of the Collection of Technical Papers – AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 2012.
- [21]. Archimate modelling. Available at: <https://www.archimatetool.com>, accessed 09.04.2026.

Информация об авторах / Information about authors

Владимир Владимирович КАМСКИЙ – инженер-исследователь лаборатории "Моделирование технологических процессов и проектирование энергетического оборудования" ЦНТИ СПбПУ. Сфера научных интересов: модельно ориентированный системный инжиниринг, онтология, методы обследования зданий и сооружений, методы цифровой трансформации сложных систем.

Vladimir Vladimirovich KAMSKY – research engineer at the laboratory "Modeling of technological processes and design of power equipment" of the Central Scientific and Technical Information Center of St. Petersburg Polytechnical University. Research interests: model-oriented system engineering, ontology, methods of surveying buildings and structures, methods of digital transformation of complex systems.

Арина Олеговна МОХИРЕВА – аспирант 2 курса по направлению строительство, инженер-исследователь лаборатории "Моделирование технологических процессов и проектирование энергетического оборудования" ЦНТИ СПбПУ. Основное направление деятельности - цифровизация строительной отрасли. Сфера научных интересов: 3D моделирование, BIM, информационные технологии, строительство, проектирование, системная инженерия, онтология, КСИ.

Arina Olegovna MOKHIREVA – 2-nd year postgraduate student in the field of construction, research engineer of the laboratory "Modeling of technological processes and design of power equipment" of the CNTI SPbPU. The main area of activity is digitalization of the construction industry. Research interests: 3D modeling, BIM, information technology, construction, design, systems engineering, ontology, KSI.

Владимир Львович БАДЕНКО, – доктор технических наук, профессор высшей школы гидротехнического и энергетического строительства инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета, д.т.н. Сфера научных интересов: модельно ориентированный системный инжиниринг, моделирование процессов и явлений в природно-технических системах, цифровая трансформация сложных технических систем.

Vladimir Lvovich BADENKO – Dr. Sci. (Tech.), Professor at the Higher School of Hydraulic and Energy Construction, Civil Engineering Institute of St. Petersburg Polytechnic University. Research interests: model-based systems engineering, modeling of processes and phenomena in natural and technical systems, digital transformation of complex technical systems.

Владимир Константинович ЯДЫКИН – кандидат экономических наук, заведующий лабораторией "Моделирование технологических процессов и проектирование энергетического оборудования", Санкт-Петербургского политехнического университета. Сфера научных интересов: модельно ориентированный системный инжиниринг, моделирование энергетического оборудования, цифровая трансформация сложных технических систем

Vladimir Konstantinovich YADYKIN – Cand. Sci. (Economics), head of the laboratory “Modeling of technological processes and design of power equipment” of St. Petersburg Polytechnic University. Research interests: model-based systems engineering, modeling of power equipment, digital transformation of complex technical systems.