

Применение цифровых двойников и киберфизических систем на объектах генерации тепловой и электрической энергии

И.В. Салов, И.А. Щербатов и Ю.А. Салова

Аннотация— Цифровые двойники и киберфизические системы все чаще привлекают к себе внимания из-за активного исследования и внедрения во многих отраслях производства. В статье проведен обзор основных сфер применения цифровых двойников и киберфизических систем в сфере генерации электрической и тепловой энергии, которая стремится адаптироваться к цифровой эпохе. Рассмотрены определения «цифровой двойник» и «киберфизическая система», приведенные в различных источниках, выделены общие характеристики из различных формулировок для каждого из терминов, проанализирована взаимосвязь данных понятий, приведена классификация цифровых двойников по типам. В работе изучены имеющиеся публикации по данной тематике и приведены примеры использования в энергетике цифровых двойников для решения различных задач, таких как анализ и риск-ориентированное управление состоянием оборудования, проектирование и ввод в производство нового оборудования, поддержка работы оператора, оптимизация эффективности бизнес-операций и обучение персонала. Результатом данной работы является выделение типов задач, для решения которых применяются цифровые двойники и киберфизические системы. Полученные результаты будут использованы для дальнейшего исследования вопроса применения технологии цифровых двойников в энергетической сфере.

Ключевые слова— цифровой двойник, киберфизическая система, энергетика, генерация электроэнергии, генерация тепла.

I. ВВЕДЕНИЕ

Цифровизация в промышленности в настоящее время ведет интенсивное развитие благодаря росту и развитию встроенных микропроцессоров, средств хранения данных, интеграции сложных компонентов или подсистем в большие комплексы (интернет вещей, умные среды обитания и т.д.). Одним из направлений работ отечественных и зарубежных ученых является

Статья получена 16 ноября 2021.

И.В. Салов, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (e-mail: saloviv@mpei.ru).

И.А. Щербатов, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (e-mail: ShcherbatovIA@mpei.ru).

Ю.А. Салова, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (e-mail: kuznetsovyulal@mpei.ru).

организация взаимодействия между цифровыми и реальными системами с помощью технологий цифровых двойников (ЦД) и киберфизических систем (КФС).

II. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

На текущий момент времени однозначного и общепринятого определения понятия «киберфизическая система» нет. В различных исследованиях и стандартах можно встретить множество формулировок. Приведем некоторые из них:

- КФС - это умные системы, которые включают в себя спроектированные (инженерные) интерактивные сети, состоящие из физических и коммуникационных компонентов [1];

- КФС состоит из вычислительных, коммуникационных и управляющих компонентов, тесно взаимодействующих с физическими процессами различной природы (механическими, электрическими и химическими) [2];

- КФС - это интеллектуальные робототехнические системы, связанные с Интернетом вещей, или технические системы сетевых компьютеров, роботов и искусственного интеллекта, которые взаимодействуют с физическим миром [3];

- КФС - это система взаимодействующих вычислительных элементов, управляющих физическими объектами, включая гуманоидных роботов, искусственный интеллект (AI), Интернет вещей (IoT) и любое устройство или машину, которые подключены к сети информации [4].

Из всех имеющихся определений можно выделить общие характеристики КФС, а именно наличие в ее составе как реальных, так и виртуальных подсистем, взаимодействующих друг с другом.

Термин «цифровой двойник» также не имеет общепринятого определения. Среди них можно выделить следующие:

- ЦД — это виртуальное представление продукта или рабочего процесса на протяжении всего его жизненного цикла [5];

- ЦД — виртуальная копия реального объекта, которая ведет себя так же, как реальный объект. В нем в режиме реального времени отражаются все процессы, происходящие с физическим объектом [6];

- ЦД - это реальное отображение всех компонентов в жизненном цикле объекта с использованием физических

данных, виртуальных данных и данных взаимодействия между ними. ЦД объединяет в себе информацию о показателях функционирования объекта, его детальную математическую модель, параметры которой уточняются с помощью реальных данных. [7].

Обобщая вышесказанное необходимо отметить, что ЦД – это виртуальная модель объекта и происходящих в нем процессов, которая взаимодействует с реальным объектом для сбора информации.

Нетрудно заметить, что определения КФС и ЦД в значительной степени схожи, поэтому при изучении данной тематики можно ориентироваться на оба термина. Однако необходимо отметить, что некоторые различия все же есть, а именно КФС включает в себя и виртуальные, и реальные системы, а ЦД – только виртуальные. Это позволяет сделать вывод, что ЦД может считаться частью киберфизической системы, что не противоречит возможности использования обоих понятий для поиска необходимой информации.

В дальнейшем в работе будет использоваться понятие «цифровой двойник», т.к. оно является более узким. Важно отметить, что выделяют три типа ЦД [8]:

1. Двойник-прототип (Digital Twin Prototype). Это виртуальный аналог реально существующего элемента. Он содержит информацию, которая описывает определенный элемент на всех стадиях жизненного цикла— начиная от требований к производству и технологических процессов при эксплуатации, заканчивая требованиями к утилизации элемента. Наиболее характерными решениями в рамках данного направления являются созданные в САПР высокого уровня и максимально полно задокументированные 3D-модели изделий, необходимые для их производства.

2. Двойник-экземпляр (Digital Twin Instance). Содержит в себе информацию по описанию элемента (оборудования), то есть данные о материалах, комплектующих, информацию от системы мониторинга оборудования. Этот тип чаще всего основан на математической модели системы.

3. Агрегированный двойник (Digital Twin Aggregate). Объединяет прототип и экземпляр, то есть собирает всю доступную информацию об оборудовании или системе.

III. ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭНЕРГЕТИКЕ

В начале необходимо отметить наличие публикаций по схожей тематике, среди которых необходимо выделить работу [9]. Тем не менее, учитывая темпы развития исследуемого направления, вопрос с каждым годом становится актуальнее.

Наиболее простым способом применения ЦД является использование их для помощи в работе оператора. Авторами статьи [10] предлагается заменить мнемосхемы на киберфизическую 3D-модель с использованием технологии виртуальной реальности, что позволит добиться увеличения числа контролируемых факторов без увеличения психических нагрузок на управляющий персонал. Ландшафт, опоры, провода, оборудование, а также их состояние и

параметры окружающей среды в реальном времени будут отображаться в виде 3D моделей (Рис.1) с точной привязкой к местности, что упрощает восприятие данной информации энергодиспетчером [10].

ЦД применяются и при проектировании оборудования. В работе [11] рассматривается применение ЦД вместо существующих математических моделей комплектования деталей роторных пакетов в интегрированных САПР для разработки роторов газотурбинных двигателей, что позволяет преодолеть высокие требования к вычислительным ресурсам и эффект комбинаторного взрыва при увеличении числа деталей в пакете.



а)



б)

Рис. 1. Примеры фрагментов энергосистемы в киберфизической 3D-модели [10]:

а - изображение подстанции и части ЛЭП;

б - изображение участка ЛЭП

Авторами работы [12] с помощью Ansys Electronics Desktop создана цифровая модель гидротурбинного генератора (Рис.2), которая не только позволяет рассчитать магнитные характеристики агрегата, но и учесть влияние электронной системы управления на ее работу. В результате, при создании физического объекта установлено, что созданная цифровая модель достаточно точно воссоздает реальную электрическую машину и может быть использована для анализа при проектировании генераторов данного типа.

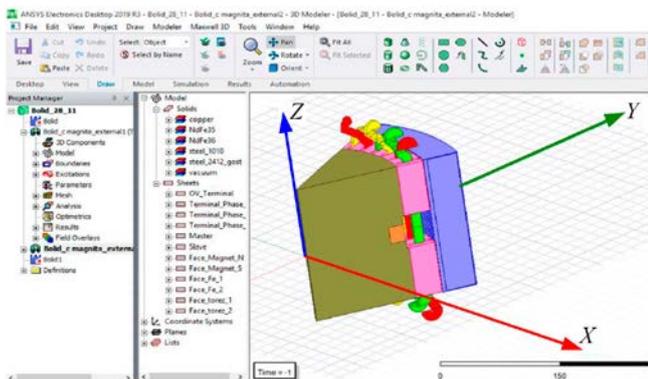


Рис.2. Модель генератора Ansys Electronics Desktop [12]

ООО «Продуктивные Технологические Системы» разработала и внедрила в АО «Уральский турбинный завод» ЦД турбины Кп-77-6,8, который реализован на основе программного обеспечения «Creo» и «Windchill», что позволило сократить срок изготовления от проектирования до ввода в производство турбины с 2,5 лет до 8 месяцев за счет того, что весь цикл управления жизненным циклом изделия реализуется с помощью единой централизованной платформы, в которой каждый участник процесса получает необходимые данные, при этом сами данные вводятся в систему только один раз [13].

Более перспективным по мнению автором применением ЦД в задачах управления промышленными объектами является анализ состояния оборудования. ЦД могут применяться для оценки текущего состояния и потенциала совершенствования реального объекта, оценки величины остаточного ресурса, анализа аномалий функционирования, прогноза поведения объекта на основе динамической модели [14].

Платформа «PREDIX», созданная компанией General Electric, позволяет определять текущее состояние газовой турбины и прогнозировать показатели её функционирования на базе ЦД, состоящих из цифровой модели, базы знаний и блока аналитики [15]. Систему создания ЦД, направленную на оценку технического состояния оборудования, также внедряет IBM [16]. АО «Ротек» разработала систему диагностики «Прана», направленную на оценку технического состояния следующих типов оборудования: паровых турбин, генераторов, трансформаторов, котлов, насосов, газопоршневых агрегатов [17]. В исследовании [18] предложен подход к оценке и прогнозированию остаточного ресурса преобразователя ветряной турбины, где также применялась технология ЦД.

В работе [19] авторский коллектив ведет разработку ЦД паровой турбины с использованием высокоуровневого языка программирования Python. Целью проекта является разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения построения имитационных моделей ЦД оборудования ТЭС и тепловых схем для применения в составе систем диагностики и предиктивной аналитики.

Для осуществления оценки технического состояния оборудования, в статье [20] предлагается осуществлять автоматизированный анализ данных с использованием ЦД. Приведенный в источнике расчет надежности

(Рис.3) на примере одной из теплоэлектростанций, включающей в схеме с поперечными связями три котельных агрегата БКЗ-420-140, три котельных агрегата БКЗ-500-140, три паровых турбины Т-110-130 и одну паровую турбину ПТ-135-130/15, получен путем сопоставления индивидуальных данных оценки технического состояния и вероятности аварийного отказа основного технологического оборудования с разработанными цифровыми моделями технологических процессов, физических систем, объектов и элементов.

Еще одно применение ЦД – обучение персонала. В статье [21] описывается компьютерный тренажерный комплекс для персонала, обслуживающего автоматику и средства измерений электростанции, выполненный с применением комплекса «ТРОПА», разработанного компанией «КРУГ». Использование компьютерных тренажерных комплексов на базе ЦД позволяет получить и закрепить знания и навыки надежной и эффективной эксплуатации оборудования, не подвергая опасности персонал и само оборудование предприятия в процессе обучения. В статье [22] рассмотрена концепция комплексного ЦД исследовательского ядерного реактора НИЯУ МИФИ, интегрирующего информационную модель здания (ВМ-модель), пространственную компоновку инженерных систем, физические модели происходящих процессов в различных режимах, построение атрибутов инженерных компонент и коммуникаций, модели данных при эмуляции управления объектом. Конечной целью проекта является продуктивное использование реализованного в виртуальной реальности интерактивного ЦД для построения образовательного процесса в сфере ядерной физики и технологий для широкого круга пользователей.

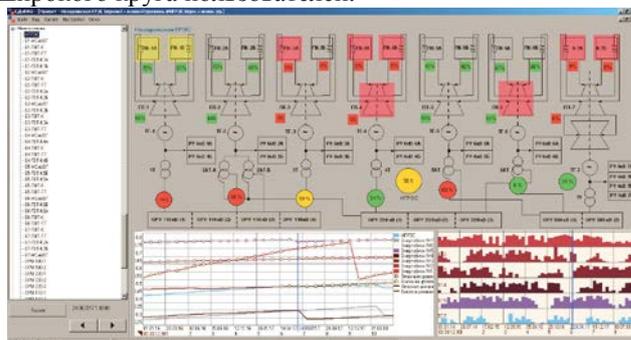


Рис.3. Вывод результатов расчета надежности в проекте [20]

ЦД могут быть эффективны и при решении задач оптимизации эффективности бизнес-операций, что рассматривается в работе [23]. Авторами показано, что ЦД АЭС и ТЭС формируют условия для оптимизации цифровой связи между ресурсами, услугами, техническими и природными системами, а также организационными структурами для повышения адаптивности и эффективности бизнес-операций и предлагают сформировать квази-единый наблюдаемый объектно-ресурсный комплекс для интеграции информационных потоков в рамках глобальных цифровых агломераций в энергетической суперсистеме.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ имеющихся работ, связанных с ЦД, а также потенциала использования технологии в области генерации электроэнергии и тепла, показал, что данный вопрос является актуальным. Можно выделить несколько типов задач, в решении которых ЦД могут быть наиболее эффективны:

- анализ и риск-ориентированное управление состоянием оборудования;
- проектирование и ввод в производство нового оборудования;
- поддержка работы оператора;
- оптимизация эффективности бизнес-операций;
- обучение персонала.

Дальнейшее изучение темы позволит достичь значительных результатов и является одним из наиболее перспективных направлений исследования.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Framework for Cyber-Physical Systems Release 1.0. URL: https://s3.amazonaws.com/nist-sgcps/cpspwg/files/pwgglobal/CPS_PWG_Framework_for_Cyber_Physical_Systems_Release_1_0_Final.pdf (Дата обращения: 03.08.2021)
- [2] Security and Privacy in Cyber-Physical Systems. Foundations, Principles, and Applications / ed. by H. Song, G. A. Fink, S. Jeschke. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2018. 472 p.
- [3] Ethical Aspects of Cyber-Physical Systems. URL: [https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/document/EPRS_STU\(2016\)563501](https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/document/EPRS_STU(2016)563501) (Дата обращения: 03.08.2021)
- [4] Jeschke S., Brecher C., Meisen T., zdemir D., Eschert T. (2017) Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems. In: Jeschke S., Brecher C., Song H., Rawat D. (eds) Industrial Internet of Things. Springer Series in Wireless Technology. Springer, Cham.
- [5] Бедняк, С. Г. Цифровые двойники и области их применения / С. Г. Бедняк, А. А. Бауман // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 26. – С. 1539-1544.
- [6] Цифровые двойники: почему все о них говорят и всем ли они нужны? URL: <https://habr.com/ru/company/factory5/blog/512364/> (Дата обращения: 10.08.2021)
- [7] Tao F. et al. Digital twin-driven product design framework//International Journal of Production Research. – 2018. – С. 1-19.
- [8] Массель, Л. В. Эволюция технологий исследований энергетики и применения их результатов: от математических моделей и компьютерных программ к цифровым двойникам и цифровым образам / Л. В. Массель, А. Г. Массель, А. Н. Копайгородский // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – № 4(16). – С. 5-19. – DOI 10.25729/2413-0133-2019-4-01.
- [9] Ерошенко, С. А. Технологии цифровых двойников в энергетике / С. А. Ерошенко, А. И. Хальясмаа // Электроэнергетика глазами молодежи-2019: материалы юбилейной X Международной научно-технической конференции, Иркутск, 16–20 сентября 2019 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 55-58.
- [10] Шпиганович, А. Н. Пути развития цифровой энергетики / А. Н. Шпиганович, А. А. Шпиганович, К. А. Пушница // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 11. – С. 61-70.
- [11] Тимофеева, Е. В. Математическое обеспечение САПР виртуальной сборки роторов газотурбинных двигателей / Е. В. Тимофеева, М. В. Тимофеев, Н. И. Гусарова // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. – 2019. – № 3(50). – С. 67-73.
- [12] Аминов, Д. С. Применение программного комплекса ansys electronics desktop для анализа водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения / Д. С. Аминов // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 1(46). – С. 13-18. – DOI 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-13-18.
- [13] УТЗ использует цифровой двойник турбин на базе Creo и Windchill URL: <https://pts-russia.com/news/item/313-utz-ispolzuet-tsifrovoy-maket-turbin.html> (Дата обращения: 22.10.2021)
- [14] Цифровые двойники объектов в решении задач управления / В. А. Минаев, А. В. Мазин, К. Б. Здирук, Л. С. Куликов // Радиопромышленность. – 2019. – № 3. – С. 68-78. – DOI 10.21778/2413-9599-2019-29-3-68-78.
- [15] GE, PREDIX [Электронный ресурс]: офиц. сайт. URL: <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin> (Дата обращения 22.10.2021).
- [16] IBM, IBM Engineering Lifecycle Optimization [Электронный ресурс]: офиц. сайт. URL: <https://www.ibm.com/us-en/marketplace/lifecycle-integration-adapters> (Дата обращения 22.10.2021).
- [17] Прана, [Электронный ресурс]: офиц. сайт. URL: <https://prana-system.com/pochemu-prana/> (Дата обращения 22.10.2021).
- [18] K. Sivalingam, M. Sepulveda, M. Spring and P. Davies, "A Review and Methodology Development for Remaining Useful Life Prediction of Offshore Fixed and Floating Wind turbine Power Converter with Digital Twin Technology Perspective," 2018 2nd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), Singapore, 2018, pp. 197-204.
- [19] Применение цифровых двойников с целью повышения надёжности работы оборудования в энергетике / И. А. Щербатов, А. Н. Долгушев, В. А. Агибалов, М. В. Белов // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2021. – № 7. – С. 41-45. – DOI 10.26160/2541-8637-2021-7-41-45.
- [20] Акулич, Н. С. Риск-ориентированное управление техническим состоянием технологического оборудования тепловых электростанций / Н. С. Акулич, Е. А. Бойко // Энергоэксперт. – 2020. – № 4(76). – С. 72-76.
- [21] Цифровые двойники – эффективный инструмент для подготовки персонала электростанций URL: <https://www.krug2000.ru/pdf/tsifrovyye-dvoyniki-effektivnyy-instrument-dlya-podgotovki-personala-elektrostantsiy.pdf> (Дата обращения: 19.08.2021)
- [22] Жабицкий, М. Г. Концепция комплексного цифрового двойника сложного инженерного объекта на примере исследовательского реактора НИЯУ МИФИ / М. Г. Жабицкий, С. А. Ожерельев, Г. В. Тихомиров // International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т. 9. – № 8. – С. 43-51.
- [23] Грабчак, Е. П. "Цифровые двойники" АЭС и ТЭС как элементы цифровых агломераций в энергетической суперсистеме / Е. П. Грабчак, Е. Л. Логинов // Современные проблемы электроэнергетики и пути их решения: Материалы V Всероссийской научно-технической конференции, Махачкала, 25–26 декабря 2019 года. – Махачкала: Информационно-Полиграфический Центр ДГТУ, 2019. – С. 155-159.

Application of digital twins and cyber-physical systems at thermal and electric power generation facilities

I.V. Salov, I.A. Shcherbatov and J.A. Salova

Abstract— Digital twins and cyber-physical systems are increasingly gaining attention due to active research and implementation in many industries. The article provides an overview of the main areas of application of digital twins and cyber-physical systems in the field of electric and thermal energy generation, which strives to adapt to the digital age. The definitions of “digital twin” and “cyber-physical system” given in various sources are considered, general characteristics are highlighted from various formulations for each of the terms, the relationship of these concepts is analyzed, and the classification of digital twins by type is given. The work examines the existing publications on this topic and provides digital twins using examples in the energy sector for solving various problems, such as analysis and risk-based management of the state of equipment, design and commissioning of new equipment, support for the operator's work, optimization of the efficiency of business operations, and training. The result of this work is the identification of the types of problems for the solution of which digital twins and cyber-physical systems are used. The results obtained will be used for further research on the application of digital twin technology in the energy sector.

Keywords— digital twin, cyber-physical system, energetics, power generation, heat generation.

REFERENCES

- [1] Framework for Cyber-Physical Systems Release 1.0. URL: https://s3.amazonaws.com/nist-sgcps/cpspwg/files/pwgglobal/CPS_PWG_Framework_for_Cyber_Physical_Systems_Release_1_0Final.pdf (Data obrashhenija: 03.08.2021)
- [2] Security and Privacy in Cyber-Physical Systems. Foundations, Principles, and Applications / ed. by H. Song, G. A. Fink, S. Jeschke. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2018. 472 p.
- [3] Ethical Aspects of Cyber-Physical Systems. URL: [https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/document/EPRS_STU\(2016\)563501](https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/document/EPRS_STU(2016)563501) (Data obrashhenija: 03.08.2021)
- [4] Jeschke S., Brecher C., Meisen T., zdemir D., Eschert T. (2017) Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems. In: Jeschke S., Brecher C., Song H., Rawat D. (eds) Industrial Internet of Things. Springer Series in Wireless Technology. Springer, Cham.
- [5] Bednjak, S. G. Cifrovye dvojniki i oblasti ih primeneniya / S. G. Bednjak, A. A. Bauman // Innovacii. Nauka. Obrazovanie. – 2021. – # 26. – S. 1539-1544.
- [6] Cifrovye dvojniki: pochemu vse o nih govoryat i vsem li oni nuzhny? URL: <https://habr.com/ru/company/factory5/blog/512364/> (Data obrashhenija: 10.08.2021)
- [7] Tao F. et al. Digital twin-driven product design framework//International Journal of Production Research. – 2018. – S. 1-19.
- [8] Massel', L. V. Jevoljucija tehnologij issledovanij jenergetiki i primeneniya ih rezul'tatov: ot matematicheskikh modelej i komp'yuternykh programm k cifrovym dvojniki i cifrovym obrazam / L. V. Massel', A. G. Massel', A. N. Kopajgorodskij // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii. – 2019. – # 4(16). – S. 5-19. – DOI 10.25729/2413-0133-2019-4-01.
- [9] Eroshenko, S. A. Tehnologii cifrovyyh dvojniki v jenergetike / S. A. Eroshenko, A. I. Hal'jasmaa // Jelektrojenergetika glazami molodezhi-2019: materialy jubilejnoj H Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Irkutsk, 16–20 sentjabrja 2019 goda. – Irkutsk: Irkutskij nacional'nyj issledovatel'skij tehničeskij universitet, 2019. – S. 55-58.
- [10] Shpiganovich, A. N. Puti razvitiya cifrovoy jenergetiki / A. N. Shpiganovich, A. A. Shpiganovich, K. A. Pushnica // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki. – 2019. – # 11. – S. 61-70.
- [11] Timofeeva, E. V. Matematicheskoe obespechenie SAPR virtual'noj sborki rotorov gazoturbinnyh dvigatelej / E. V. Timofeeva, M. V. Timofeev, N. I. Gusarova // Vestnik Rybinskoj gosudarstvennoj aviacionnoj tehnologicheskoy akademii im. P. A. Solov'eva. – 2019. – # 3(50). – S. 67-73.
- [12] Aminov, D. S. Primenenie programmnoho kompleksa ansys electronics desktop dlja analiza vodopogruzhnogo gidrogeneratora kombinirovannogo vobuzhdenija / D. S. Aminov // Jelektrotehniceskie sistemy i komplekсы. – 2020. – # 1(46). – S. 13-18. – DOI 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-13-18.
- [13] UTZ ispol'zuet cifrovoy dvojniki turbin na baze Creo i Windchill URL: <https://pts-russia.com/news/item/313-utz-ispolzuet-tsifrovoy-maket-turbin.html> (Data obrashhenija: 22.10.2021)
- [14] Cifrovye dvojniki ob'ektov v reshenii zadach upravlenija / V. A. Minaev, A. V. Mazin, K. B. Zdiruk, L. S. Kulikov // Radiopromyshlennost'. – 2019. – # 3. – S. 68-78. – DOI 10.21778/2413-9599-2019-29-3-68-78.

- [15] GE, PREDIX [Jelektronnyj resurs]: ofic. sajt. URL: <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin> (Data obrashhenija 22.10.2021).
- [16] IBM, IBM Engineering Lifecycle Optimization [Jelektronnyj resurs]: ofic. sajt. URL: <https://www.ibm.com/us-en/marketplace/lifecycle-integration-adapters> (Data obrashhenija 22.10.2021).
- [17] Prana, [Jelektronnyj resurs]: ofic. sajt. URL: <https://prana-system.com/pochemu-prana/> (Data obrashhenija 22.10.2021).
- [18] K. Sivalingam, M. Sepulveda, M. Spring and P. Davies, "A Review and Methodology Development for Remaining Useful Life Prediction of Offshore Fixed and Floating Wind turbine Power Converter with Digital Twin Technology Perspective," 2018 2nd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), Singapore, 2018, pp. 197-204.
- [19] Primenenie cifrovyyh dvojnikov s cel'ju povyshenija nadjozhnosti raboty oborudovanija v jenergetike / I. A. Shherbatov, A. N. Dolgushev, V. A. Agibalov, M. V. Belov // Mehatronika, avtomatika i robototekhnika. – 2021. – # 7. – S. 41-45. – DOI 10.26160/2541-8637-2021-7-41-45.
- [20] Akulich, N. S. Risk-orientirovannoe upravlenie tehničeskim sostojaniem tehnologičeskogo oborudovanija teplovyh jelektrostantsij / N. S. Akulich, E. A. Bojko // Jenergojeksport. – 2020. – # 4(76). – S. 72-76.
- [21] Cifrovye dvojniki – jeffektivnyj instrument dlja podgotovki personala jelektrostantsij URL: <https://www.krug2000.ru/pdf/tsifrovyye-dvoyniki-effektivnyy-instrument-dlya-podgotovki-personala-elektrostantsiy.pdf> (Data obrashhenija: 19.08.2021)
- [22] Zhabickij, M. G. Konceptcija kompleksnogo cifrovogo dvojnika slozhnogo inženernogo ob'ekta na primere issledovatel'skogo reaktora NIJaU MIFI / M. G. Zhabickij, S. A. Ozherel'ev, G. V. Tihomirov // International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – T. 9. – # 8. – S. 43-51.
- [23] Grabchak, E. P. "Cifrovye dvojniki" AJeS i TJeS kak jelementy cifrovyyh aglomeracij v jenergetičeskoy supersisteme / E. P. Grabchak, E. L. Loginov // Sovremennyye problemy jelektrojenergetiki i puti ih reshenija: Materialy V Vserossijskoj nauchno-tehničeskoy konferencii, Mahachkala, 25–26 dekabrja 2019 goda. – Mahachkala: Informacionno-Poligrafičeskij Centr DGTU, 2019. – S. 155-159