

Некоторые вопросы использования цифровых двойников при создании информационных систем

А. А. Зацаринный, Ю. С. Ионенков

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

Аннотация. Статья посвящена вопросам использования цифровых двойников при создании информационных систем. Приведено определение цифрового двойника, представлены цели и задачи создания цифровых двойников, их типы, а также принципы создания. Рассмотрены применение цифровых двойников на различных стадиях жизненного цикла систем и направления их стандартизации. Отмечено, что использование цифровых двойников при создании отечественных информационных систем находится на начальной стадии. Сформулированы предложения по использованию цифровых двойников при создании отечественных информационных систем.

Ключевые слова: цифровой двойник; информационная система; целевые показатели; жизненный цикл; стандарты цифровых двойников.

DOI 10.14357/20718632220203

Введение

В настоящее время информация превратилась в один из наиболее важных ресурсов, а информационные системы (ИС) приобретают все большую значимость, особенно в условиях принятого курса на цифровую трансформацию общества. При этом ИС относятся к классу сложных систем с длительным сроком эксплуатации.

Разработка, производство и эксплуатация таких систем требуют значительных затрат. При этом особенно важной представляется разработка системных решений в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР). В этот период принимаются решения о принципах технической реализации и структуре системы, определяются стоимость и сроки ее создания, а также ожидаемая эффективность от ее внедрения. Цена ошибочных решений, принятых на этапах проектирования

очень велика, так как может привести к снижению технико-экономических показателей созданной системы.

Современные подходы к проектированию ИС с применением методов, использующих архитектурный подход, а также методов оценки уровня готовности проектов TRL/MRL/CRL, которые позволяют снизить издержки на этапе разработки, рассмотрены в публикациях [1, 2]. Наряду с этим, в настоящее время большое значение приобретает подход к проектированию ИС, основанный на применении так называемых «цифровых двойников» изделий.

Под цифровым двойником изделия понимается система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием и (или) его составными частями [3]. Цифровой двойник позволяет быстрее обнаруживать проблемы при разработке изделия, устранять их последствия и доводить изделие до серийного производства с меньшими затратами.

В данной статье представлены общие подходы к использованию цифровых двойников при создании систем различного назначения, в том числе информационных, а также сформулированы предложения по использованию цифровых двойников при создании ИС.

1. Общие подходы

Впервые концепцию цифрового двойника описал в 2011 году профессор Мичиганского университета Майкл Гривс [4]. Он выделил три основные части цифровых двойников:

- физический продукт в реальном пространстве;
- виртуальный продукт в виртуальном пространстве;
- данные и информация, которые объединяют виртуальный и физический продукт.

По мнению Гривса, «в идеальных условиях вся информация, которую можно получить от изделия, может быть получена от его цифрового двойника» [4].

Таким образом, цифровой двойник (Digital Twin) представляет собой цифровую (виртуальную) модель любых объектов, систем, процессов, воспроизводящую внутренние процессы, технические характеристики и поведение физического объекта в реальных условиях окружающей среды.

Целью создания цифрового двойника является обеспечение условий для разработки изделия в соответствии с тактико-техническими требованиями к нему, снижения себестоимости и сроков его разработки, повышения технологичности разработки, а также повышения надежности и эффективности его эксплуатации.

Задачи цифровых двойников [3]:

- оценка научной обоснованности, тактико-технической целесообразности и технической реализуемости изделия в различных условиях эксплуатации;
- возможность оценить принятые технические решения и их обоснованность на различных стадиях жизненного цикла;
- обеспечение функций управления требованиями, конфигурацией и эксплуатационно-техническими характеристиками изделия;
- снижение себестоимости и сроков разработки опытных образцов и испытаний изделия за счет проведения цифровых (виртуальных испытаний) в объеме, достаточном для подтверждения требований технического задания.

Основу цифрового двойника составляет гиперматрица требований / целевых показателей и ресурсных ограничений, которая формируется в ходе модельно-ориентированного системного программирования (Model-Based Systems Engineering, MBSE), представленного на Рис. 1 [5].

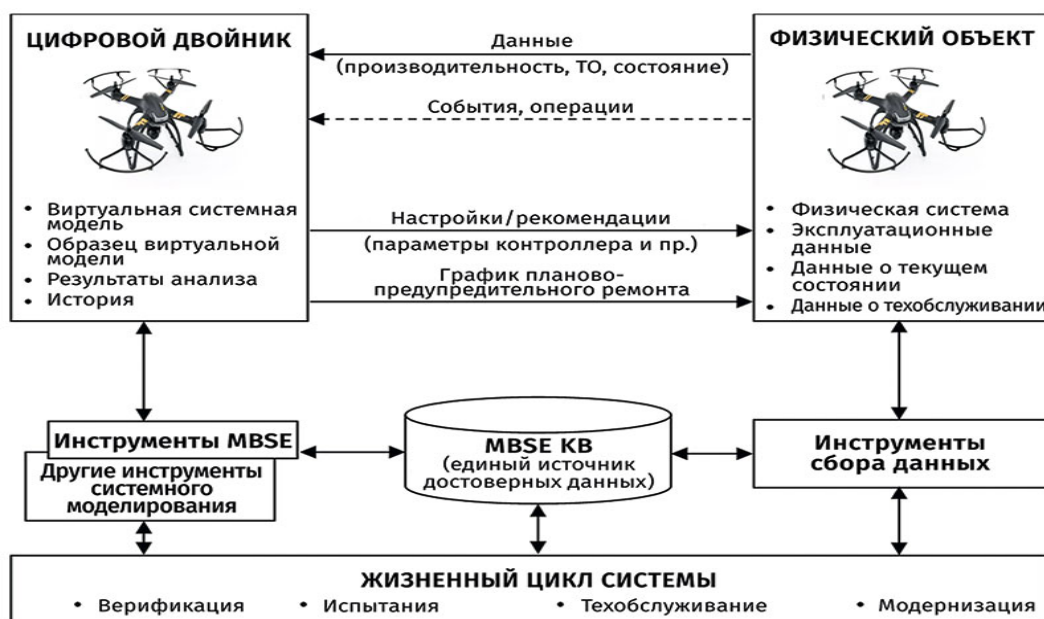


Рис. 1. Концепция цифрового двойника в структуре MBSE

Цифровой двойник связывает физический объект и виртуальную модель. Физический объект включает физическую систему, датчики, коммуникационные интерфейсы и другую технику. Информация об эксплуатации и обслуживании физической системы используется для обновления виртуальной модели цифрового двойника. По существу, при таком подходе, цифровой двойник становится точной и актуальной копией физической системы. Наличие постоянной связи цифрового двойника с физическим прототипом позволяет в динамике отслеживать производительность и данные о техническом обслуживании каждого физического аналога, выявлять и сообщать об отклонениях, а также планировать техническое обслуживание.

Для проектирования, производства и эксплуатации сложного технического объекта и формирования гиперматрицы требований / целевых показателей и ресурсных ограничений задаются сотни требований, которые декомпозируются на тысячи и десятки тысяч целевых показателей. В качестве ресурсных ограничений выступают временные, финансовые, технологические, производственные, эксплуатационные, экологические и другие. Пример гиперматрицы представлен на Рис. 2 [6].

Выделяют следующие типы цифровых двойников:

- прототип - представляет собой виртуальный аналог реального объекта, который содержит все данные для производства оригинала,

включая информацию со стадий проектирования и производства, например, требования к изделию, трехмерную модель объекта и т.д.;

- экземпляр - содержит данные обо всех характеристиках и эксплуатации физического объекта, включая трехмерную модель, и действует параллельно с оригиналом;

- агрегированный двойник - вычислительная система из цифровых двойников и реальных объектов, которыми можно управлять из единого центра.

Применение цифровых двойников на различных стадиях жизненного цикла изделия имеет особенности. Кратко их суть состоит в следующем.

На стадии эскизного проектирования с использованием цифрового двойника возможно создание вариантов модели разрабатываемого изделия для их оценки и выбора наилучшей. Далее на стадии технического проектирования полученная на предыдущем этапе модель может дорабатываться и уточняться посредством численного моделирования. Возможна интеграция встроенного программного обеспечения и многое другое.

На стадии испытаний технология цифровых двойников позволяет избежать разработчика от необходимости проводить продолжительные и дорогостоящие испытания в ходе реализации проектов за счет проведения виртуальных испытаний в объеме, необходимом для подтверждения требований технического задания.

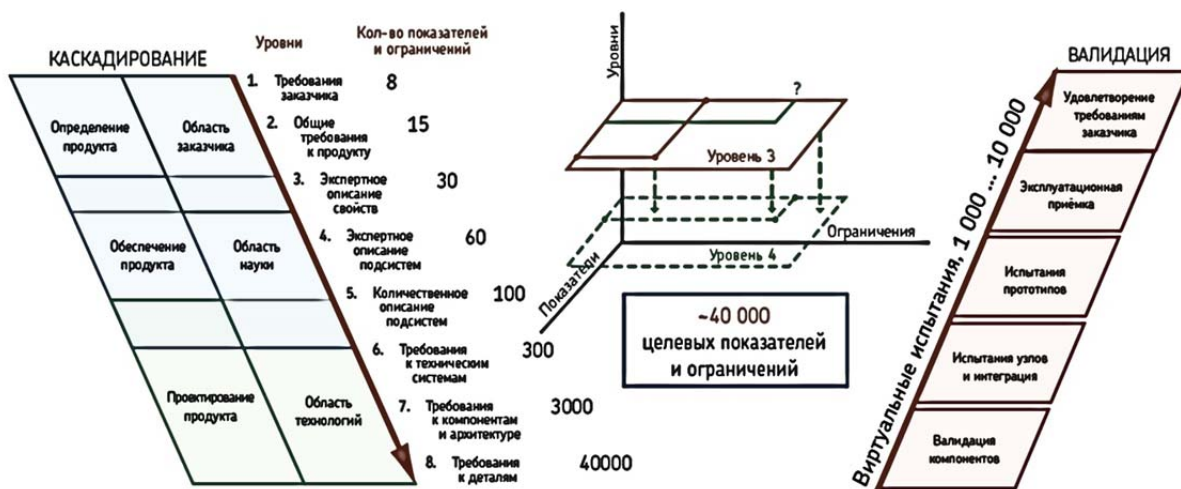


Рис. 2. Гиперматрица требований / целевых показателей и ресурсных ограничений проекта

На стадии производства разработанная модель (которая уже может называться цифровым двойником изделия) помогает в определении требуемых допусков, точностей изготовления для соблюдения характеристик и безотказной работы изделия в течение всего срока службы, а также позволяет быстро выявить причины неисправностей в процессе тестирования.

На стадии эксплуатации модель может быть доработана и использована для реализации обратной связи с разработкой и изготовлением изделий, диагностикой и прогнозированием неисправностей, повышением эффективности работы, выявления новых потребностей потребителя.

В настоящее время ведутся работы по стандартизации цифровых двойников. В частности, в середине сентября 2021 года Россия первая в мире утвердила стандарт в области цифровых двойников. Соответствующий документ, одобренный Росстандартом, и введенный в действие 1 января 2022 года, получил название ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [3]. Стандарт является первым в серии нормативных документов, которые определяют терминологию в области цифровых двойников и цифровых моделей, порядок разработки цифровых двойников, типовые требования к порядку их сопровождения при эксплуатации изделия, порядку учета, хранения и т.п.

Отметим, что концепция цифровых двойников является составной частью еще одного направления цифровой трансформации: цифровой двойник является элементом цифрового предприятия.

Цифровое предприятие (Digital Enterprise) – организация, которая использует информационные технологии во всех сферах своей деятельности: производстве, бизнес-процессах, маркетинге и т.д. [7]. Цифровое предприятие предусматривает цифровизацию процессов в рамках всего предприятия, начиная от разработки продуктов и закупок и заканчивая производством, логистикой и обслуживанием в процессе эксплуатации. Все это делается на базе соответствующей цифровой платформы, представляющей совокупность цифровых данных, моделей (логики, алгоритмов) и инструментов

(методов, средств), информационно и технологически интегрированных в единую функциональную систему, предназначенную для квалифицированного управления целевой предметной областью с организацией взаимодействия заинтересованных субъектов. Это суть любого цифрового предприятия, в которой как минимум присутствует цифровой двойник выпускаемого продукта и цифровой двойник непосредственно предприятия.

Цифровые двойники в настоящее время широко используются в промышленности, строительстве, транспорте, медицине, образовании, IT – инфраструктуре. Мировой рынок цифровых двойников оценен в \$3,1 млрд по итогам 2020 года, а к 2026-му, как ожидается, он вырастет до \$48,2 млрд [8]. По прогнозам аналитиков, расходы на проекты цифровых двойников будут увеличиваться в среднем на 58% в год. Прогнозируется, что 250 российских предприятий перейдут на технологии цифровых двойников к 2024 году [8].

Используя цифровых двойников, компании могут создавать копии своих изделий и предприятий, выявлять «узкие места» (в компонентах, системах, процессах и других активах), тестировать потенциальные решения, моделировать результаты взаимодействий между компонентами и прогнозировать изменения, которые могут возникнуть при выполнении операций. Это позволяет экономить организации время, ресурсы и деньги, необходимые для проверки рабочих гипотез на практике.

Наиболее эффективным считается применение цифровых двойников продукции со следующими критериями [8]:

- сопровождение продукции квалифицированным специализированным сервисом (контроль состояния, мониторинг, техническое сопровождение);
- длительный жизненный цикл изделия (5 и более лет);
- большое количество экземпляров установленного оборудования;
- широкий диапазон и многообразие условий эксплуатации;
- труднодоступность изделия для проведения обслуживания.

2. Предложения по использованию цифровых двойников при создании ИС

Цифровые двойники нашли свое применение в самых разных областях. В области ИС цифровые двойники находят применение при разработке их отдельных элементов (например, систем коммутации и т.п.), в банковских информационных системах, а также при создании промышленного «Интернета вещей».

Вместе с тем, следует отметить, что при проектировании отечественных ИС использование цифровых двойников находится на начальной стадии. Анализ опыта разработки отечественных ИС, а также научно-технической литературы показывают, что применение цифровых двойников связано с рядом проблем.

ИС являются очень сложными, как правило, многоуровневыми объектами, представляющими собой взаимосвязанную совокупность структурных подсистем (привязанных к объектам системы управления) и функциональных подсистем (мониторинга, анализа, хранения, передачи и защиты информации, поддержки принятия решений и т. п.). Поэтому первостепенной проблемой является обоснование методологических принципов создания ИС на основе системного подхода, который предполагает все виды моделирования: аналитическое, имитационное, натурное и комплексное. Цифровой двойник ИС является, по существу, развитием комплексного моделирования. Методы комплексного моделирования предполагают гибкое использование аналитического, имитационного и натурального моделирования на различных стадиях создания ИС [9]. На ранних стадиях основными являются методы аналитического моделирования. На стадиях эскизного и технического и проектирования методы аналитического моделирования должны дополняться методами имитационного моделирования компонентов ИС. На стадиях изготовления опытного образца и проведения предварительных испытаний преобладают методы натурального моделирования, дополняемые имитационным моделированием. На стадиях государственных (приемочных) испытаний основным является метод натурального моделирования. При этом, результаты аналитического

и имитационного моделирования позволяют обосновывать состав опытного участка, а также продолжительность испытаний при оценке тех или иных характеристик ИС, возможность учета результатов предварительных испытаний и др. В рамках эксплуатации ИС важную роль играют все виды моделей.

Еще одна проблема - применение нормативной базы. В имеющихся стандартах классов 34 и 15, регламентирующих создание ИС, отсутствуют такие понятия как «электронная модель», «цифровой двойник», «электронная рабочая документация», что обуславливает большие трудности при внедрении этих и ряда других перспективных технологий. Исходя из этого, одним из направлений совершенствования нормативной базы следует считать корректировку действующих стандартов в области разработки ИС с целью учета новых подходов к проектированию информационных систем. Другим направлением совершенствования нормативной базы является разработка стандартов, определяющих порядок создания цифровых двойников для ИС, включая методологию и дальнейшее применение.

Третьей проблемой является обеспечение информационной безопасности при внедрении цифровых двойников. Для них появляются угрозы, выходящие за рамки классических требований по конфиденциальности, целостности и доступности, в частности – угроза несоответствия цифровой модели [10]. При этом, требования по защите цифровых двойников отсутствуют. Таким образом, разработка требований по информационной безопасности к цифровым двойникам и стандартов в этой области является актуальной научной и практической задачей.

Четвертой проблемой является нехватка высококвалифицированных специалистов в области применения цифровых двойников [10]. Эта проблема приобретает особое значение в свете последних событий в стране. Следует отметить, что при реализации проектов с использованием цифровых двойников важную роль играет и наличие подготовленной команды. Она не должна состоять из специалистов одной области. Поскольку это новая сфера, возникает много смежных вопросов, которые решаются только коллективно. Исходя из сказанного, в команде должны быть специалисты в области

цифровых технологий, проектировщики, специалисты в области математического моделирования, программисты и др. В этом плане особое значение приобретают подбор и обучение специалистов в соответствующих областях.

В качестве причины, тормозящей развитие рынка цифровых двойников, следует назвать также относительно высокую стоимость проектов данного типа, требующих привлечения многопрофильного программного обеспечения, наработки экспертизы в математическом моделировании широкого спектра физических процессов, определяющих их технологическую и производственную сложность [11], что предполагает необходимость поиска архитектурных, программных и других решений, обеспечивающих снижение стоимости проектов.

Испытания с применением цифровых двойников должны проводиться на цифровых (виртуальных) стендах. В соответствии с [3], цифровой (виртуальный) испытательный стенд – система, состоящая из технических средств, программного, методического и организационного обеспечения и квалифицированного персонала, предназначенная для проведения стендовых испытаний как результата исследования цифрового двойника объекта испытаний. Отработка предлагаемых решений на стенде особенно важна для сложных территориально распределенных ИС, а также для ИС, создаваемых впервые (не имеющих аналогов). Стенд позволяет снизить риски заказчика при принятии решения о реализации предлагаемых исполнителем технических решений непосредственно на объектах на основе их предварительной и экспериментальной проверки в условиях стенда.

Заключение

Технология цифровых двойников позволит избавить производителя от необходимости проводить продолжительные испытания в ходе реализации проектов, быстро изменять проектные решения под изменяющиеся требования, минимизировать число расчетных ошибок (в том числе, связанных с человеческим фактором), уменьшить сроки разработки опытных образцов при соблюдении требований к технологическим, эксплуатационным и другим показателям изделий.

Эта технология охватывает все стадии жизненного цикла изделия: от стадий НИОКР и производства до стадий эксплуатации и утилизации. Цифровой двойник изменяется в процессе эксплуатации. Этот процесс сопровождается пополнением базы данных и базы решений. Наибольший эффект от внедрения данной технологии возможен на стадии разработки, где закладываются ключевые преимущества, обеспечивающие конкурентоспособность изделия.

В статье рассмотрены основные аспекты данной технологии, в том числе цели и задачи создания цифровых двойников, а также принципы их создания. Отмечены особенности применения цифровых двойников на различных стадиях жизненного цикла систем и направления их стандартизации. Отмечены основные проблемы использования цифровых двойников при создании отечественных ИС и сформулированы предложения по их решению.

Литература

1. А.А. Зацаринный, Ю.С. Ионенков. Некоторые вопросы оценки внутреннего качества информационных систем // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 1. С. 63–72.
2. А.А. Зацаринный, Ю.С. Ионенков. Некоторые методические вопросы оценки уровня технологической готовности проектов информационных систем // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 3. (в печати).
3. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2021. 15 с.
4. Grieves, M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication; White Paper; Michael Grieves, LLC, 2014.
5. Цифровой двойник: концепция, уровни, связь с Интернетом вещей и роль численного и системного моделирования. <https://sapr.ru/article/26079>.
6. Новая парадигма. Цифровые двойники – стратегия инновационного прорыва в ОПК. <https://dfnc.ru/arhiv-zhurnalov/2020-4-63/novaya-paradigma-tsifrovye-dvojniki-strategiya-innovatsionnogo-proryva-v-opk/>.
7. Что такое цифровое предприятие и как им стать? <https://www.tadviser.ru/index.php/> Статья: Цифровое предприятие_Digital_Enterprise.
8. Цифровой двойник. [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_\(Digital_Twin_of_Organization,_DTO\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_(Digital_Twin_of_Organization,_DTO)).
9. Антонов С.В., Зацаринный А.А., Печинкин А.В., Соколов И.А., Шоргин С.Я. Модели функционирования информационно-телекоммуникационных систем (подраздел 3.3) // Методическое руководство по оценке качества функционирования информационных систем

- (в контексте стандарта ГОСТ РВ 51987-2002 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Требования и показатели качества функционирования информационных систем. Общие положения»). – М.: 3 ЦНИИ МО РФ, 2003. – С. 157-215.
10. Старожук Е.А., Яковлева М.В. Анализ основных рисков снижения эффективности деятельности промышленных предприятий при внедрении цифровых двойников в автоматизированную систему управления жизненным циклом продукции // Вопросы инновационной экономики. – 2020. – Том 10. – № 3. – С. 1381-1392.
11. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.

Зацаринный Александр Алексеевич. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия. Главный научный сотрудник, доктор технических наук, профессор. Количество печатных работ: 450 (в т.ч. 10 монографий). Область научных интересов: интегрированные информационно-телекоммуникационные системы и сети, цифровая трансформация общества. E-mail: AZatsarinny@ipiran.ru

Ионенков Юрий Сергеевич. Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия. Старший научный сотрудник, кандидат технических наук. Количество печатных работ: 120 (в т.ч. 2 монографии). Область научных интересов: Информационно-телекоммуникационные системы и сети. Оценка эффективности информационных систем. E-mail: UIonenkov@ipiran.ru

Some Issues of Using Digital Twins in the Creation of Information Systems

A. A. Zatsarinnyy, Yu. S. Ionenkov

Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia

Abstract. The article is devoted to the use of digital twins in the creation of information systems. The definition of a digital double is given, the goals and objectives of creating digital doubles, their types, as well as the principles of creation are presented. The goals and objectives of creating digital twins, their types, as well as the principles of creation are presented. The application of digital twins at various stages of the life cycle of systems and the directions of their standardization are considered. It is noted that the use of digital doubles in the creation of domestic information systems is at an early stage. The proposals on the use of digital doubles in the creation of domestic information systems are formulated.

Keywords: digital twin; information system; targets; life cycle; standards of digital twins.

DOI 10.14357/20718632220203

References

- Zatsarinnyy, A. A., and Yu. S. Ionenkov. 2022. Nekotorye voprosy ocenki vnutrennego kachestva informacionnyh sistem [Some issues of internal quality assessment of information systems]. *Sistemy i sredstva informatiki* [Systems and Means of Informatics] 32 (1):63-72.
- Zatsarinnyy, A. A., and Yu. S. Ionenkov. 2022. Nekotorye metodicheskie voprosy ocenki urovnya tekhnologicheskoy gotovnosti proektov informacionnyh sistem [Some methodological issues of assessing the level of technological readiness of information systems projects]. *Sistemy i sredstva informatiki* [Systems and Means of Informatics] 32 (3) – in press.
- GOST R 57700.37-2021. 2021. Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Cifrovye dvojniki izdelij. Obshchie polozheniya [Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions]. Moscow: Standartinform Pubs. 15 p.
- Grieves, M. 2014. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication; White Paper; Michael Grieves, LLC.
- Cifrovoj dvojniki: koncepciya, urovni, svyaz' s Internetom veshchej i rol' chislennogo i sistemnogo modelirovaniya [Digital twin: concept, levels, connection to the Internet of Things and the role of numerical and system modeling]. Available at: <https://sapr.ru/article/26079> (accessed March 15, 2022).
- Cifrovye dvojniki – strategiya innovacionnogo proryva v OPK [A new paradigm. Digital twins - an innovative breakthrough strategy in the defense industry]. Available at: <https://dfnc.ru/arhiv-zhurnalov/2020-4-63/novaya-paradigma-tsifrovye-dvojniki-strategiya-innovatsionnogo-proryva-v-opk/> (accessed March 15, 2022).

7. Chto takoe cifrovoe predpriyatie i kak im stat'? [What is a digital enterprise and how to become one?]. Available at: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровое предприятие_Digital_Enterprise](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровое_предприятие_Digital_Enterprise) (accessed March 15, 2022).
8. Cifrovoj dvojn timer [Digital twin]. Available at: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой двойник_\(Digital_Twin_of_Organization,_DTO\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_(Digital_Twin_of_Organization,_DTO)) (accessed March 15, 2022).
9. Antonov, S.V., A.A. Zatsarinnyy, A.V. Pechinkin, I.A. Sokolov, and S.Ya. Shorgin. 2003. Modeli funktsionirovaniya informatsionno-telekommunikatsionnykh system (podrazdel 3.3). Metodicheskoe rukovodstvo po ocenke kachestva funktsionirovaniya informatsionnykh sistem (v kontekste standarta GOST RV 51987 «Informatsionnaya tekhnologiya. Kompleks standartov na avtomatizirovannye sistemy. Trebovaniya i pokazateli kachestva funktsionirovaniya informatsionnykh sistem. Obshchie polozheniya») [Models of functioning of information and telecommunication systems (subsection 3.3). Methodological guidelines for assessing the quality of the functioning of information systems (in the context of the standard GOST RV 51987 «Information technology. A set of standards for automated systems. Requirements and indicators of the quality of the functioning of information systems. General provisions»)]. Moscow: 3 TsNII MO RF. 352 p.
10. Starozhuk, E.A., and M.V. Yakovleva. 2020. Analiz osnovnykh riskov snizheniya effektivnosti deyatel'nosti promyshlennykh predpriyatij pri vnedrenii cifrovyyh dvojn timerov v avtomatizirovannuyu sistemu upravleniya zhiznennym tsiklom produktsii [Analysis of the main risks of reducing the efficiency of industrial enterprises when introducing digital twins into an automated product lifecycle management system]. Voprosy innovatsionnoy ekonomiki [Issues of innovative economy] 10(3): 1381-1392.
11. Prokhorov, A., and M. Lysachev. 2020. Cifrovoj dvojn timer. Analiz, trendy, mirovoj opyt [Digital twin. Analysis, trends, world experience]. Moscow: Alliansprint. 401 p.

Zatsarinny A. A. Doctor of Science in technology, professor, principal scientist, Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Science, 44/2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russia. E-mail: AZatsarinny@ipiran.ru

Ionenkov Yu. S. Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Science, 44/2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russia. E-mail: UIonenkov@ipiran.ru