

**Фалеев Сергей Павлович**,  
гл. специалист НИОКТР, канд. техн. наук доцент,  
акад. МАН ИПТ

**ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ИЗДЕЛИЯ И ЦИФРОВОЙ СЛЕД  
ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЯ В КАЧЕСТВЕ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМНОГО  
АНАЛИЗА И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ**

Россия, Санкт-Петербург,  
ООО «Центр диагностики, экспертизы и сертификации»,  
faleev.serge.paul@gmail.com

**Аннотация.** Непрерывный процесс внедрения новой техники и технологии, организации производства и труда на основе достижений научных знаний называют научно-техническим прогрессом, который повышает эффективность функционирования экономики [1]. Как только фундаментальная наука открывает новую предметную область, системный анализ определяет основные направления инженерного освоения этой предметной области [2], проектируются и создаются эффективные изделия. Для проверки состояния и работоспособности технического изделия, выявления дефектов, отклонений от заданных условий и режима работы применяется техническая диагностика [3]. Продемонстрировано, как на основе цифровизации создать цифровой двойник изделия и цифровой след жизненного цикла изделия в качестве информационных моделей для системного анализа и технической диагностики.

**Ключевые слова:** новая техника и технологии, новая предметная область, системный анализ, проект, эффективные изделия, техническая диагностика, цифровизация, цифровой двойник изделия, цифровой след жизненного цикла изделия.

**Sergei P. Faleev**,  
Chief R&D Specialist, Acad. International of the Academy of Sciences  
on Information, Information Processes and Technologies (IASIPT),  
Candidate of Technical Sciences, Associate professor

**DIGITAL TWIN OF THE PRODUCT AND DIGITAL FOOTPRINT  
OF THE PRODUCT LIFE CYCLE AS INFORMATION MODELS  
FOR SYSTEM ANALYSIS AND TECHNICAL DIAGNOSTICS**

LLC “Center for Diagnostics, Expertise and Certification”, St.Petersburg, Russia,  
faleev.serge.paul@gmail.com

**Abstract.** The continuous process of introducing new equipment and technology, organizing production and labor based on the achievements of scientific knowledge is called scientific and technological progress, which increases the efficiency of the economy [1]. As soon as fundamental science discovers a new subject area, system analysis determines the main directions of engineering development of this subject area [2],

efficient products are designed and created. To check the condition and performance of a technical product, identify defects, deviations from the specified conditions and operating mode, technical diagnostics are used [3]. It is demonstrated how, based on digitalization, to create a digital twin of a product and a digital trace of the product life cycle as information models for system analysis and technical diagnostics.

**Keywords:** new equipment and technologies, new subject area, system analysis, project, effective products, technical diagnostics, digitalization, product digital twin, product life cycle digital footprint.

## **Введение**

Непрерывный процесс внедрения новой техники и технологии, организации производства и труда на основе достижений научных знаний называют научно-техническим прогрессом (НТП), который повышает эффективность функционирования экономики [1]. Как только фундаментальная наука открывает новую предметную область, системный анализ определяет основные направления инженерного освоения этой предметной области [2], затем проектируются и создаются новые более эффективные изделия. Для проверки состояния и работоспособности технического изделия с целью выявления в нём скрытых и явных дефектов, неисправных узлов и элементов, отклонений от заданных условий и режима работы применяется техническая диагностика, являющаяся одним из действенных средств обеспечения надёжности [3].

Современным локомотивом ускорения НТП признана цифровизация [4]. Главными преимуществами цифровизации являются повышение производительности путем сокращения времени, затраченного на технологические процессы, и повышение качества изделий на всех этапах их жизненного цикла (ЖЦ). Цифровизация ЖЦ продукции производится передовыми компаниями и представляет собой законченную цепочку автоматизации производства — от зарождения идеи через процессы проектирования, подготовки и планирования производства, непосредственно производства продукции до сдачи её заказчику и сопровождения на этапах эксплуатации и модернизации [5]. Одной из вершин цифровизации производства является цифровой двойник (ЦД) изделия, публикации о котором регулярно выходят более 30 лет [6–9]. В основном, рассказывается, ЧТО нужно сделать. Вышел в свет ГОСТ 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. ЦД изделий» [10], устанавливающий общее понятие ЦД изделия, а также общие положения и требования по разработке и применению ЦД изделий. О том, КАК сделать ЦД сведений существенно меньше. Обращение к базе патентов и программных изделий [11] с запросом о патентах, полезных моделях и программных изделиях о применении или создании ЦД показывает отсутствие зарегистрированных результатов интеллектуальной деятельности (РИД) на эту тему.

Множество ЦД можно разделить на 3 категории [7]:

– прототип (Digital Twin Prototype, DTP) — виртуальный аналог реального физического объекта. Он содержит все данные по этому продукту, включая информацию со стадий проектирования и производства, например, требования к изделию, трехмерную модель объекта, описание технологических процессов, условия утилизации и т. д. Иначе говоря, DTP содержит проект изделия.

– экземпляр (Digital Twin Instance, DTI) — данные, описывающие физический объект. Например, аннотированная трехмерная модель, сведения о материалах и компонентах изделия, информацию о рабочих процессах, итоги тестов, записи о проведенных ремонтах, операционные данные от датчиков, параметры мониторинга и пр. Иначе говоря, DTI содержит накопленные текущие сведения о ЖЦ изделия.

– агрегированный двойник (Digital Twin Aggregate, DTA) — система, которая объединяет все цифровые двойники и их реальные прототипы, позволяя собирать данные и обмениваться ими в реальном времени.

Нельзя сказать, что такой подход проясняет суть дела. Ниже мы DTP будем называть ЦД, а DTI — цифровым следом (ЦС) накопленных текущих сведений о ЖЦ изделия. Очевидно, что одному серийному проекту (и его ЦД) будут сопоставлены многочисленные ЦС изделий, изготовленных по этому серийному проекту. Таким образом, цифровой двойник можно рассматривать в качестве цифровизованного проекта реального изделия, а цифровой след — в качестве цифровизованного портрета конкретного реального изделия в процессе его движения по своему жизненному циклу.

Относительно термина ЦС опубликованы ещё два его значения: цифровой след обучающегося [12] и цифровой след пользователя, который он оставляет, совершая любые действия в сети Интернет [13], но путаница по контексту, как нам представляется, не должна происходить.

Упростим задачу и продемонстрируем, как создать цифровой двойник изделия и цифровой след жизненного цикла изделия в качестве информационных моделей для системного анализа и технической диагностики.

## **1. Действия участников и результаты НТП**

Фундаментальные исследования характерны зрелой цивилизации [14] и подразумевают теоретические и экспериментальные научные исследования основополагающих явлений, поиск закономерностей, руководящих ими и ответственных за форму, строение, состав, структуру и свойства, протекание процессов, обусловленных ими; затрагивают базовые принципы дисциплин, служат расширению представлений о сущности предмета их изучения, получению конкретных представлений о законах природы, мироздания во всех его проявлениях. Одним из резуль-

татов фундаментальных исследований является открытие новых предметных областей для прикладных наук, в т. ч. системного анализа (см. табл. 1).

Таблица 1

**Действия участников и результаты научно-технического прогресса**

<b>Действие</b>	<b>Результат</b>
Фундаментальные исследования	Новая предметная область
Системный анализ	Цели систем. Параметры систем, в т. ч. измеримые и ресурсоопределяющие параметры. Условия безопасности
Проектирование. Автоматизированные расчеты и моделирование	Проект изделия. Цифровой двойник (ЦД) изделия
Комплектация, производство, маркировка, испытания, приёмка, упаковка хранение, транспортировка, монтаж, ввод в эксплуатацию, эксплуатация и техническое обслуживание изделия	Изделие. Цифровой след (ЦС) жизненного цикла изделия
Техническая диагностика на основе ЦД и ЦС	Исправность, ограничения работоспособности, остаточный ресурс и ремонтпригодность изделия
Системный анализ на основе ЦД и ЦС	Улучшение Проекта изделия и его ЦД

Системный анализ — развитый научный метод с междисциплинарным подходом к решению практических проблем создания новых и модернизации существующих систем [15], когда могут быть определены цели, параметры, условия безопасного функционирования, являющиеся исходными для проектирования. Проектирование, автоматизированные расчеты и моделирование, в условиях цифровизации, приводят к созданию цифровых двойников, на основе которых выполняются комплектация изделия, его производство, маркировка, испытания, приёмка, упаковка хранение, транспортировка, монтаж, ввод в эксплуатацию, эксплуатация, техническое обслуживание, ремонт, модернизация и утилизация изделия. Здесь также, в условиях цифровизации, обязательно появляется цифровой след жизненного цикла изделия.

Сравнение эталонных свойств изделия, зафиксированных в ЦД, и текущего состояния изделия, история которого фиксируется и накапливается в ЦС, является задачей цифровизованной технической диагностики по выработке оперативных оценок свойств изделия: исправности, ограничений работоспособности, остаточного ресурса функционирования и ремонтпригодности изделия. По результатам накопления многих ЦС от серии изделий, путем их сравнения со спроектированным ранее ЦД, может ставиться методами системного анализа задача улучшения

проекта изделия и разработки его усовершенствованного ЦД. При этом ЦД и ЦС могут рассматриваться как цифровые информационные модели для технической диагностики и системного анализа.

## **2. Алгоритмы создания цифрового двойника изделия и цифрового следа жизненного цикла каждого экземпляра изделия**

Проект (и ЦД) может содержать сведения об измеримых и ресурсоопределяющих параметрах изделия. Текущие значения измеримых в реальном масштабе времени параметров изделия, фиксируемые в ЦС, являются основой для оперативного определения методами технической диагностики свойств изделия: исправности, ограничений работоспособности и ремонтпригодности. Текущие значения измеримых в реальном масштабе времени ресурсоопределяющих параметров изделия дают возможность вычисления на основе ЦД остаточного ресурса функционирования изделия. В качестве изделия могут выступать сложные промышленные комплексы, отдельные системы, устройства и/или элементы — в зависимости от поставленной задачи. Но алгоритмы создания ЦД изделия и ЦС жизненного цикла изделия остаются практически без изменения. Техническим результатом является повышение качества обеспечения своевременной технической диагностики исправности, работоспособности, ремонтпригодности и остаточного ресурса функционирования изделия.

Для формирования в условиях цифровизации промышленности ЦД заданного проекта (типоразмера) изделия устанавливают связь с разработчиком (разработчиками) изделия, получают и запоминают в постоянном запоминающем устройстве конструктивно-технологическую информацию об изделии заданного проекта (типоразмера), в том числе заданные перечни измеримых параметров всего изделия, его комплектующих и материалов и заданные диапазоны их значений, в том числе для ресурсоопределяющих элементов изделия, соответствующие состояниям полной исправности, режима ограниченной работоспособности в определенных условиях функционирования, остаточного ресурса функционирования и ремонтпригодности изделия, требования к параметрам материалов и комплектующих, к технологиям производства, маркировки, испытания, приёмки, упаковки, хранения, транспортировки, монтажа, ввода в эксплуатацию, технологий и требований к эксплуатации, техническому обслуживанию, ремонту и утилизации всего изделия, его комплектующих и материалов, к параметрам этих процессов и их влияниям на измеримые параметры изделия и на состояния полной исправности, режима ограниченной работоспособности в определенных условиях функционирования, на остаточный ресурс функционирования и ремонтпригодность изделия (см. рис. 1).

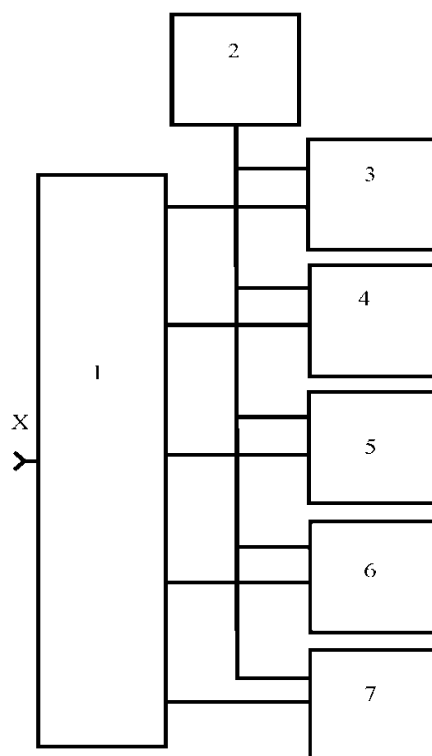


Рис. 1. Схема алгоритма формирования цифрового двойника

На рисунке 1: Через разъем X селектор 1 подключается к разработчику проекта изделия. Генератор отметок времени 2 указывает момент создания записей в запоминающих блоках: 3 — конструктивно-технологическая информация; 4 — требования к параметрам материалов и комплектующих; 5 — требования к технологиям производства, маркировки, испытания, приёмки, упаковки; 6 — требования к технологиям хранения, транспортировки, монтажа, ввода в эксплуатацию и 7 — технологии и требования к эксплуатации, техническому обслуживанию, ремонту и утилизации изделия.

С началом комплектации комплектующими, материалами и производства каждого экземпляра изделия заданного проекта (типоразмера), приступают к формированию ЦС каждого экземпляра изделия: устанавливают связи с производителем, выполняющим комплектацию, изготовление и испытание изделия; устанавливают связи с поставщиком, выполняющим хранение, транспортировку, монтаж и ввод в эксплуатацию, и устанавливают связи с эксплуатантом изделия, получают и записывают с указанием даты и времени (накапливают) в оперативное запоминающее устройство фактическую информацию о соответствии и/или отклонениях от заданных диапазонов требований измеримых параметров изделия, от требований к параметрам фактически применяемых материалов и комплектующих, о соответствии и/или отклонениях от технологий производства, маркировки, испытания, приёмки, упаковки, хранения, транспортировки, монтажа, ввода в эксплу-

атацию, о соответствии и/или отклонениях от технологий и требований к эксплуатации и техническому обслуживанию в процессах комплектации, производства, маркировки, испытания, приёмки, упаковки, хранения, транспортировки, монтажа, ввода в эксплуатацию, эксплуатации и технического обслуживания изделия, а также информацию об аварийных ситуациях, авариях и ремонтах изделия, оказавших влияние на дальнейшие исправность, ограничения работоспособности, остаточный ресурс и ремонтпригодность изделия (см. рис. 2).

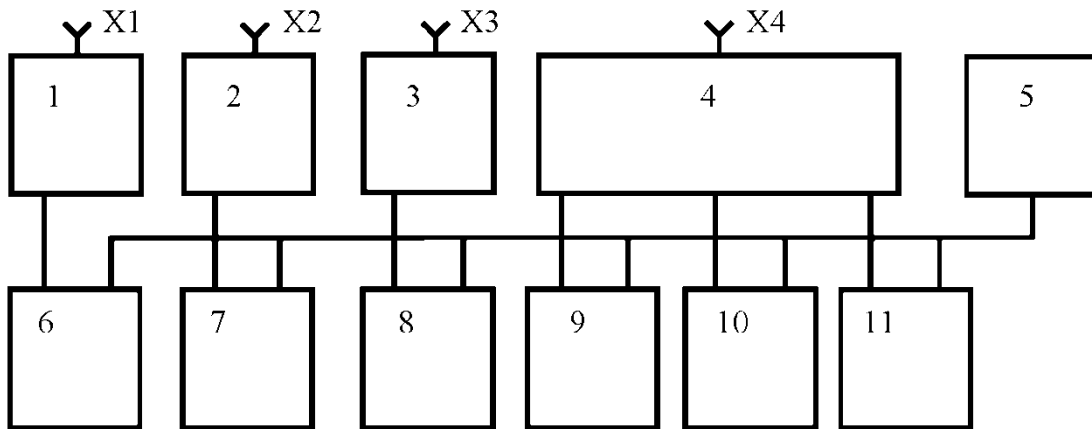


Рис. 2. Схема формирования цифрового следа ЖЦ изделия

На рисунке 2: Через разъем X1 блок связи 1 подключается к службе комплектации изделия и передает в запоминающее устройство 6 информацию по параметрам фактически применяемых материалов и комплектующих; через разъем X2 блок связи 2 подключается к производителю изделия и передает в запоминающее устройство 7 информацию по фактически применённым технологиям производства, маркировки, испытания, приёмки, упаковки; через разъем X3 блок связи 3 подключается к поставщику изделия и передает в запоминающее устройство 8 информацию по фактически применённым технологиям хранения, транспортировки, монтажа, ввода в эксплуатацию изделия; через разъем X4 блок связи 4 подключается к эксплуатанту изделия и передает в запоминающее устройство 9 фактическую информацию о соответствии и/или отклонениях от заданных технологий и требований к эксплуатации и техническому обслуживанию изделия, в запоминающее устройство 10 фактическую информацию об аварийных ситуациях, авариях и ремонтах изделия, оказавших влияние на дальнейшие исправность, ограничения работоспособности, остаточный ресурс, ремонтпригодность изделия и в запоминающее устройство 11 — фактическую информацию о соответствии и/или отклонениях измеримых параметров изделия, в т. ч. ресурсопределяющих, от заданных диапазонов их допустимого изменения, о достижении критических границ их изменения и о состоявшихся фактических вкладах зависимостей

от их значений в характеристики полной исправности, ограниченной работоспособности в определенных условиях функционирования, остаточного ресурса, ремонтпригодности изделия. Генератор отметок времени 5 указывает момент создания записей в блоках 6 – 11.

На основе сравнения ЦД заданного проекта (типоразмера) изделия и ЦС каждого экземпляра изделия, путем сравнения заданной и фактической информации о соответствии или отклонениях от заданных диапазонов требований фактически измеренных параметров комплектации, материалов и всего изделия, заданной и фактической информации по технологиям производства, маркировки, испытания, приёмки, упаковки, хранения, транспортировки, монтажа, ввода в эксплуатацию, технологий и требований к эксплуатации и техническому обслуживанию можно судить о полной исправности, режимах ограниченной работоспособности, остаточном ресурсе функционирования, ремонтпригодности изделия и на основе соответствующих принятых решений выдавать информацию заинтересованным лицам (разработчикам, производителям, поставщикам, и эксплуатантам) о полной исправности, режимах ограниченной работоспособности, остаточном ресурсе функционирования, о ремонтпригодности, о приближении к аварийной ситуации каждого изделия, которая, в определенных случаях, может представлять интерес для МЧС и природоохранных служб.

Аналогичные действия по сбору данных ЦД и ЦС и выработке на их основе решений можно выполнять также по другим интересующим проектам (типоразмерам) изделий и каждому изготовленному изделию интересующих проектов (типоразмеров).

Конструктивно-технологическая информация об изделии, заданных перечнях измеримых параметров, создается при проектировании, технологической подготовке производства и испытаниях изделия, в том числе виртуальных. При этом определяются диапазоны значений измеримых параметров, соответствующие состояниям полной исправности, режиму ограниченной работоспособности, остаточного ресурса функционирования, ремонтпригодности изделия и для ресурсоопределяющих элементов изделия. Затем диапазоны уточняются при инженерных и технологических расчетах, а также при испытаниях изделия, виртуальных испытаниях адекватной цифровой модели изделия. При этом выясняются рекомендуемые диапазоны параметров комплектации, материалов и всего изделия, технологии и требования для нормальной эксплуатации, нормального расходования ресурса изделия и не рекомендуемые диапазоны параметров изделия, которые соответствуют ускоренному расходу ресурса изделия при выходе какого-либо параметра или их группы за пределы рекомендуемых диапазонов их значений. При виртуальных испытаниях, а в ряде случаев и при натурных или полунатурных испытаниях,



определяются граничные критические значения параметров комплектации, материалов и всего изделия, при выходе за которые даже на не продолжительное время создаётся аварийная ситуация, происходят резкая убыль остаточного ресурса, поломки, влияющие на ремонтпригодность изделия. В результате определяется стратегия поддержания тех или иных параметров изделия в заданных диапазонах значений — определяется приоритетный перечень таких ресурсопределяющих элементов, их параметров и степени влияния периода времени выходов каждого параметра за заданный диапазон значений на состояния полной исправности, режима ограниченной работоспособности в определенных условиях функционирования, остаточного ресурса функционирования, ремонтпригодности изделия.

При технологической подготовке производства изделия уточняются требования к диапазонам параметров материалов и комплектующих, к технологиям производства, маркировки, испытания, приёмки, упаковки, хранения, транспортировки, монтажа, ввода в эксплуатацию. При фактическом исполнении указанных этапов движения изделия по стадиям своего жизненного цикла все эти параметры, режимы приобретают фактические значения, подлежащие регистрации с указанием даты и времени, которые оказывают влияние в том числе на ресурсопределяющие элементы изделия, пределы исправности, ограниченной работоспособности, остаточного ресурса функционирования, ремонтпригодности изделия.

В процессах эксплуатации изделия и его технического обслуживания под воздействием условий внешней среды измеримые параметры изделия изменяют свои значения. Особое внимание направляется на ресурсопределяющие элементы, нарушение работоспособности которых может привести к нарушению исправности, ограниченной работоспособности, остаточного ресурса функционирования, ремонтпригодности изделия. Знание истории изменения измеримых параметров позволяет судить о будущей судьбе изделия: выясняются пределы времени исправности, ограниченной работоспособности в определенных условиях функционирования, остаточного ресурса функционирования, ремонтпригодности изделия. Эти выводы являются основой для принятия решений о полной исправности, режимах ограниченной работоспособности в определенных условиях функционирования, остаточном ресурсе функционирования изделия, о ремонтпригодности изделия.

Таким образом осуществляется своевременная техническая диагностика исправности, работоспособности в определенных условиях функционирования, ремонтпригодности и остаточного ресурса функционирования одного изделия.

При объединении информации, получаемой в виде ЦД и ЦС от нескольких изделий, выполненных по одному проекту (типоразмеру), можно получить представление об общих эксплуатационных показателях изделий, выполненных по одному проекту (типоразмеру). При объединении информации от нескольких изделий, выполненных по различным проектам, но эксплуатируемых на заданной территории, можно получить представление об общих на заданной территории эксплуатационных показателях таких изделий. Аналогичные действия по сбору данных ЦД и ЦС и выработке на их основе решений можно соотнести с конкретным разработчиком для оценки его творческого потенциала.

Собранная таким образом информация о цифровых моделях с реальной статистикой в форме ЦД и ЦС может направляться специалистам по системному анализу для улучшения проектов изделий.

### **Заключение**

В настоящей работе на основе цифровизации обоснованы и приведены алгоритмы создания цифрового двойника изделия и цифрового следа жизненного цикла каждого экземпляра изделия, которые могут быть применены в качестве информационных моделей для системного анализа и технической диагностики.

### **Список литературы**

1. Научно-технический прогресс (НТП): статья [Электронный ресурс] // EREPORT.RU. – URL: <http://www.ereport.ru/articles/firms/ntp.htm> (дата обращения: 11.11.2022).
2. Системный анализ: статья [Электронный ресурс] // Лаборатория системного анализа 2018. – URL: [https://systems-analysis.ru/systems\\_analysis.html](https://systems-analysis.ru/systems_analysis.html) (дата обращения: 11.11.2022).
3. Техническая диагностика // Энциклопедия техники. Академик, 2000-2023. – URL: [https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_tech/1236/%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F](https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_tech/1236/%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F) (дата обращения: 11.11.2022).
4. Таскаев А. Как цифровизация промышленных предприятий упрощает производство [Электронный ресурс] // ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО СК ПРЕСС». – URL: <https://www.itweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=222420> (дата обращения: 11.11.2022).
5. Иванов Е., Бабушкин Б. TechnologiCS – цифровизация жизненного цикла продукции на базе одной системы [Электронный ресурс] // Habr. 26.11.2020. – URL: <https://habr.com/ru/company/nanosoft/blog/530058/> (дата обращения: 11.11.2022).
6. Цифровой двойник (Digital Twin): статья // ИРИСОФТ. – URL: <https://www.irisoft.ru/products/thingworx/czifrovoj-dvojn timer-nedostayushhee-zveno/> (дата обращения: 11.11.2022).
7. Вичугова А. Цифровизация производства и цифровые двойники: объединяем PLM, IoT и Big Data [Электронный ресурс] // ООО «Учебный центр «Коммерсант», Школа больших данных. – URL: <https://www.bigdataschool.ru/bigdata/digital-twin-plm-iot-big-data.html> (дата обращения: 11.11.2022).
8. Ключевые инструменты и форматы развития цифровой экономики: «умные» цифровые двойники и Центр НТИ СПбПУ [Электронный ресурс] // Трамплин к успеху. – Ярославль: ПАО «ОДК-Сатурн», 2018. – № 13. – С. 12–16. – URL: <https://fea.ru/news/6722> (дата обращения: 11.11.2022).

9. Зуйкова А. Что такое цифровые двойники и где их используют [Электронный ресурс] // РБК. 03.08.2021. – URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb> (дата обращения: 11.11.2022).

10. ГОСТ 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий.

11. Информационно-поисковая система Федерального института промышленной собственности // ФИПС. – URL: <https://www1.fips.ru/iiss/search.xhtml> (дата обращения: 11.11.2022).

12. Стандарт цифрового следа [Электронный ресурс] // Университет НТИ «20.35». – URL: <https://standard.2035.university/> (дата обращения: 11.11.2022).

13. Ведерина Е. Что такое цифровой след и можно ли его замести [Электронный ресурс] // РБК. 29.07.2021. – URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6102b48c9a79471b527dc006> (дата обращения: 11.11.2022).

14. Фундаментальные исследования (значения) [Электронный ресурс] // Wikipedia. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Фундаментальные\\_исследования\\_\(значения\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Фундаментальные_исследования_(значения)) (дата обращения: 11.11.2022).

15. Системный анализ в проектировании и управлении. В 3 ч.: Сборник научных трудов XXV Международной научной и учебно-практической конференции, 13–14 октября 2021 г. – СПб.: Политех-Пресс, 2021.