

Фалеев Сергей Павлович,
начальник отдела научно-технической экспертизы,
канд. техн. наук доцент, акад. МАН ИПТ

**СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ИЗДЕЛИЯ
НА ОСНОВЕ СРАВНЕНИЯ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТА
И АКТУАЛИЗИРУЕМОГО В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ
ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ИЗДЕЛИЯ**

Россия, Санкт-Петербург, ОО «Межотраслевой союз развития
высокотехнологичного экспорта и импортозамещения»,
faleev.serge.paul@gmail.com

Аннотация. Стандарт России устанавливает понятие цифрового двойника изделия (ЦД). ЦД является интегрированной моделью уже построенного изделия, содержащей информацию о дефектах изделия и его техническом состоянии в процессе использования. Современные методы проектирования вырабатывают цифровые проекты (ЦПр) ещё не существующих изделий. С началом производства изделий на основе ЦПр возникают ЦД каждого экземпляра изделия. Продемонстрировано, как на основе одного ЦПр создаются ЦД многих изделий, которые могут принадлежать к разным типоразмерам одного проекта, и как на основе совокупности ЦПр и всех ЦД, актуализируемых в реальном масштабе времени, организуется система технической диагностики каждого экземпляра изделия.

Ключевые слова: цифровой двойник изделия, цифровой проект, техническая диагностика, системный анализ, цифровизация, жизненный цикл изделия, безопасность, повышение качества эксплуатации изделий.

Sergei P. Faleev,
Head of the Scientific and Technical Expertise Department,
Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor,
Acad. of the International Academy of Sciences on Information, Information
Processes and Technologies (IAS IPT)

**SYSTEM FOR TECHNICAL DIAGNOSTICS OF A PRODUCT BASED
ON A COMPARISON OF A DIGITAL PROJECT AND A DIGITAL
TWIN OF THE PRODUCT UPDATED IN REAL TIME**

NGO “Inter-Industry Union for the Development of High-Tech Export and
Import Substitution”, St. Petersburg, Russia,
faleev.serge.paul@gmail.com

Abstract. The Russian standard establishes the concept of a digital twin of a product (DT). The DT is an integrated model of an already constructed product, containing information about the defects of the product and its technical condition during use. Modern

design methods produce digital designs (DDP) for products that do not yet exist. With the beginning of the production of products based on the DDP, the DT arises for each instance of the product. It is demonstrated how, on the basis of one DDP of many products are created, which may belong to different standard sizes of one project, and how, based on the set of DDP and all DT, updated in real time, a system of technical diagnostics of each product instance is organized.

Keywords: product digital twin, digital project, technical diagnostics, system analysis, digitalization, product life cycle, safety, improving product operation quality.

Введение

Государственный стандарт России [1] устанавливает общее понятие цифрового двойника изделия (ЦД), а также общие положения и требования по разработке и применению ЦД изделий. К настоящему времени в РФ зарегистрировано 193 программы для ЭВМ для генерации ЦД и их применения в различных предметных областях [2] и десятки РИД по применению ЦД [2].

ЦД может быть интегрированной моделью уже построенного продукта, которая призвана содержать информацию обо всех дефектах изделия и регулярно обновляться в процессе физического использования изделия [3]. Представим завод со сложным оборудованием, поломки которого приносят миллионные убытки. Каждый сбой — простой в работе, трата времени и сил технических специалистов, сорванные сроки поставок. Выгоднее вовремя диагностировать проблемы со станками и проводить техническое обслуживание, не дожидаясь форс-мажорных обстоятельств [4]. Передовым видом технического обслуживания изделия является обслуживание по фактическому состоянию. Оно подразумевает устранение отказов оборудования путем интерактивной оценки технического состояния (технической диагностики) по совокупности данных, поступающих с датчиков и определения оптимальных сроков проведения ремонтных работ на основе регламентов, приведённых в ЦПр [5]. ЦД может быть разработан для одной детали, для целого завода или производственного процесса [6]. ЦД помогают принимать качественные решения на каждом этапе жизненного цикла [7]. ЦД помогают планировать распределение ресурсов, контролировать качество и прогнозировать риски [8].

Современные методы проектирования

– основываются на накопленных результатах практического опыта, на теориях, гипотезах и результатах системного анализа;

– цифровизованы за счет применения интегрированных в среды разработки пакетов прикладных программ, виртуализации предметной об-

ласти и автоматизации генерации проектной документации, ориентированной на роботизированные производства;

– быстрые, точные, вырабатывают адекватные цифровые проекты (ЦПр), содержащие многие гигабайты и терабайты графической, текстовой и др. информации [9].

Проектирование (в отличие от реинжиниринга) опережает практический опыт и даёт ЦПр ещё не существующих изделий. Зачастую проект выполняется для линейки однотипных изделий, отличающихся одним или несколькими параметрами (размер обуви; диаметр и длина гвоздя и т. п.), которые составляют размерный ряд (типоразмеры) однотипных изделий. С началом реализации каждого экземпляра изделия на основе ЦПр возникают ЦД каждого экземпляра изделия (см. рис 1).

До начала комплектации и изготовления первого изделия по ЦПр «покамест нет» ЦД [10]. На рисунке 1 показано, как из одного ЦПр, разработанного для двух типоразмеров изделий, с течением времени жизненного цикла (ЖЦ) каждого экземпляра изделия возникают ЦД каждого изделия и в них собирается измерительная информация.

1. Построение цифрового проекта

Для построения ЦПр [11] получают и запоминают 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 ресурсопределяющих 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 и техническому обслуживанию всего изделия, его комплектующих и материалов, планово-предупредительным ремонтам, 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.

ЦПр содержит правила определения остаточного ресурса изделия, зависимости от условий эксплуатации допустимых диапазонов измерения параметров, зависимости характеристик изделия от выходов измеримых параметров изделия из допустимых границ. ЦПр также определяет зависимости параметров изделия от конкретных выбранных для конкретного изделия материалов, комплектующих изделий, технологий производства и режимов эксплуатации для линейки однотипных изделий, отличающихся одним или несколькими параметрами.

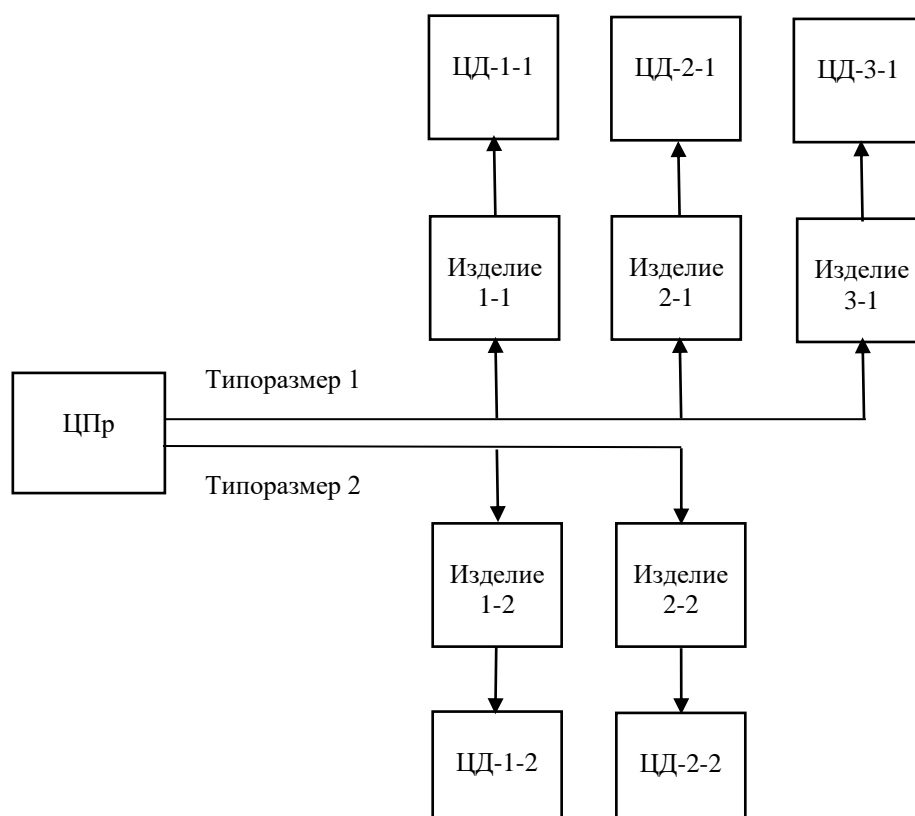


Рис. 1. ЦД изделий одного цифрового проекта: 3 изделия по первому типоразмеру, 2 изделия по второму типоразмеру

2. Построение цифрового двойника изделия

Как же формируются эти «персонализированные» ЦД?

При производстве изделия по имеющемуся ЦПр, с началом комплектации комплектующими, материалами и производства каждого экземпляра изделия заданного проекта (типоразмера), приступают к формированию ЦД изделия [11]: 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 эксплуа-

тантом изделия, получают и накапливают 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 эксплуатацию, 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. Согласно п. 3.24 государственного стандарта [1], ЦД это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями. При движении каждого экземпляра изделия по временной оси своего ЖЦ, его ЦД накапливает информацию о происходящем процессе комплектации, производства и эксплуатации изделия — происходит актуализация ЦД.

Нас окружают разнообразные изделия, может оказывать влияние на безопасность их техническое состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, значениями параметров, безопасные границы которых установлены технической документацией ЦПр. Техническое диагностирование предназначено для определения технического состояния объекта [12]. Результаты определения технического состояния требуются многим заинтересованным лицам, в т. ч. разработчикам, производителям, поставщикам и эксплуатантам изделий. Часто выясняется, что ЦПр не учитывает некоторые особенности, которые проявляются при движении изделия по своему ЖЦ, когда сила предвидения ЦПр проверяется практикой. Поэтому проектировщики, выполнившие ЦПр, особенно нуждаются в обратной связи, в результатах технической диагностики периодов полной исправности, ограниченной работоспособности в определенных условиях функционирования, остаточного ресурса функционирования, ремонтпригодности и аварийных ситуаций изделия.

3. Техническая диагностика изделия на основе сравнения ЦПр и актуализируемого в реальном масштабе времени ЦД изделия

Когда в распоряжении исследователя оказываются оба цифровых объекта — ЦПр и ЦД, образуется диагностическая модель — формализованное описание объекта, необходимое для решения задач диагностирования, которое может быть представлено в аналитической, табличной, векторной, графической и других формах [12]. На основе диагностической модели оказывается возможным в реальном масштабе времени определять важные свойства изделия — исправность, ограничения работоспособности, остаточный ресурс, ремонтпригодность изделия, приближение к аварийной ситуации на основе сведений, заложенных в ЦПр и собранных данных об изделии в ЦД.

На основе сравнения ЦПр заданного проекта (типоразмера) изделия и ЦД каждого экземпляра изделия, путем сравнения заданной и фактической информации о соответствии и/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 судят о полной исправности, режимах ограниченной работоспособности, остаточном ресурсе функционирования, ремонтпригодности изделия и на основе соответствующих принятых решений выдают информацию о полной исправности, режимах ограниченной работоспособности, остаточном ресурсе функционирования, о ремонтпригодности, о приближении к аварийной ситуации каждого изделия.

Собранная таким способом информация индицируется на индикаторе, запоминается и может направляться заинтересованным лицам — разработчикам, производителям, поставщикам и эксплуатантам, коммунальным службам, в МЧС в табличном виде или путём размещения у них индикаторов состояния всех диагностируемых изделий.

Сравнение эталонных свойств изделия, зафиксированных в ЦПр, и текущего состояния изделия, история которого в реальном масштабе времени фиксируется соответствующими датчиками и накапливается в ЦД, является задачей технической диагностики (ТД) по выработке оперативных оценок свойств изделия: исправности, ограничений работоспособности, остаточного ресурса функционирования, ремонтпригодности изделия и др.

4. Система технической диагностики совокупности изделий нескольких типоразмеров

По результатам накопления многих ЦД от серий изготовленных изделий в совокупности с созданным ранее ЦПр, рассматриваемых в качестве цифровых информационных моделей, могут ставиться задачи улучшения проекта методами системного анализа изделия и разработки его усовершенствованного варианта ЦПр+.

При этом цифровой проект ЦПр и совокупность цифровых двойников изделий ЦД по данному проекту также являются основой технической диагностики. Аналогичные действия по сбору данных ЦД и выработке на их основе решений технической диагностики можно выполнять также по другим проектам/типоразмерам изделий и каждому изготовленному изделию интересующих проектов/типоразмеров. Этими действиями можно изучать совокупные сведения о работе изделий в регионе или изделий выбранных проектов. Для выполнения технической диагностики совокупности изделий нескольких типоразмеров разработана структурная схема системы ТД (см. рис. 2).

На рисунке 2 обозначены: задатчик количества диагностируемых проектов/типоразмеров изделий (1); блоки связи с разработчиком (2), со службой комплектации (8), с изготовителем (10), с поставщиком (12), с эксплуатантом (14) и с индикаторами результатов технической диагностики всех изделий, обслуживаемых Системой технической диагностики на основе ЦПр и ЦД, актуализируемых в реальном масштабе времени (31); блоки хранения составляющих ЦПр (2–7); блоки накопления фактической информации о соответствии и/или отклонениях от заданных требований к параметрам в ЦПр (9, 11, 13, 15–17); блоки сравнения заданной и фактической информации о соответствии и/или отклонениях измеримых параметров изделия от заданных в ЦПр (18–22); блок текущей даты и точного времени (23); блоки принятия решений о результатах технической диагностики (24–28); индикаторы диагностической информации (29 — по изделию, 32 — всех изделий всех проектов/типоразмеров); регистраторы диагностической информации (30 по изделию, 33 — всех изделий всех проектов/типоразмеров); задатчик количества экземпляров изделий данного проекта/типоразмера (34). Z — количество потребителей информации ТД; R — количество диагностируемых проектов/типоразмеров изделий; Nr — количество диагностируемых изделий по проекту/типоразмеру с номером r ($1 \dots R$).

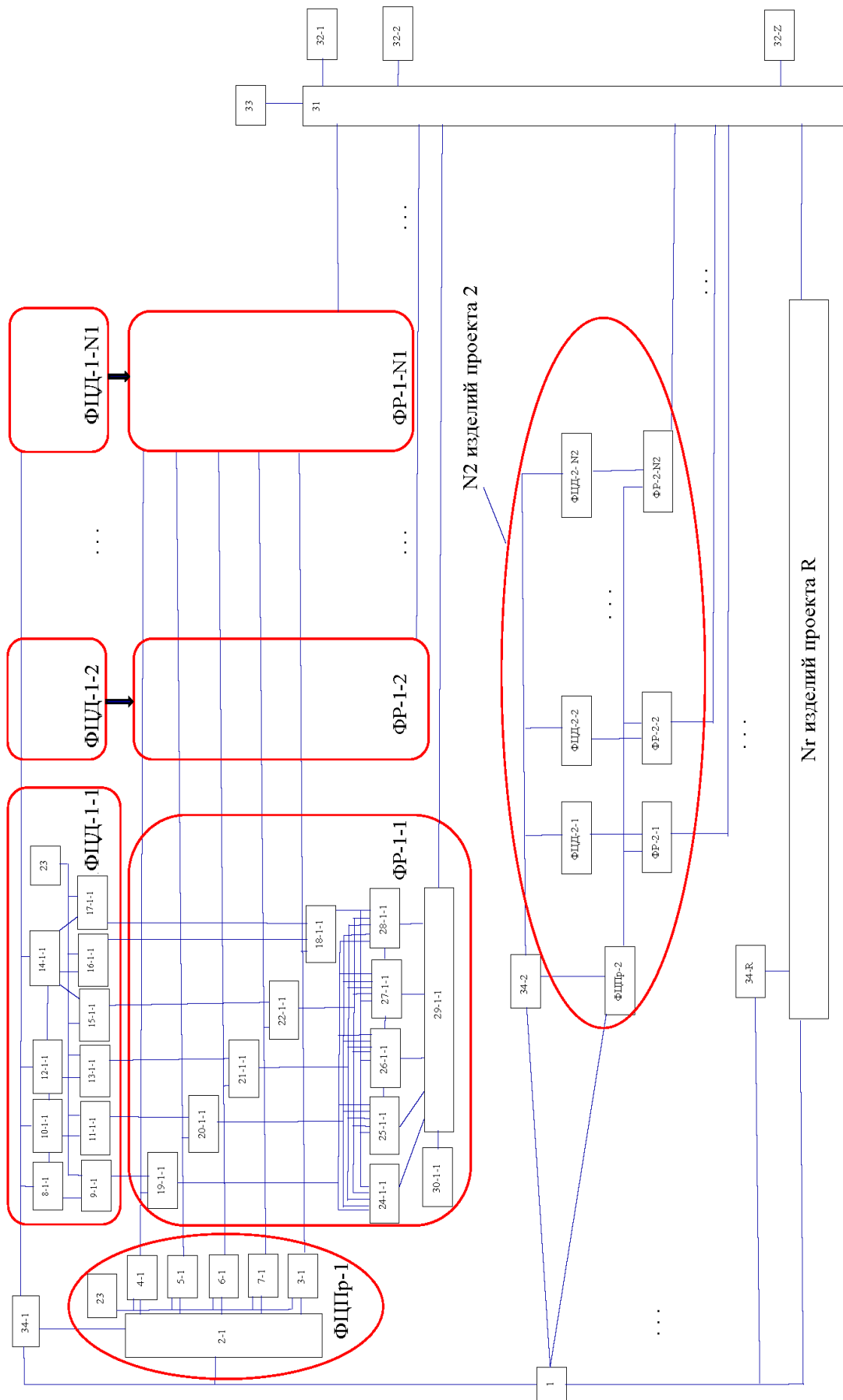


Рис. 2. Система технической диагностики на основе цифрового проекта и цифровых двойников, актуализируемых в реальном масштабе времени

Взаимосвязанные блоки 2–7 и 23 составляют Формирователь цифрового проекта/типоразмера (ФЦПр); ФЦПр-1 для изделий первого проекта/типоразмера. Взаимосвязанные блоки 8–17 и 23 составляют Формирователь цифрового двойника (ФЦД); ФЦД-1-1 обозначает Формирователь цифрового двойника 1 проекта для изделия с номером 1. Взаимосвязанные блоки 18–30 составляют Формирователь решений (ФР); ФР-1-1 обозначает Формирователь решений 1 проекта/типоразмера для изделия с номером 1. Последующие повторяющиеся группы взаимосвязанных блоков ФЦПр, ФЦД и ФР указаны с упрощенным обозначением тех же связей, что подробно нарисованы для ФЦПр-1, ФЦД-1-1 и ФР-1-1, и вместе с ними составляют канал для диагностики *N*1 изделий первого проекта; каналы для диагностики всех изделий второго проекта и последующих проектов, вплоть до номера проекта *R*, полностью аналогичны каналу для диагностики всех изделий первого проекта/типоразмера.

Система технической диагностики совокупности изделий нескольких проектов/типоразмеров осуществляет формирование цифровых проектов в формирователях ФЦПр и формирование цифровых двойников изделий в формирователях ФЦД [11]. Формирователь решений действует в соответствии с технической документацией на изделие и определяет, находятся ли значения параметров изделия, измеряемые в реальном масштабе времени, в допустимых пределах или нет. По заданной в ЦПр логике, осуществляется выработка решений о полной исправности, режимах ограниченной работоспособности в определенных условиях функционирования, остаточном ресурсе функционирования изделия, о ремонтпригодности изделия или о приближении к аварийной ситуации.

Заключение

Таким образом осуществляется своевременная техническая диагностика, повышающая качество эксплуатации изделий. Результаты можно соотнести с конкретным разработчиком для оценки его творческого потенциала, также направить специалистам по системному анализу для улучшения проектов изделий.

Список литературы

1. ГОСТ 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения [Электронный ресурс] (Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions). ОКС 01.140.01. Дата введения: 01.01.2022 [Электронный ресурс] // ФГБУ «РСТ». – URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=241313> (дата обращения: 10.11.2023).

2. Поисковая система ФИПС; запрос «цифровой двойник» // ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности». – URL: <https://www1.fips.ru/iiss/search.xhtml> (дата обращения: 10.11.2023).

3. Цифровой двойник (статья в энциклопедии) [Электронный ресурс] // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Цифровой_двойник (дата обращения: 10.11.2023).

4. Мокшина О. Цифровые двойники: как интернет вещей предотвращает аварии на производстве // VK Cloud. – 02 июня 2020. – URL: <https://cloud.vk.com/blog/cifrovye-dvojniki-internet-veshchej-predotvrashchaet-avarii> (дата обращения: 10.11.2023).

5. Цифровой двойник (статья) // АО «МЦД» – URL: [digitaltwin.ru](https://digitaltwin.ru/products/digital-twin/) <https://digitaltwin.ru/products/digital-twin/> (дата обращения: 10.11.2023).

6. Внедрение цифрового двойника: от проекта до запуска (статья) // сайт «Альфа-Интех» – URL: <https://www.alpha-intech.com/blog/ypravlenie-proizvodstvom/vnedrenie-tsifrovogo-dvojnika/> (дата обращения: 10.11.2023).

7. Димарцо Серугендо Дж., Каттинг-Десель А.-Ф., Гиз Л., Корменье Т., Хан И., Хоссенлоп Л. Цифровые двойники: от концепций до промышленной эксплуатации [Электронный ресурс] // Открытые системы. СУБД. – 2022. – № 04 (опубликовано 08.12.2022). – URL: <https://www.osp.ru/os/2022/04/13056597> (дата обращения: 10.11.2023).

8. О стандарте на «цифровые двойники». Электронное раздвоение – URL: <https://new.gostinfo.ru/InformationOfStandardization/Details/2803> (дата обращения: 10.11.2023).

9. Системный анализ (статья в энциклопедии) [Электронный ресурс] // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Системный_анализ (дата обращения: 10.11.2023).

10. Денис Фонвизин (сведения об авторе) // ЭКСМО. – URL: <https://eksmo.ru/authors/fonvizin-denis-ivanovich-ID15992/> (дата обращения: 10.11.2023).

11. Цифровой двойник изделия и цифровой след жизненного цикла изделия в качестве информационных моделей для системного анализа и технической диагностики // В сборнике научных трудов XXVI Международной научно-практической конференции «Системный анализ в проектировании и управлении», 13–14 октября 2022 г. В 3 ч. Ч. 2. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС; ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2023. – С. 47–57.

12. ГОСТ 20911-89. Группа Т00. Межгосударственный стандарт «Техническая диагностика. Термины и определения» (Technical diagnostics. Terms and definitions). МКС 01.040.19. 19.100. ОКСТУ 0090. Дата введения: 01.01.1991 [Электронный ресурс] // АО «Кодекс». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009481> (дата обращения: 10.11.2023).

13. 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.