

DOI 10.21672/2074-1707.2020.52.4.112-118
УДК 004.5:004.8

ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА НА ПРИМЕРЕ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЙ ЭКСОСКЕЛЕТНОГО ТРЕНАЖЁРА REJOINT

Статья поступила в редакцию 18.10.2020, в окончательном варианте – 01.11.2020.

Драгунов Станислав Евгеньевич, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, 28, аспирант, e-mail: dragunov.stanislav.e@gmail.com

Попова Светлана Сергеевна, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, 28, магистрант, e-mail: lorbrinil@gmail.com

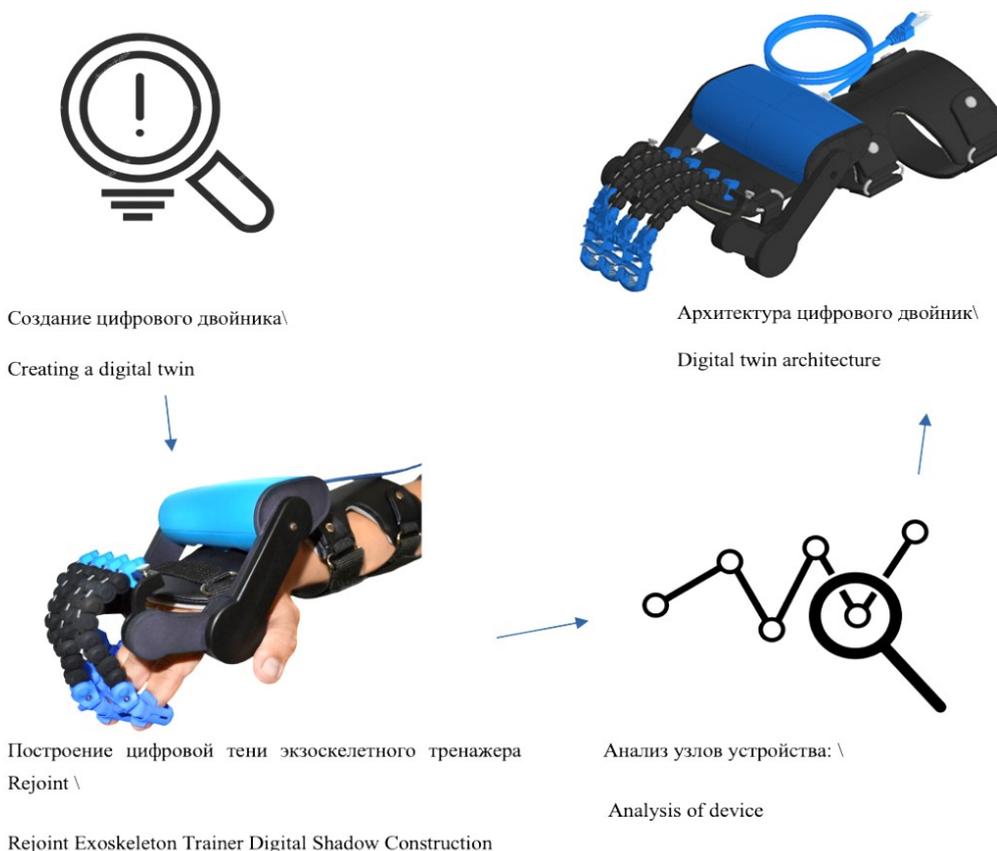
Матохина Анна Владимировна, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, 28, кандидат технических наук, докторант, e-mail: matokhina.a.v@gmail.com

Чернецкий Максим Александрович, ООО «Реджоинт Наука», 400001, Российская Федерация, г. Волгоград, ул. Социалистическая, 17, оф. 703, директор, e-mail: m@rejoint.ru

В данной статье рассмотрена апробация методологии цифровых двойников для мониторинга состояний и контроля эксплуатации в рамках аренды экзоскелетного тренажёра Rejoint, используемого для восстановления мышечной активности после травм и инсультов. Для апробации работы используется технология цифровой тени, позволяющей получать информацию о состоянии устройства, находящегося в удаленной эксплуатации, что позволяет повысить качество обслуживания и увеличить срок службы устройства. Процесс мониторинга включает в себя установку на устройство дополнительных датчиков, позволяющих в реальном времени собирать данные о положении узлов и состоянии устройства и передавать данные на сервер для последующего анализа. Полученные данные позволяют проводить как цифровую аналитику, так и компьютерные симуляции, предоставляя для анализа цифровую копию реально эксплуатируемого устройства.

Ключевые слова: экзоскелет, цифровой двойник, симуляция, датчики, медицинская техника

Графическая аннотация (Graphical annotation)



IMPLEMENTATION OF A DIGITAL TWIN USING THE EXAMPLE OF STATE MONITORING OF THE REJOINT EXOSKELETON TRAINER

The article was received by the editorial board on 18.10.2020, in the final version – 01.11.2020.

Dragunov Stanislav E., Volgograd State Technical University, 28 V.I. Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

postgraduate student, e-mail: dragunov.stanislav.e@gmail.com

Popova Svetlana S., Volgograd State Technical University, 28 V.I. Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

undergraduate student, e-mail: lorbrinil@gmail.com

Matokhina Anna Vladimirovna, Volgograd State Technical University, 28 V.I. Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), doctoral student, e-mail: matokhina.a.v@gmail.com

Chernetsky Maxim A., LLC “Rejoint Nauka”, office 703, 17 Sotsialisticheskaya St., Volgograd, 400001, Russian Federation,

head, e-mail: m@rejoint.ru

This article discusses the approbation of the digital twin methodology for condition monitoring and operation control within the framework of the lease, the Rejoint exoskeletal trainer used to restore muscle activity after injuries and strokes. To test the work, digital shadow technology is used, which makes it possible to obtain information about the state of the device in remote operation, which improves the quality. maintenance and increase the life of the device. The monitoring process includes the installation of additional sensors on the device, which allow collecting real-time data on the position of the nodes and the state of the device, transmitting data to the server for subsequent analysis. The obtained data allow carrying out, in addition to digital analytics, computer simulations, providing for analysis a digital copy of the actually operated device.

Keywords: exoskeleton, digital twin, simulation, sensors, medical technology

Введение. Цифровые двойники – технология, позволяющая производить удалённый мониторинг технических систем, что помогает техническому обслуживанию и анализу состояний устройства. В рамках данной статьи изучается вопрос применения данной технологии для устройства Rejoint восстановления мышечной активности после травм и инсультов. Производится анализ узлов устройства и анализ архитектуры.

Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель конкретного продукта. Производители используют данный тип цифрового двойника перед настройкой производственной линии, чтобы проанализировать, как продукт будет работать в различных условиях и какие проблемы могут возникнуть в реальном мире [9, 20]. Он позволяет вносить необходимые корректировки и создавать более эффективный продукт. В результате цифровой двойник реального продукта помогает уменьшить производственные затраты при его выходе на рынок [5, 10].

Так как нет общепринятого понятия «цифровой двойник», то различные отрасли и группы дают свое определение, отражающее именно их нужды. Рассмотрим определения «цифровой двойник» со стороны бизнес-сектора.

Обычно двойник используется предприятиями для закрытия следующих потребностей:

- сопровождение продукции квалифицированным специализированным сервисом (контроль состояния, мониторинг, техническое сопровождение);

- сопровождение изделия на протяжении длительного жизненного цикла изделия;
- мониторинг большого количества экземпляров установленного оборудования;
- оценка работоспособности при множественных различных условиях эксплуатации;
- проведение обслуживания в условиях труднодоступности изделия [1, 12, 17].

Т.е. цифровым двойником можно назвать виртуальную модель продукта, предназначенную для анализа его поведения во всевозможных условиях, которые могут возникнуть при его эксплуатации. Такая цифровая модель может помочь найти слабые места в изделии, которые могут быть скорректированы до выпуска в производство, тем самым позволяя сделать более эффективный и жизнеспособный продукт. Таким образом, двойник уменьшает затраты на производство до выхода на рынок, позволяя экономить на создании множества прототипов, их испытании и внесении корректировок [4].

На разных этапах жизненного цикла продукта, а также под разные нужды, могут быть использованы различные цифровые двойники. Обычно цифровые двойники делят на следующие типы:

- цифровой двойник-прототип (Digital Twin Prototype);
- цифровой двойник-экземпляр (Digital Twin Instance);
- цифровой двойник-агрегатор (Digital Twin Aggregate).

Первый тип (Digital Twin Prototype) является прототипом реального объекта. Это совокупность различной информации для создания физического объекта. В него может входить документация

о материалах, информация о компонентах сборки, о свойствах и многое другое. Этот цифровой двойник обычно создается до фактического производства объекта.

Следующий тип (Digital Twin Instance) является двойником конкретного физического объекта. Двойник-экземпляр создается на основе двойника-прототипа, но использует не только данные, необходимые для обеспечения работоспособности объекта, но и информацию с датчиков, которая поступает на протяжении всего времени эксплуатации.

Этот тип цифрового двойника остается связанным с физическим объектом в течение его жизненного цикла [14]. Двойник-экземпляр зачастую включает в себя информацию об условиях эксплуатации, информацию с датчиков, записанную в базу данных, информацию об объекте и др. Этот двойник использует данные с датчиков в течение своего жизненного цикла для сопровождения изделия, прогнозирования поведения и мониторинга его состояния [8].

Последний тип (Digital Twin Aggregate) – это совокупность множества цифровых двойников конкретных физических объектов. В отличие от предыдущего типа, Digital Twin Aggregate не является независимой структурой. Цифровой двойник-агрегатор использует данные, включенные в экземпляры цифрового двойника, для изучения физического продукта, определения и изучения закономерностей, прогнозирования, а также для мониторинга большого количества объектов [2].

Пока производство недостаточно большое, используется второй тип цифровых двойников.

Цифровой двойник может состоять из трех компонентов:

1. Цифровое представление объекта, которое относится к структуре системы. Такие представления могут иметь визуальный пользовательский интерфейс, например, в форме трехмерных моделей. Также могут состоять из системных спецификаций или онтологий, описывающих архитектуру системы, включая компоненты и их интерфейсы [6, 13].

2. Поведенческая модель, которая описывает динамический отклик системы (то есть ее состояние и результат ее реакции на внешние воздействия). Такая модель может включать работу системы (т.е. моделировать то, как система выполняет свои функции), структурную реакцию на нагрузки, которым она подвергается, а также процессы деградации и повреждения [7, 19].

3. Конфигурация или состояние системы, которое представляет собой данные записи прошлого и текущего состояния или изменения системы, захваченные посредством датчиков [3].

Таким образом, цифровой двойник состоит из какого-либо представления объекта (например, 3D-представления), цифровой модели, которая описывает реакцию объекта на воздействие, и состояния системы в определенный момент времени.

И хотя цифровой двойник может использоваться на всех этапах жизненного цикла, данная работа нацелена на мониторинг состояния в рамках цикла эксплуатации.

Построение цифровой тени экзоскелетного тренажера Rejoint. Экзоскелетный тренажер Rejoint разработан волгоградской компанией ООО «Реджоинт Наука» и предназначен для восстановления мышечной активности после травм и инсультов путём автоматизации сгибания и разгибания пальцев. Пациенты могут брать тренажеры в аренду. Для повышения эффективности тренировок и предупреждения возможных отказов тренажера принято решение о его модернизации – построении его цифровой тени. Проект тренажера был доработан, в него добавили следующие элементы: датчик угла наклона, датчик сопротивления мотора, систему обратной связи пульта. Разработана трехмерная модель тренажера.

Цифровой двойник данного тренажера представляет собой подвижную 3D-модель для визуализации положений тренажера (рис. 1). Данные с датчиков отображают состояние системы и определяют поведенческую модель, отражающую реакцию объекта и применяемую в цифровой копии.

Данный цифровой двойник позволит сопровождать изделие на протяжении всего цикла эксплуатации и увеличить срок службы тренажера. Также на основе имеющихся данных можно будет улучшить конструкцию объекта, отследив «слабые места», и выявить проблемы во время эксплуатации объекта [15].

Блоки тренажера:

Мотор – получая сигнал с пульта управления, обеспечивает вращение подающей шестерни.

Система рычагов – состоит из ряда шестерен, передающих усилие на большой и малый рычаг тренажера.

Цепь пальцев – система, состоящая из набора костяшек, передающих усилие на пальцы пользователя, и обеспечивающая их плавное сгибание.

Датчик положения – прилегает к мотору и передает информацию о положении мотора, что позволяет также определять положение системы рычагов.

Датчик сопротивления – позволяет получить данные о нагрузке мотора и обеспечить безопасное сгибание.

Блоки пульта управления:

- программа управления – обеспечивает работу устройства;
- система питания – обеспечивает энергию для работы устройства;
- система передачи данных – передает информацию о состоянии устройства.

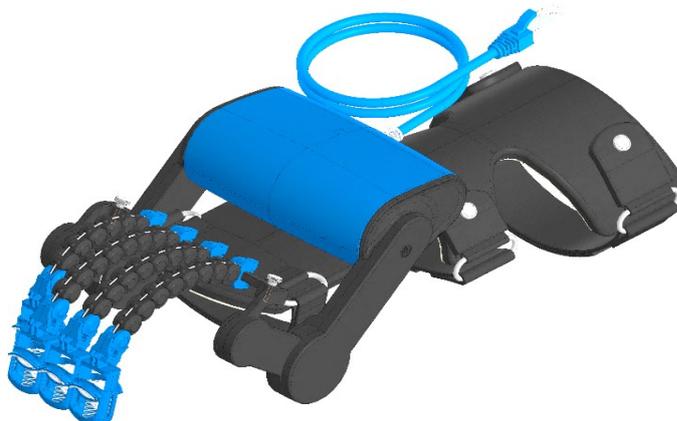


Рисунок 1 – 3D-модель тренажера



Рисунок 2 – Архитектура устройства

Архитектура цифрового двойника. Разработанная система цифрового двойника [18], получая данные с оригинала устройства, передаёт эту информацию на аналогичные узлы цифрового двойника.

Благодаря данным, которые собираются с датчиков, закрывается потребность в мониторинге и анализе состояния тренажера. В первом же типе цифрового двойника нет необходимости, так как производство уже запущено, и вся необходимая информация для создания нового объекта будет уже агрегирована в цифровой модели.

Для решения задачи отслеживания состояния физического объекта сначала определим входящие данные. Данные поступают из двух источников:

- датчики;
- плата пульта управления.

Поступающие значения с датчика положения с некоторым промежутком времени записываются в таблицу базы данных. Помимо значений в базу сохраняется время, в которое данное значение было зафиксировано, а также рассчитывается положение мотора и системы рычагов в это время, что позволяет отобразить положение физического объекта на цифровой модели [16].

Поступающие значения с датчика положения с некоторым промежутком времени записываются также в таблицу базы данных, сохраняя время, в которое значение датчика было зафиксировано, а также рассчитываются данные о нагрузке мотора, помогая сигнализировать о небезопасном сгибании [11].

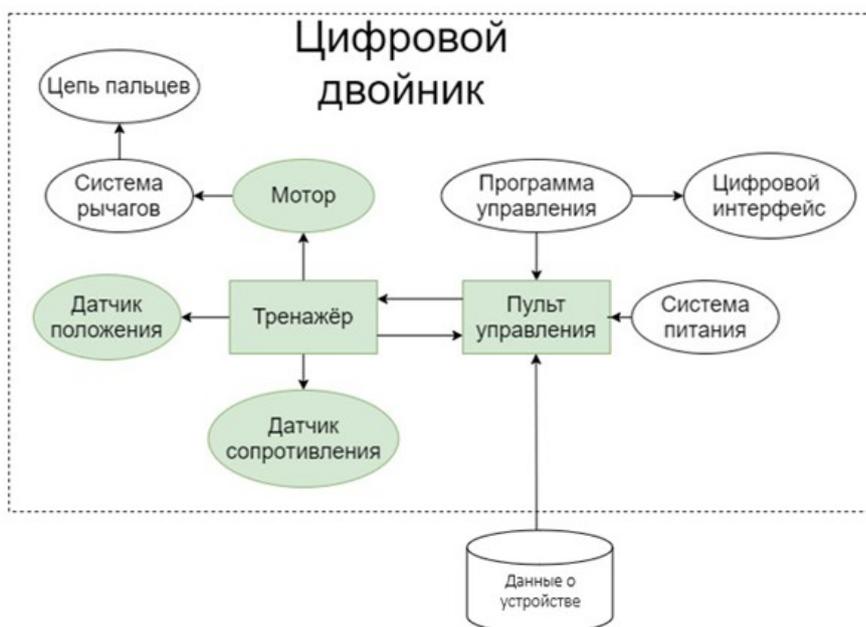


Рисунок 3 – Архитектура цифрового двойника

С платы пульта управления мы можем получить следующие данные: время тренировки, предоставленный угол разгибания, ограничение усилия, предоставленный угол сгибания и скорость.

Кроме динамически поступающих данных, необходимо хранить постоянный набор параметров конфигурации, некоторые настройки – по умолчанию.

Далее необходимо агрегировать всю имеющуюся в различном формате информацию о тренажере в одну базу знаний, которая хранит данные в формате правил. Эти правила позволяют анализировать состояние тренажера, основываясь на математических моделях, заданных в базе знаний. Например:

если текущий_угол_сгиба > максимальный_угол_сгиба, то сигнализировать об опасном сгибе.

Также база знаний может постепенно пополняться неисправностями и причинами, которые привели к ним. На основе этих данных цифровой двойник впоследствии может рекомендовать действия для своевременного их устранения.

Последним модулем цифрового двойника является система управления знаниями и их визуализации. Сначала определяется принадлежность входного сигнала (например, сигнал поступил от датчика). После этого происходит анализ сигнала с помощью базы знаний и расчет дополнительных параметров для определения текущего состояния тренажера, чтобы отобразить его.

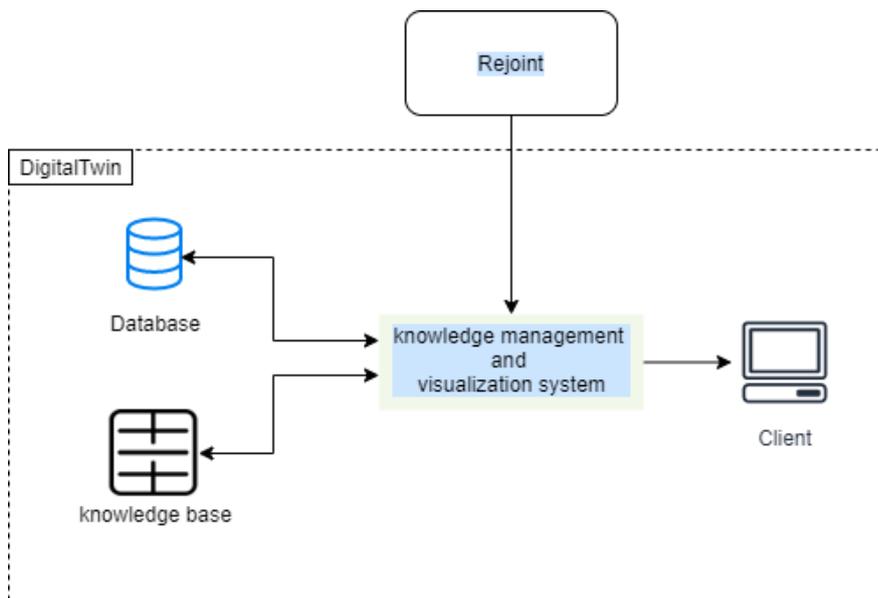


Рисунок 4 – Взаимодействие подсистем

Заключение. В рамках данной работы был проведен анализ технологии цифровых двойников, экстраполирован на тренажёр Rejoint, разработана схема внедрения датчиков для реализации функций данной технологии, определены необходимые данные для передачи. В данный момент технология внедрена, происходит сбор данных, результат работы планируется к представлению в следующей статье.

Библиографический список

1. Критцингер В. К. Цифровой двойник в производстве: категориальный обзор и классификация литературы / В. К. Критцингер, Т. Маттиас, Х. Георг, Я. Вильфрид // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – № 51. – С. 1016–1022. – 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
2. Горюет М. Цифровой двойник: смягчение непредсказуемого нежелательного поведения в сложных системах / М. Горюет, Д. Викерс. – 2017. – 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
3. Кабос К. К. Цифровая модель или цифровой двойник? / К. К. Кабос // 17-я конференция по компьютерным приложениям и информационным технологиям в морской отрасли (COMPIT). – Кардифф, 2018.
4. Флориан Б. Цифровой двойник для планирования производства на основе киберфизических систем: пример создания цифрового двойника на основе киберфизических систем / Б. Флориан, М. Дэвис, К. Бенедикт, В. Майкл // Процедура CIRP. – 2019. – Т. 79. – С. 355–360. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.087>.
5. Кокорев Д. С. Цифровые двойники: понятие, виды и преимущества для бизнеса / Д. С. Кокорев, А. А. Юрин // *Коллоквиум-журнал*. – 2019. – № 10 (34). – С. 31–35. DOI: 10.24411/2520-6990-2019-10264
6. Марьясин О. Ю. Разработка онтологий цифрового двойника зданий / О. Ю. Марьясин // *Онтология дизайна*. – 2019. – Т. 9, № 4 (34). – С. 480–495.
7. Макаров В. Л. Разработка цифровых двойников для производственных предприятий / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян // *Бизнес-информатика*. – 2019. – № 13 (4). – С. 7–16.
8. Бамберг А. Что делает цифрового двойника гениальным компаньоном? / А. Бамберг, Л. Урбас, С. Брекер, Н. Кокманн, М. Борц // *ChemieIngenieurTechnik*. – 2019.
9. Скорбит М. Истоки концепции цифрового двойника / М. Скорбит. – 2016. – 10.13140/RG.2.2.26367.61609.
10. Петров А. В. Имитация как основа технологии цифровых двойников / А. В. Петров // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2018. – Т. 22, № 10 (141). – С. 56–66.
11. Брумштейн Ю. М. Системный анализ направлений и функциональных возможностей методов исследования движений частей тела человека / Ю. М. Брумштейн, Ю. Ю. Аксенова, М. В. Иванова // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2014. – № 3 (27). – С. 80–98.
12. Чимино К. Н. Обзор приложений цифровых двойников на производстве / К. Н. Чимино, Элиза и Фумагалли Лука // *Компьютеры в промышленности*. – 2019. – 113.103130.10.1016/j.compind.2019.103130.
13. Щекочихин О. В. Онтология концептов информационной системы с поведением / О. В. Щекочихин, В. В. Шведенко, П. В. Шведенко // *Вестник Поволжья*. – 2016. – № 5. – С. 223–226.
14. Лю Я. Как интеллектуальные технологии могут способствовать устойчивому управлению жизненным циклом продукции? / Я. Лю, И. Чжан, Ш. Рен, М. Ян, Ю. Ван, Д. Хуйсин // *Журнал чистого производства*. – 2019. – 119423.10.1016/j.jclepro.2019.119423.
15. Тао Ф. Создавайте больше цифровых двойников / Ф. Тао, К. Ци // *Природа*. – 2019. – № 573.
16. Винсент Х. Цифровой двойник и виртуальная реальность: среда совместного моделирования для проектирования и оценки промышленных рабочих станций / Х. Винсент, Ж. Бенуа, Л. Марк, Б. Дэвид // *Исследования производства и производства*. – 2019. – Т. 7, № 1. – С. 472–489. DOI: 10.1080/21693277.2019.1660283.
17. Шимански К. М. Продвижение цифровой автоматизации услуг настройки на заказ на малых и средних предприятиях отрасли строительного оборудования: подход к исследованиям в области дизайна / К. М. Шимански, М. М. Габриэле // *Прикладные науки*. – 2019. – 9.3780.10.3390/app9183780.
18. Аштари Т. Архитектура интеллектуального цифрового двойника в киберфизической производственной системе / Т. Аштари, Ю. Бехранг, Л. Тобиас, С. Бенджамин, Д. Нада, Ш. Нассер, В. Вольфганг, М. Михаэль // *Automatisierungstechnik*. – 2019. – № 67. – С. 762–782. 10.1515/авто-2019-0039.
19. Ванг Д. Цифровой двойник для диагностики неисправностей вращающегося оборудования в интеллектуальном производстве / Д. Ванг, Л. Ю, Р. Х. Гао, К. Ли, Л. Чжан // *Int. J. Prod. Res.* – 2019. – № 57. – С. 3920–3934.
20. Шведенко В. Метод генерации цифровых двойников на основе агрегирования информационных объектов / В. Шведенко, А. Волков // *Автоматическая документация и математическая лингвистика*. – 2019. – № 53. – С. 122–126. – 10.3103 / S0005105519030038.

References

1. Krittlinger V. K., Mattias T., Georg H., Vilfrid Ya. Tsifrovoy dvoynik v proizvodstve: kategorialnyy obzor i klassifikatsiya literatury [The digital twin in manufacturing: a categorical review and classification of the literature]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, no. 51, pp. 1016–1022. 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
2. Goryuet M., Vikers D. *Tsifrovoy dvoynik: smyagchenie nepredskazuemogo nezhelatel'nogo povedeniya v slozhnykh sistemakh* [The digital twin: mitigating unpredictable unwanted behavior in complex systems], 2017. 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
3. Kabos K. K. Tsifrovaya model ili tsifrovoy dvoynik [Digital model or digital twin]. *17-ya konferentsiya po kompyuternym prilozheniyam i informatsionnym tekhnologiyam v morskoy otrasli (COMPIT)* [17th Maritime Computing and Information Technology Conference (COMPIT)]. Cardiff, 2018.

4. Florian B., Devis M., Benedikt K., Maykl V. Tsifrovoy dvoynik dlya planirovaniya proizvodstva na osnove kiberfizicheskikh sistem: primer sozdaniya tsifrovogo dvoynika na osnove kiberfizicheskikh sistem [Digital twin for cyber-physical manufacturing planning: example of creating digital twin on the basis of cyber physical systems]. *Protsejura CIRP* [Procedure CIRP], 2019, vol. 79, pp. 355–360. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.087>.
5. Kokorev D. S., Yurin A. A. Tsifrovye dvoyniki: ponyatie, vidy i preimushchestva dlya biznesa [Digital twins: concept, types and benefits for business]. *Kollokvium-zhurnal* [Colloquium Journal], 2019, no. 10 (34), pp. 31–35. DOI: 10.24411/2520-6990-2019-10264
6. Maryasin O. Yu. Razrabotka ontologiy tsifrovogo dvoynika zdaniy [Development of ontologies for the digital twin of buildings]. *Ontologiya dizayna* [Ontology of Design], 2019, vol. 9, no. 4 (34), pp. 480–495.
7. Makarov V. L., Bakhtizin A. R., Beklaryan G. L. Razrabotka tsifrovyykh dvoynikov dlya proizvodstvennykh predpriyatiy [Development of digital twins for manufacturing enterprises]. *Biznes-informatika* [Business Informatics], 2019, no. 13 (4), pp. 7–16.
8. Bamberg A., Urbas L., Breker S., Kokmann N., Borts M. Chto delaet tsifrovogo dvoynika genialnym kompanynom [What makes the digital twin an ingenious companion]. *ChemieIngenieurTechnik* [ChemieIngenieurTechnik], 2019.
9. Skorbit M. *Istoki kontseptsii tsifrovogo dvoynika* [The origins of the digital twin concept], 2016. 10.13140/RG.2.2.26367.61609.
10. Petrov A. V. Imitatsiya kak osnova tekhnologii tsifrovyykh dvoynikov [Imitation as the basis of digital twin technology]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 22, no. 10 (141), pp. 56–66.
11. Brumshteyn Yu. M., Aksenova Yu. Yu., Ivanova M. V. Sistemnyy analiz napravleniy funktsionalnykh vozmozhnostey metodov issledovaniya dvizheniy chastey tela cheloveka [System analysis of the function and functionality of methods for studying movements of parts of the human body]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii nomer* [Caspian journal: management and high technologies], 2014, no. 3 (27), pp. 80–98.
12. Chimino K. N., Luka E. F. Obzor prilozheniy tsifrovyykh dvoynikov na proizvodstve [Overview of digital twin applications in manufacturing]. *Kompyutery v promyshlennosti* [Industrial computers], 2019. 113.103130.10.1016/j.compind.2019.103130.
13. Shchekochikhin O. V., Shvedenko V. V., Shvedenko P. V. Ontologiya kontseptov informatsionnoy sistemy s povedeniem [Ontology of concepts of an information system with behavior]. *Vestnik Povolzhya* [Bulletin of the Volga region], 2016, no. 5, pp. 223–226.
14. Lyu Ya., Chzhan I., Ren Sh., Yan M., Van Yu., Khuysin D. Kak intellektualnye tekhnologii mogut sposobstvovat ustoychivomu upravleniyu zhiznennym tsiklom produktsii [How does smart technology create sustainable product living standards]. *Zhurnal chistogo proizvodstva* [Cleaner Production Journal], 2019. 119423.10.1016/j.jclepro.2019.119423.
15. Tao F., Ci K. Sozdavayte bolshe tsifrovyykh dvoynikov [Create more digital twins]. *Priroda* [Nature], 2019, p. 573.
16. Vinsent Kh., Benua Zh., Mark L., Devid B. Tsifrovoy dvoynik i virtualnaya arealnost: sreda sovmestnogo modelirovaniya dlya proektirovaniya i otsenki promyshlennykh rabochikh stantsiy [Digital analyzer and virtual reality: modeling environment for industrial plant design and evaluation]. *Issledovaniya proizvodstva i proizvodstva* [Researches of Manufacturing and Manufacturing], 2019, vol. 7, no. 1, pp. 472–489, DOI: 10.1080/21693277.2019.1660283.
17. Shimanski K. M., Gabriele M. M. Prodvizhenie tsifrovoy avtomatizatsii uslug nastroyki na zakaz na malykh i srednikh predpriyatiyakh otrasli stroitel'nogo oborudovaniya: podkhod k issledovaniyam v oblasti dizayna [Promotion of digital bespoke services for small and medium-sized enterprises in the construction equipment industry: an approach to design research]. *Prikladnye nauki* [Applied Sciences], 2019. 9.3780.10.3390/app9183780.
18. Ashtari T., Bekhrang Yu., Tobias L., Bendzhamin S., Nada D., Nasser Sh., Volfgang V., Mikhael M. Arhitektura intellektual'nogo tsifrovogo dvoynika v kiberfizicheskoy proizvodstvennoy sisteme [The architecture of an intelligent digital twin in a cyber-physical production system]. *Automatisierungstechnik* [Automatisierungstechnik], 2019, no. 67, pp. 762–782. 10.1515/avto-2019-0039.
19. Wang L. Yu., Yu L., Gao R. Kh., Li K., Chzhan L. Tsifrovoy dvoynik dlya diagnostiki neispravnostey vrashchayushchegosya oborudovaniya v intellektualnom proizvodstve [Digital Twin for Diagnosing Rotating Equipment Fault in Smart Manufacturing]. *Int. J. Prod. Res.*, 2019, no. 57, pp. 3920–3934.
20. Shvedenko V., Volkov A. Metod generatsii tsifrovyykh dvoynikov na osnove agregirovaniya informatsionnykh obektov [A method for generating digital twins based on the aggregation of information objects]. *Avtomaticheskaya dokumentatsiya i matematicheskaya lingvistika* [Automatic documentation and mathematical linguistics], 2019, no. 53, pp. 122–126. 10.3103/S0005105519030038.