

УДК 004.896

## АРХИТЕКТУРА СТРУКТУРЫ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИТ-ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО, МНОГОВАРИАНТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Г. Г. Куликов<sup>1</sup>, А. Ю. Сапожников<sup>2</sup>, А. А. Кузнецов<sup>3</sup>, А. С. Маврина<sup>4</sup>

<sup>1</sup>gennadyg\_98@yahoo.com, <sup>2</sup>axl\_mail\_box@mail.ru, <sup>3</sup>kuznecovopkr@gmail.com, <sup>4</sup>nytko\_008@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 24.03.2021

**Аннотация.** Предложено использование разработанной системной модели цифрового двойника отраслевой ИТ-платформы при предметно-ориентированном взаимодействии вуза, ОКБ, серийного завода при разработке наукоемких изделий машиностроительной отрасли. В настоящее время проекты по созданию наукоемких изделий реализуются в кооперации по сетевому принципу, включая вузы. Системная модель позволяет формализовать реальные и виртуальные объекты предметной области и их взаимодействия на базе создания цифрового двойника отраслевой ИТ-платформы. Это также обусловлено появлением новых ИТ-технологий в рамках стратегии INDUSTRY 4.0.

**Ключевые слова:** отраслевая ИТ-платформа; цифровой двойник корпоративной информационной системы; TOGAF; образовательная среда; производственная среда; распределенное взаимодействие при проектировании.

### ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] отмечено, что модель цифровой организации и взаимодействия вуз, ОКБ для разработки наукоемких изделий машиностроительной отрасли невозможна без применения цифрового двойника отраслевой ИТ-платформы. Его построение целесообразно реализовать на основе методологии TOGAF [4], описывающую архитектуру предприятия, предполагающую ее разработку, планирование и внедрение ИТ-архитектуры. На рис. 1 представлена возможная архитектура предприятия машиностроительной области согласно TOGAF.

Цифровой двойник (ЦД) строится как предметно-ориентированное слабо-структурированное информационное пространство с правилами исчисления, отвечающими тео-

рии категории множеств, обеспечивающее поддержку жизненного цикла продукции выпускаемой отраслью. Реализуется данная платформа с использованием различных классов информационных систем, получивших наиболее широкое распространение в отраслях, необходимых в условиях перехода к INDUSTRY 4.0 [3].

Цифровой (информационный) двойник КИС, как адекватное отображение объектов и их связей по правилам теории категорий в исследуемой предметно-ориентированной области, в соответствии с принципом двойственности, отражает формализованное представление реальных и виртуальных объектов предметной области и связи между ними.

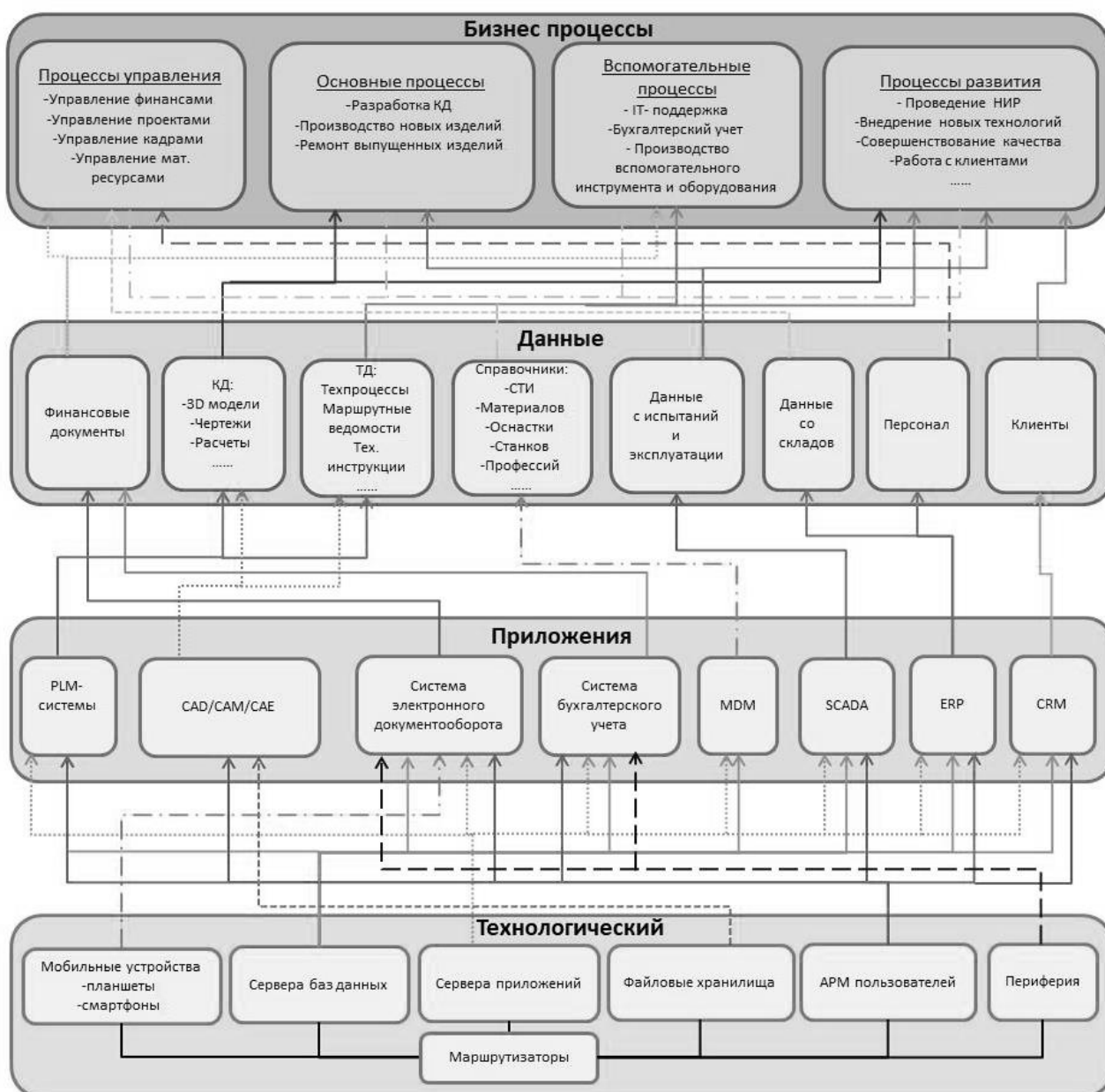


Рис. 1. Архитектура предприятия машиностроительной отрасли

### ОТРАЖЕНИЕ ДУАЛЬНОСТИ В КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЦД КИС

В соответствии с принципом дуальности реальные объекты производственной среды выступают как виртуальные по отношению к образовательной среде. В структуре ЦД КИС реальные объекты предприятия трансформируются, преобразуются в объекты учебного процесса (рис. 2).

Например, процесс разработки изделия, являющийся основным для предприятия, включает в себя бизнес-процессы различных этапов его ЖЦ, которые реализуются специалистами различных подразделений, формирующими данные об изделии, руководствуясь НТД и стандартами предприятия.

Перечисленные реальные компоненты выступают в качестве виртуальных объектов в образовательной среде (рис. 2).

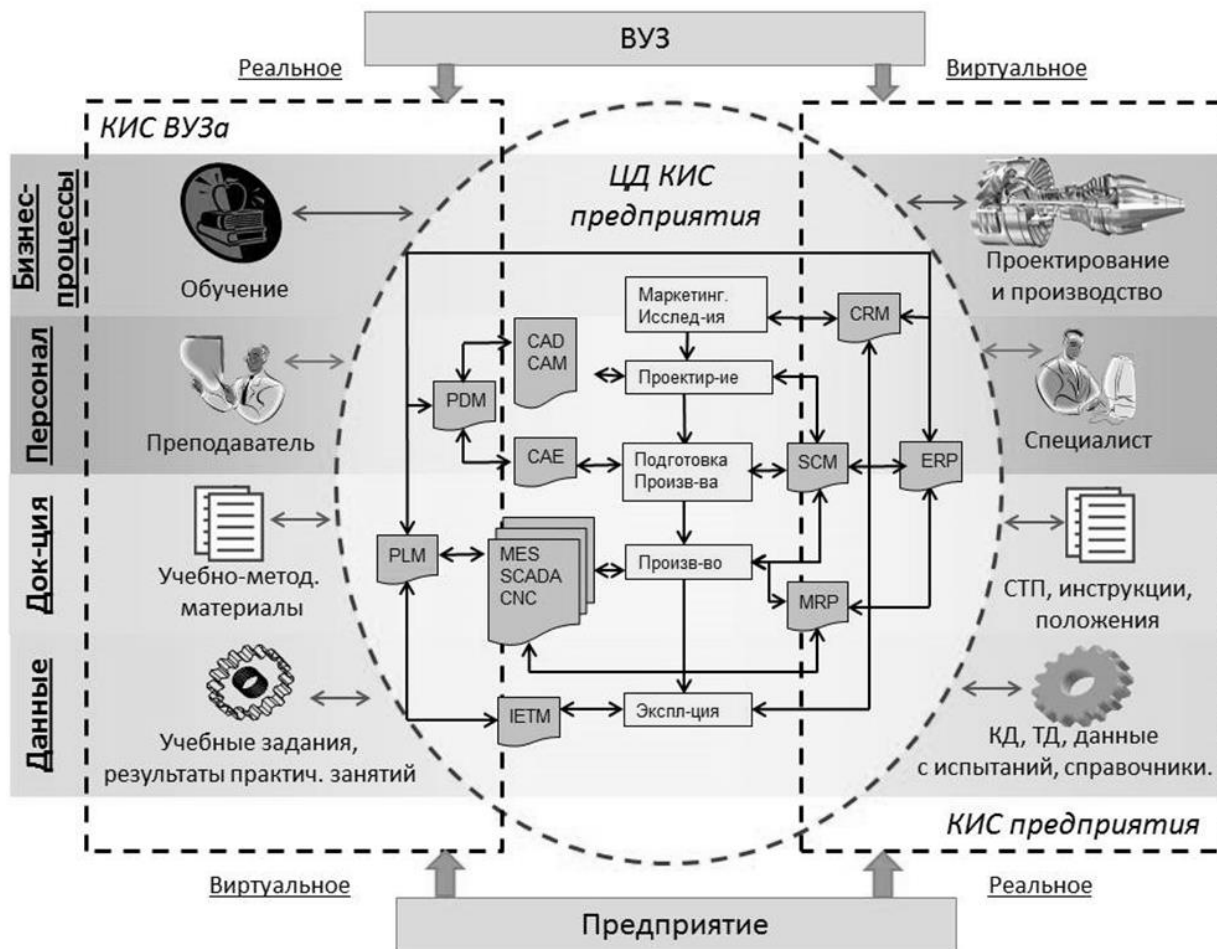


Рис. 2. Отражение дуальности в концептуальной модели ЦД КИС

С точки зрения образовательной среды и внутреннего содержания двойника КИС в университете могут проводиться:

- 1) обучение на выпускающих и базовых кафедрах;
- 2) совместные НИР;
- 3) отработка новых подходов к архитектуре предприятий и организации бизнес-процессов, которые затем будут внедрены в производство.

Цифровой двойник КИС становится «песочницей», содержащей конкретные технологии, в которой с привлечением научного потенциала появляются новые решения.

Но главное преимущество использования ЦД КИС прослеживается в распределенной работе над проектом при создании сложных наукоемких изделий. При этом очевидна консолидирующая роль базовых кафедр, созданных в опорных университетах.

#### ПРИМЕР РАСПРЕДЕЛЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦД КИС

Любой наукоемкий проект можно рассматривать как совокупность задач  $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$ , каждая из которых требует определенных компетенций от участников проекта. В каждом проекте назначается головной разработчик, который распределяет задачи на основе имеющихся компетенций между собой, опорным вузом и кооперантами из отрасли.

На рис. 3 показано, что задачи  $Z_3, Z_8$  распределяются для реализации на Предприятии 2, а задачи  $Z_2, Z_4, Z_6, Z_7, Z_9, Z_{10}$  направляются на базовые кафедры опорного вуза 1. При этом каждая из базовых кафедр курирует решение поставленных задач совместно с выпускающими кафедрами в зависимости от специфики задачи (проектирование, технологическая подготовка, информационные технологии и т.д.).

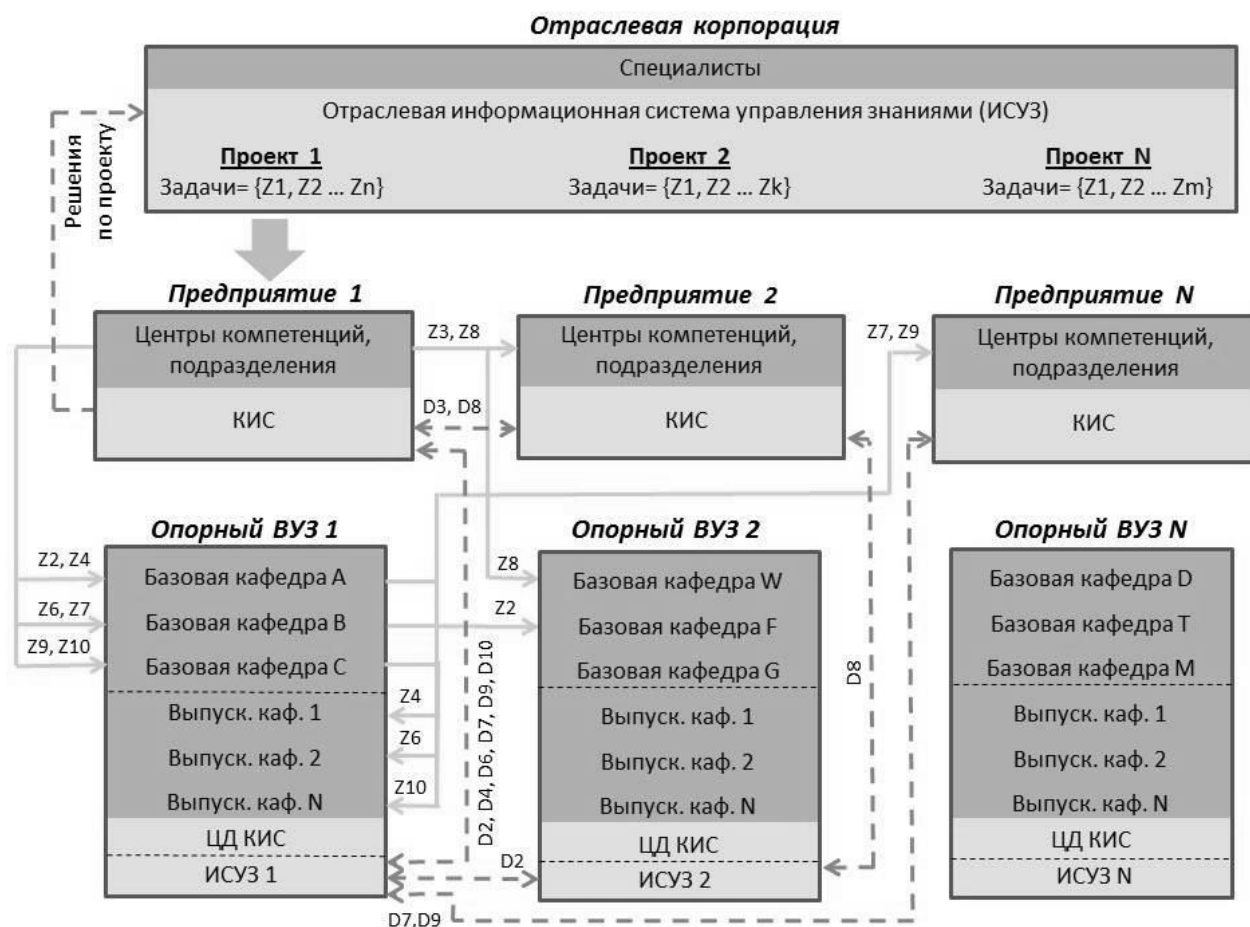


Рис. 3. Схема распределенного взаимодействия с использованием ЦД КИС

При этом базовые кафедры опорного вуза 1 могут взаимодействовать с базовыми кафедрами других вузов, а также с другими предприятиями. Такое взаимодействие становится возможно, благодаря использованию унифицированного в отрасли цифрового двойника корпоративной информационной системы. Имея в своем составе встроенные технологии обмена данными, происходит передача исходной информации и результатов работы (D2, D3, D4, D6–D10) между кооперантами и головным разработчиком.

Частные решения по конкретным задачам (например, Z2, Z8) сохраняются в локальных системах управления знаниями (ИСУЗ) опорных вузов.

Такой подход позволяет аккумулировать результаты проекта у головного разработ-

чика с последующей передачей в отраслевую ИСУЗ. Доступ к информации, накопленной в отраслевой ИСУЗ, осуществляется в университетах через специалистов базовых кафедр, назначаемых из состава Предприятий.

Также на рис. 3 прослеживается необходимость организовать в перспективе единую информационную систему управления знаниями между вузами, что создаст синергетический эффект в области научных разработок.

На рис. 4 показана дальнейшая, детализированная схема взаимодействия с использованием ЦД КИС с точки зрения опорного вуза, участие технопарка, отмечено использование ЦД КИС центром дополнительного образования университета.



Рис. 4. Схема взаимодействия участников образовательно-производственной среды

На рис. 4 также показано, что построение ИТ-инфраструктуры ЦД КИС невозможно без применения облачных технологий, на которые сегодня ориентировано большинство программных продуктов, используемых в крупных корпорациях, а также являющихся одним из компонентов INDUSTRY 4.0.

Таким образом, предложенная архитектура структуры цифрового двойника интегрированной ИТ-платформы для распределенного, многовариантного проектирования объектов машиностроения основана на адекватном отображении реальных и виртуальных объектов и их связей в исследуемой предметно-ориентированной области. В соответствии с принципом двойственности, в ней в явной форме представлены и прослеживаются структура объектов среды проектирования и структура внутреннего содержания объектов проектирования, что соответствует принципам теории категорий. Комплексный анализ приведенных работ [1–19] показывает, что совокупность моделей объектов предметной области (объектов машиностроения) и методы их исследования целесообразно интегрировать в форме ЦД КИС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование цифрового двойника отраслевой ИТ-платформы в составе КИС вуза предполагает в своем составе единые стандарты на представление данных, их хранение и обмен, наличие системы управления знаниями, использование облачных технологий. Такая организация позволит повысить эффективность комплексного взаимодействия вуза и предприятия на различных этапах ЖЦ изделия, приведет к технологическому развитию реальных секторов экономики и обеспечит рост научного потенциала современной российской науки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов Г. Г., Сапожников А. Ю., Кузнецов А. А. Информационно-технологическая модель прикладной цифровой платформы базовой кафедры в наукоемких отраслях промышленности // Управление экономикой: методы, модели, технологии: материалы XIX Международной научной конференции. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: РИК УГАТУ, 2019. С. 282–285. [ G. G. Kulikov, A. Yu. Sapozhnikov, A. A. Kuznetsov, "Information and technological model of the applied digital platform of the base department in high technology industries", in *Economic management: methods, models, technologies: materials of the XIX International scientific conference*, pp. 282-285, 2019. ]
2. **Методология** проектирования системных моделей рабочих процессов с применением предметно-ориентиро-

ванных метаязыков / Г. Г. Куликов [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 2. С. 45–55. [ G. G. Kulikov, et al., "Design methodology system models of workflows using subject-oriented metalanguages", (in Russian), in *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radio-elektronika"*, vol. 20, no. 2, pp. 45-55, 2020. ]

3. **Липкин Е.** ИНДУСТРИЯ 4.0: Умные технологии – ключевой элемент в промышленной конкуренции М.: ООО «Остек-СМТ», 2017. 224 с. [ E. Lipkin, *Industry 4.0: Smart technologies are a key element in industrial competition*, (in Russian). Moscow: ООО "Ostek-SMT", 2017. ]

4. **Темненко В.** Быть или не быть TOGAF: распространение архитектуры предприятия за границы RUP. [Электронный ресурс]. URL: <http://ibm.com/developerworks/ru/library/r-temnenko> (дата обращения 15.03.2021). [ V. Temnenko (2021, Mar. 15), "To be or not to be TOGAF: the extension of enterprise architecture beyond the boundaries of RUP" [Online], (in Russian). Available: <http://ibm.com/developerworks/ru/library/r-temnenko> ]

5. **Архитектура КИС.** Виртуальная платформа. Развертывание (инсталляция) PLM-системы: лабораторный практикум по дисциплине «Корпоративные информационные системы» / А. Ю. Сапожников [и др.]. Уфа: РИК УГАТУ, 2019. 96 с. [ A. Yu. Sapozhnikov, et al., *KIS architecture. Virtual platform. Deployment (installation) of PLM systems: laboratory practice in the discipline "Corporate Information Systems"*, (in Russian). Ufa: RIK, 2019. ]

6. **Kuznecov A. A., Mavrina A. S., Sapozhnikov A. Yu.** Example of PLM-system adoption at PJSC "UEC-UMPO" in the network of interaction on the project PD-14 // International scientific journal "Industry 4.0". 2018. Vol. 3, Iss. 5. Pp. 259-261. [ A. A. Kuznecov, A. S. Mavrina, A. Yu. Sapozhnikov, "Example of PLM-system adoption at PJSC "UEC-UMPO" in the network of interaction on the project PD-14", in *International scientific journal "Industry 4.0"*, vol. 3, Iss. 5, pp. 259-261, 2018. ]

7. **Организация** виртуальной информационной площадки «Машиностроительное предприятие – технический университет» на примере автоматизации процесса подготовки молодых специалистов / Г. Г. Куликов [и др.] // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: РИК УГАТУ, 2019. С. 434–440. [ G. G. Kulikov, et al., "Organization of virtual information area "Machine-building enterprise - technical university" on the example of automation of the process of preparing young specialists", (in Russian), in *Machine tool building and innovative machine building. Problems and points of growth: materials of the All-Russian scientific and practical conference*, pp. 434-440, 2019. ]

8. **Цифровые двойники** и цифровая трансформация предприятий ОПК / А. И. Боровков [и др.] // Вестник Восточно-Сибирской открытой академии. 2019. № 32. С. 1–39. [ A. I. Borovkov, et al., "Digital twins and digital transformation of defense industry enterprises", (in Russian), in *Vestnik Vostochno-Sibirskoj otkrytoj akademii*, no. 32, pp. 1-39, 2019. ]

9. **Официальный сайт Siemens** [Электронный ресурс]. URL: <https://new.siemens.com/global/en/company/stories/research-technologies/digitaltwin/digital-twin.html> (дата обращения

08.06.2020). [ "Siemens official website" (2020, Jun. 8), [Online], (in Russian). Available: <https://new.siemens.com/global/en/company/stories/research-technologies/digitaltwin/digital-twin.html> ]

10. **Кривошеев И. А., Сапожников А. Ю., Кузнецов А. А.** Разработка методики сквозного обучения студентов УГАТУ в едином информационном пространстве «Вуз – ОКБ – Серийный завод» // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10144> (дата обращения 01.06.2020). [ I. A. Krivosheev, A. Yu. Sapozhnikov, A. A. Kuznetsov (2020, Jun. 1), "Development of a methodology for end-to-end collective implementation of coursework and diploma projects for teaching students of technical universities in a single information space "University - Design Bureau - serial plant"" [Online], (in Russian), in *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, no. 5, 2013. Available: <http://scienceeducation.ru/ru/article/view?id=10144> ]

11. **Подход** к применению концепции цифровых двойников для трансформации корпоративной информационной системы под требования INDUSTRY 4.0 (на примере создания единого информационного пространства "ВУЗ-предприятие") / Г. Г. Куликов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23, № 4 (86). С. 154–160. [ G. G. Kulikov, et al., "Software Implementation of the expert system functions to control of design documentation in UIS engineering enterprises", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 23, no. 4 (86), pp. 154-160, 2019. ]

12. **ГОСТ Р 56135-2014.** Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2016. 14 с. [ *Lifecycle management of military products. General Provisions*, (in Russian), Federal Standart R 56135-2014, Moscow: Standartinform, 2016. ]

13. **ГОСТ Р 53791-2010.** Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2018. 8 с. [ *Resource saving. Stages of the life cycle of products for industrial and technical purposes. General provisions*, (in Russian), Federal Standart R 53791-2010, Moscow: Standartinform, 2018. ]

14. **Имитационное** моделирование бизнес-процессов в системе Bizagi Modeler / И. М. Якимов [и др.] // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 9. С. 236–239. [ I. M. Yakimov, et al., "Simulation of business processes in the Bizagi Modeler system", (in Russian), in *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, vol. 18, no. 9, pp. 236-239, 2015. ]

15. **Пискунова Е. В.** Зарубежный опыт реализации инновационных образовательных программ // Universum: Вестник Герценовского университета. 2007. № 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zarubezhnyy-opyt-realizatsii-innovatsionnyh-obrazovatelnyh-programm> (дата обращения: 08.06.2020). [ E. V. Piskunova (2020, Jun. 8), "Foreign experience in the implementation of innovative educational programs" [Online], (in Russian), in *Universum: Vestnik Gercenovskogo universiteta*, no. 1, 2007. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/zarubezhnyy-opyt-realizatsii-innovatsionnyh-obrazovatelnyh-programm> ]

16. **Антонов В. В., Куликов Г. Г., Антонов Д. В.** Формализация предметной области с применением инструментов, поддерживающих стандарты // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 3 (48). С. 42–52. [ V. V. Antonov, G. G. Kulikov, D. V. Antonov, "Formalization of the subject area with the use

of tools that support standards”, (in Russian), in *Vestnik UGA-TU*, vol. 16, no. 3 (48), pp. 42-52, 2012. ]

17. **Кузьмина Е. А., Кузьмин А. М.** Функционально-стоимостный анализ и метод ABC // Методы менеджмента качества. 2002. № 12. С. 6–10. [ Е. А. Kuzmina, А. М. Kuzmin, “Functional-cost analysis and the ABC method”, (in Russian), in *Metody menedzhmenta kachestva*, no. 12, pp. 6-10, 2002. ]

18. **Метод** формального онтологического моделирования и реализации функций системной инженерии на основе принципа достаточного разнообразия структурных связей / В. В. Антонов [и др.] // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. Т. 19, № 4. С. 13–26. DOI: 10.14529/ctcr190402. [ V. V. Antonov, et al., “Formal representation of the model of realization of the functions of system engineering based on the principle of the enough diversity of structural connections”, (in Russian), in *Vestnik YuUrGU. Seriya “Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika”*, vol. 19, no. 4, pp. 13-26, 2019. DOI: 10.14529/ctcr190402. ]

19. **Логиновский О. В., Ризванов К. А., Куликов Г. Г.** Применение BI-принципов в гейтовой системе управления проектом создания цифрового двойника ГТД // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 1. С. 16–26. DOI: 10.14529/ctcr200102. [ О. V. Loginovskiy, К. А. Rizvanov, G. G. Kulikov, “Application of BI-principles in the gate project management system to create a digital twin of the GTE”, (in Russian), in *Vestnik YuUrGU. Seriya “Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika”*, vol. 20, no. 1, pp. 16-26, 2020. DOI: 10.14529/ctcr200102. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**КУЛИКОВ Геннадий Григорьевич**, проф. каф. АСУ (УГАТУ). Д-р техн. наук.

**САПОЖНИКОВ Алексей Юрьевич**, доц. каф. ИТ в машиностроении. Дипл. инж. (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук по спец. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. автоматизации проектирования, САПР, инф. технологии, управление данными.

**КУЗНЕЦОВ Александр Андреевич**, асп. каф. АСУ.

**МАВРИНА Анна Сергеевна**, асп. каф. автоматизации технол. процессов. Дипл. инж. (УГАТУ, 2013).

#### METADATA

**Title:** Distributed design of engineering facilities using the digital twin of the industry it platform.

**Authors:** G. G. Kulikov<sup>1</sup>, A. Yu. Sapozhnikov<sup>2</sup>, A. A. Kuznecov<sup>3</sup>, A. S. Mavrina<sup>4</sup>

#### Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>gennadyg\_98@yahoo.com, <sup>2</sup>axl\_mail\_box@mail.ru, <sup>3</sup>kuznecovopkr@gmail.com, <sup>4</sup>nytk\_008@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 2 (92), pp. 86-92, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** It is proposed to use the developed system model of the digital twin of the industry IT platform in the coopera-

tion of the university, design department, serial factory for the development of high-tech products of the machine-building industry. At the moment, projects to create high-tech products are implemented in cooperation, including with the participation of universities. The system model allows you to formalize real and virtual objects of the subject area and the connections between them, based on the digital twin of the industry IT platform, the use of which is due to the introduction of new technologies within the framework of the INDUSTRY 4.0 strategy.

**Key words:** industry IT platform; digital twin of the corporate information system; TOGAF; educational environment; production environment; distributed interaction in design.

#### About authors:

**KULIKOV, Gennady Grigorievich**, Assoc. Prof. Dept. of Automated Control Systems (USATU), Dr. of Tech. Sci.

**SAPOZHNIKOV, Alexey Yurievich**, Prof., Dept. of IT in mechanical engineering, Dipl. engineer (USATU, 2000). Cand. of Tech. Sci. (USATU, 2012).

**KUZNECOV, Aleksandr Andreevich**, Post-graduate student of Dept. of Automated control systems.

**MAVRINA, Anna Sergeevna**, Post-graduate student of Dept. of Automation of technological processes. Dipl. engineer (USATU, 2013).