

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА «АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

А. В. Кайченев, М. О. Емашев✉, А. А. Яроцкая

*Кафедра автоматике и вычислительной техники, emashevmo@mauniver.ru;
ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», Мурманск, Россия*

Ключевые слова: двигатель постоянного тока; имитационное моделирование; лабораторный стенд; образование; цифровой двойник.

Аннотация: В настоящее время приоритетным направлением развития университетов является цифровая трансформация образовательного процесса. Возникает потребность в создании виртуальных пространств и виртуальных лабораторий для обучения студентов. Рассмотрено проектное решение по созданию цифрового двойника лабораторного стенда «Автоматическая система регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока». Выявлены причины, по которым целесообразно разрабатывать цифровые двойники лабораторных стендов в вузах. Выбрана среда разработки. Проведены эксперименты моделирования частоты вращения двигателя постоянного тока и моделирование частоты вращения двигателя с постоянными магнитами с подключением к лабораторному стенду в реальном времени.

Введение

Учебные стенды – важная часть материально-технического обеспечения университета, так как с их помощью обучающиеся приобретают новые навыки и компетенции. Из-за сложного устройства учебные стенды требуют специального обслуживания. Поэтому в настоящее время все больше предприятий и образовательных учреждений направляют вектор развития в цифровую трансформацию образовательного процесса.

Разработка цифровых двойников является новым направлением развития рынка виртуальных технологий в образовании. Из-за недостатка на рынке цифровых аналогов учебного оборудования требуется проведение работ по разработке виртуальных лабораторий и учебных стендов.

Причины, по которым целесообразно разрабатывать цифровые двойники лабораторных стендов в вузах [1]:

- увеличение доступности обучения: цифровые двойники позволяют студентам иметь доступ к наиболее востребованным лабораторным стендам в любое время и из любой точки мира;
- экономическая эффективность: цифровые двойники могут сэкономить деньги на оборудовании, обучении и перевозке, их обслуживании и поддержке;
- возможность углубления и расширения знаний: виртуальность позволяет студентам углубить свои знания в конкретной области, а также освоить материал из других дисциплин;

- безопасность: использование цифровых двойников позволяет избежать опасности для студентов, связанной с взаимодействием с реальным оборудованием;
- универсальность: цифровые двойники могут быть адаптированы для разных дисциплин и настроены на нужды конкретной группы студентов;

Некоторые клиники используют медицинские цифровые двойники для обучения сотрудников. В исследовании [2] студентами инженерных направлений отмечены положительные стороны использования цифровых двойников в обучении.

Концепция цифровых двойников находится в третьем поколении, где искусственный интеллект и алгоритмы глубокого обучения используют онлайн-данные. Цифровые двойники первого поколения представляли собой виртуальные презентации, основанные на языках сценариев, а цифровые двойники второго поколения, представленные в 2012 году, были в большей степени ориентированы на моделирование [3]. В дополнение к представлению отдельных систем, цифровые двойники способны объединять отдельные цифровые двойники для представления полных заводов, цепочек поставок, аэропортов и умных городов [4]. Международная организация по стандартизации (ISO) определила стандарты для системы цифровых двойников в 2021 году [5], и стандартизация является показателем цифрового двойника как зрелой концепции.

Современные инженерные курсы основываются на практической проектной деятельности, в высшей степени ориентированной на разработку и тестирование реального продукта «цифрового двойника» [6]. В работе [7] введено понятие «системно-ориентированная разработка продукта» (*англ.* Systems-Drive Product Development – SDPD) – это современная методология, основанная на моделировании, которая позволяет объединить различные этапы разработки сложных систем и повторно использовать созданные модели для проектирования новых продуктов в будущем. При таком подходе весь процесс разработки системы поддерживается в рамках единого проекта, где все созданные модели взаимосвязаны и, следовательно, влияют друг на друга [8].

Результаты исследований [9] показали, что каждая область инфраструктуры и организаций подходит к разработке цифровых двойников с разной точки зрения: цифровой двойник как концепция и следующий шаг цифровой трансформации; с другой точки зрения, цифровой двойник – как реалистичное представление актива в реальном времени.

В исследовании [10] виртуальные лаборатории зарекомендовали себя как эффективный инструмент инженерного образования для дистанционного обучения, открывающий новые возможности и для совершенствования процесса очного обучения.

Объекты и методы

Цифровой двойник изделия (ЦДИ) лабораторного стенда «Автоматическая система регулирования (АСР) двигателя постоянного тока» (*далее* – лабораторный стенд) предназначен для обучения теории автоматического управления.

Устройство позволяет:

- приобрести компетенции для достижения результатов обучения;
- повысить квалификацию обучающихся;
- проводить дистанционные эксперименты вне учебной аудитории, используя полноценную замену реального физического стенда, аналогичного по качеству очному обучению;
- упростить восприятие экспериментальных исследований, благодаря пользовательскому интерфейсу интуитивно понятному обучающимся;
- сохранять и обрабатывать данные в файл электронной таблицы;

– упростить запоминание изучаемого материала через взаимодействие с адекватной имитационной моделью.

На первом этапе исследовался объект моделирования – ЦДИ лабораторного стенда, с помощью которого проводилась серия лабораторных работ по дисциплине «Теория автоматического управления» (рис. 1) [11]. Объектом управления лабораторного стенда являются маломощные двигатели постоянного тока (ДПТ) QX-RS-385-2073 (рис. 2) [12]. При исследовании объекта управления применялись методы математического и компьютерного моделирования.

Для обработки данных использовались статистический анализ и визуализация данных для представления результатов испытаний и анализа. Проведен анализ среды разработки Unity 3D и выявлены следующие преимущества:

- множество обучающего материала;
- большой выбор функций;
- удобный интерфейс для создания пользовательских интерфейсов;
- широкий выбор платформ для разработки;
- надежность и стабильность [13].

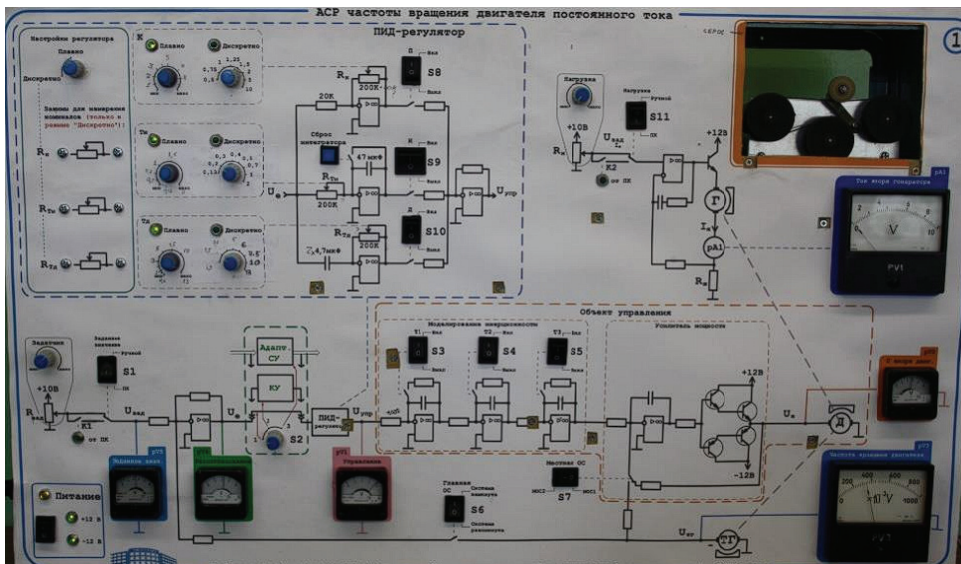


Рис. 1. Лабораторный стенд «Автоматическая система регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока»

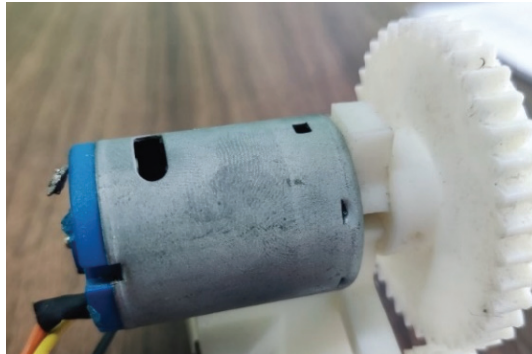


Рис. 2. Двигатель постоянного тока QX-RS-385-2073

Результаты и обсуждение

В результате исследования разработан ЦДИ лабораторного стенда. Проведены эксперименты, направленные на испытания изделия. Цифровой двойник позволяет моделировать процессы в лабораторном стенде и осуществлять двухстороннюю информационную связь в реальном времени. Полученные данные сохраняются в файл в формате CSV. Структура цифрового двойника представлена на рис. 3.

Эксперимент, проводимый по заданным методикам, включал в себя обработку и анализ результатов экспериментальных данных и составление описания выполненных исследований [14].

Моделирование переходного процесса проводилось для двигателя постоянного тока ПМ51 с заданными параметрами ПИД-регулятора и моделированием инерционности 2-го порядка при частоте вращения 900 об/мин. Параметры ДПТ ПМ51 при моделировании представлены на рис. 4. Взаимодействие пользователя с ЦДИ начинается с ввода параметров ДПТ в окне настроек, настроек ПИД-регулятора, указания вида моделируемой инерционности и наличия главной обратной связи (рис. 5).

Во время тестовой эксплуатации цифрового двойника получен график переходного процесса двигателя в реальном времени, который представлен на рис. 6.

Результатом проведенных испытаний является CSV-файл с данными переходного процесса (рис. 7). Эксперимент по выявлению возможных проблем регистрации данных в реальном времени с ЦДИ «АСР частоты вращения двигателя с постоянными магнитами» позволил получить переходный процесс, представленный на рис. 8.

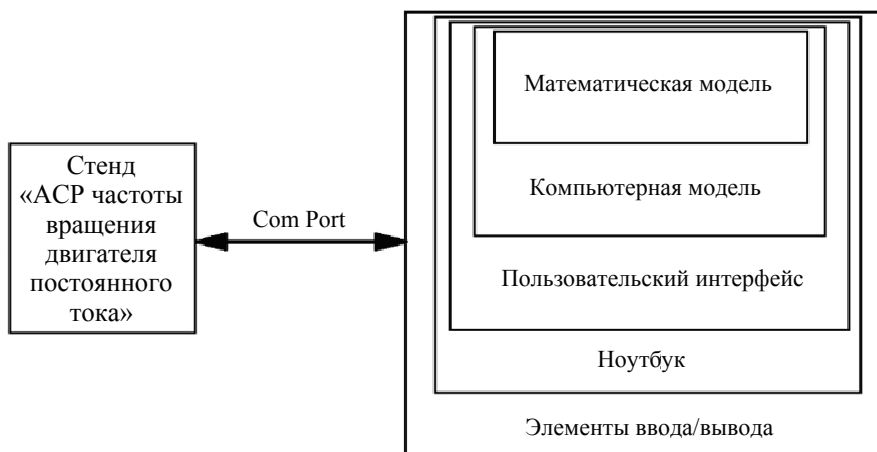


Рис. 3. Структура цифрового двойника

Ra	0,28
Ta	0,0017
F	0,008399
Cm	133,57
Tm	0,233

Рис. 4. Окно настроек значений ДПТ

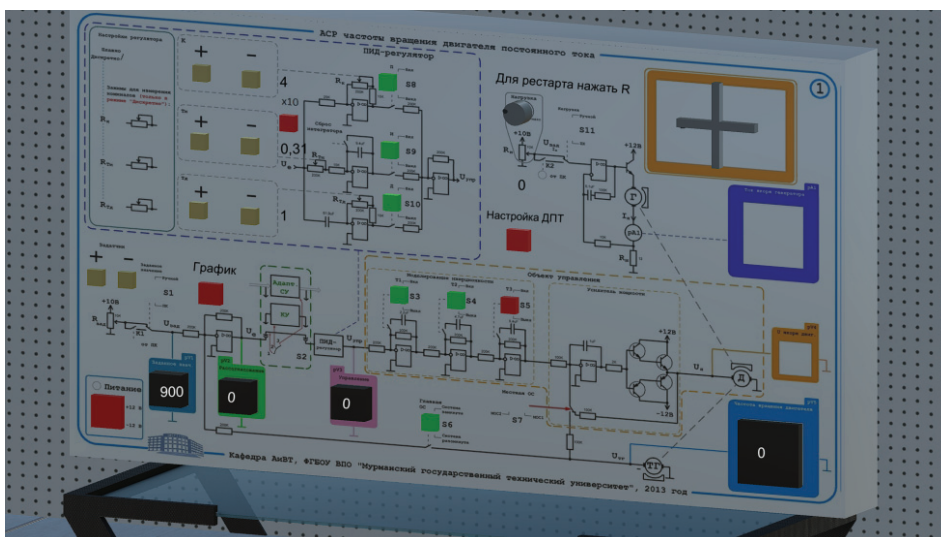


Рис. 5. Вид ЦДИ с настроенными параметрами при моделировании

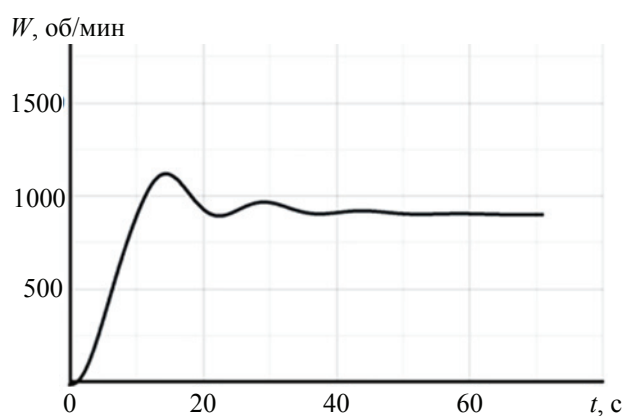


Рис. 6. График переходного процесса в реальном времени

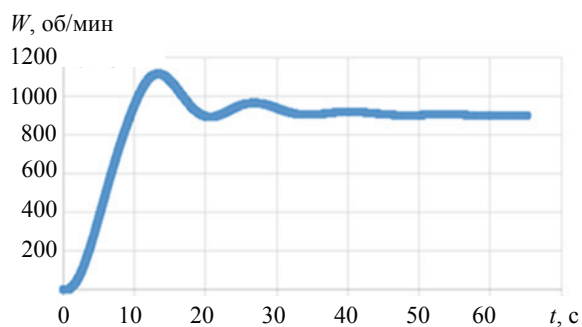


Рис. 7. Результаты эксперимента и переходная характеристика, построенная по данным эксперимента

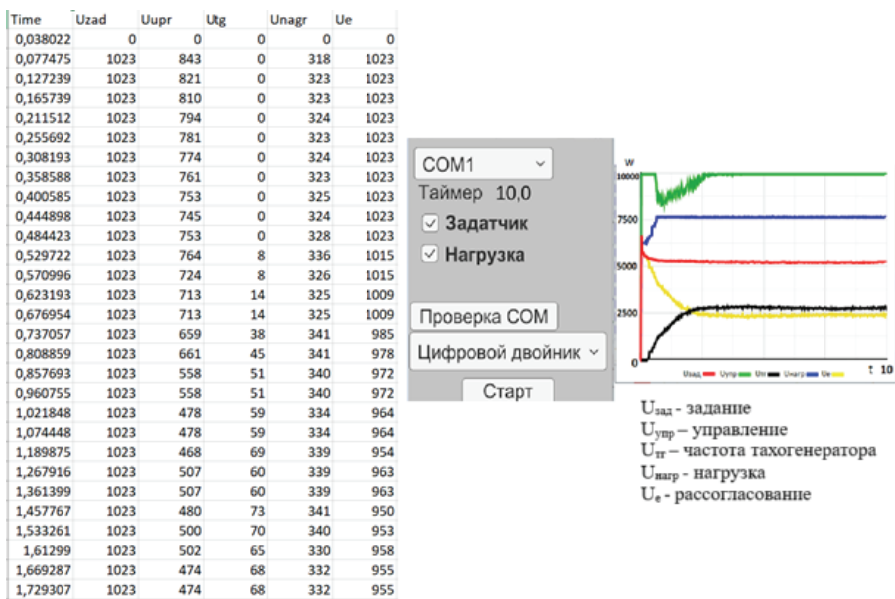


Рис. 8. Результаты эксперимента регистрации данных в реальном времени

Заключение

Разработан и исследован цифровой двойник лабораторного стенда «Автоматическая система регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока». Предложенное решение позволяет закрыть нехватку учебных цифровых двойников и проводить дистанционные занятия для заочной формы обучения. Получена математическая модель, описывающая управление частотой двигателя постоянного тока. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665912. Данное решение в перспективе можно использовать на смартфонах и планшетах пользователей.

Совершенствование математической модели позволит исследовать ДПТ другой мощности, других видов, что значительно расширит закрепленные на практике компетенции обучающихся. С помощью модернизации программного обеспечения цифрового двойника возможна реализация способов управления с применением корректирующих устройств и адаптивных систем управления, которые сложны в аппаратной реализации лабораторного стенда.

Исследование выполнено в рамках инициативной НИОКР № 124041100082-5.

Список литературы

1. Комиссаров, В. И. Использование цифровых двойников для обучения студентов в вузах Российской Федерации / В. И. Комиссаров, Г. Ф. Шулико, Д. С. Павлов // Инновационные механизмы управления цифровой и региональной экономикой : материалы V Междунар. студ. науч. конф., Москва, 15–16 июня 2023 г. – М., 2023. – С. 131 – 137.
2. Liljaniemi, A. Using Digital Twin Technology in Engineering Education – Course Concept to Explore Benefits and Barriers / A. Liljaniemi, H. Paavilainen // Open Engineering. – 2020. – Vol. 10, No. 1. – P. 377 – 385. doi: 10.1515/eng-2020-0040
3. Common Educational Teleoperation Platform for Robotics Utilizing Digital Twins / T. Kaarlela [et al.] // Machines. – 2022. – Vol. 10, No. 7. – P. 577. doi: 10.3390/machines10070577

4. Alcaraz, C. Digital Twin: A Comprehensive Survey of Security Threats / C. Alcaraz, J. Lopez // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, No. 3. – P. 1475 – 1503. doi: 10.1109/COMST.2022.3171465
5. ISO 23247-1:2021. Automation Systems and Integration – Digital Twin Framework for Manufacturing. Part 1: Overview and General Principles. – International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2000. – URL : <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/75066/29271dec129c4c1c9569f961bfa4963d/ISO-23247-1-2021.pdf> (дата обращения: 17.03.2025).
6. Implementation of “Digital Twin” Concept for Modern Project-Based Engineering Education / S. Nikolaev [et al.] // In book: Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0: 15th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2018, Turin, Italy, July 2-4, 2018 ; IFIP Advances in Information and Communication Technology. – Springer International Publishing, 2018. – P. 193 – 203. doi: 10.1007/978-3-030-01614-2_18
7. Challenges and Opportunities within Simulation-Driven Functional Product Development and Operation / J. Pavasson [et al.] // Procedia CIRP. – 2014. – Vol. 22, No. 1. – P. 169 – 174. doi: 10.1016/j.procir.2014.06.149
8. Functional Product Development: what Information Should Be Shared During the Development Process? / J. Lindström, M. Löfstrand, M. Karlberg, L. Karlsson // International Journal of Product Development. – 2012. – Vol. 16, No. 2. – P. 95 – 111. doi: 10.1504/IJPD.2012.049059
9. Broo, D. G. Digital Twins in Infrastructure: Definitions, Current Practices, Challenges and Strategies / D. G. Broo, J. M. Schooling // International Journal of Construction Management. – 2021. – Vol. 23, No. 11. – P. 1254 – 1263. doi: 10.1080/15623599.2021.1966980
10. Rassudov, L. Virtual Labs: An Effective Engineering Education Tool for Remote Learning and not only / L. Rassudov, A. Korunets // 29th International Workshop on Electric Drives: Advances in Power Electronics for Electric Drives (IWED). – 2022. – P. 1 – 4. doi: 10.1109/IWED54598.2022.9722375
11. Модернизация учебно-лабораторного стенда «АСР частоты вращения ДПТ» / А. В. Власов, А. Р. Власова, А. В. Кайченев, А. А. Маслов, В. А. Бауэр // Наука и образование – 2013 : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Мурманск, 4 – 11 марта 2013 г. – Мурманск, 2013. – С. 36 – 41.
12. Лабораторный стенд «Автоматическая система регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока». Программные и аппаратные средства / А. В. Кайченев, А. В. Власов, А. А. Маслов, А. Р. Власова, И. Ю. Селяков // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. : в 4-х томах. Том 2. Курск, 19 – 21 марта 2014 г. – Мурманск, 2014. – С. 154 – 157.
13. Топорков, С. Е. Обзор среды разработки компьютерных игр Unity 3D / С. Е. Топорков, Н. А. Мотько // Мировые научные исследования и разработки в эпоху цифровизации : сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. Часть 1, Ростов-на-Дону, 25 ноября 2021 г. – Ростов н/Д, 2021. – С. 231–232.
14. Исследование динамических свойств АСР : метод. указания к выполнению лаб. работ по курсу «Теория автоматического управления» для специальности 210200 «Автоматизация технологических процессов и производств» / сост. А. А. Маслов, В. В. Яценко. – Мурманск : МГТУ, 2004. – 21 с.

Development and Research of the Digital Twin of the Laboratory Stand “Automatic System to Regulate the Rotation Frequency of a DC Motor”

A. V. Kaichnov, M. O. Emashev✉, A. A. Yarotskaya

Department of Automation and Computer Engineering, emashevmo@mauniver.ru;
Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia

Keywords: DC motor; simulation modeling; laboratory stand; education; digital twin.

Abstract: Currently, the priority direction of university development is the digital transformation of the educational process. There is a need to create virtual spaces and virtual laboratories for teaching students. The design solution for creating a digital twin of the laboratory stand "Automatic system for regulating the rotation frequency of a DC motor" is considered. The reasons for which it is advisable to develop digital twins of laboratory stands in universities have been identified. The development environment is selected. Experiments are conducted to simulate the rotation frequency of a DC motor and to simulate the rotation frequency of a motor with permanent magnets with connection to the laboratory stand in real time.

References

1. Komissarov V.I., Shuliko G.F., Pavlov D.S. *Innovatsionnyye mekhanizmy upravleniya tsifrovoy i regional'noy ekonomikoy: materialy V Mezhdunar. stud. nauch. konf.* [Innovative mechanisms for managing the digital and regional economy: Proc. V Int. Student Scientific Conf.], Moskva, 15-16 June 2023, Moscow, 2023, pp. 131-137. (In Russ.)
2. Liljaniemi A., Paavilainen H. Using Digital Twin Technology in Engineering Education – Course Concept to Explore Benefits and Barriers, *Open Engineering*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 377-385. doi: 10.1515/eng-2020-0040
3. Kaarlela T. [et al.] Common Educational Teleoperation Platform for Robotics Utilizing Digital Twins, *Machines*, 2022, vol. 10, no. 7, pp. 577. doi: 10.3390/machines10070577
4. Alcaraz C., Lopez J. Digital Twin: A Comprehensive Survey of Security Threats, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 1475-1503. doi: 10.1109/COMST.2022.3171465
5. ISO 23247-1:2021. *Automation Systems and Integration – Digital Twin Framework for Manufacturing. Part 1: Overview and General Principles*, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2000, available at: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/75066/29271dec129c4c1c9569f961bfa4963d/ISO-23247-1-2021.pdf> (accessed 17 March 2025).
6. Nikolaev S. [et al.] Implementation of “Digital Twin” Concept for Modern Project-Based Engineering Education, In book: *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0: 15th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2018, Turin, Italy, July 2-4, 2018* ; IFIP Advances in Information and Communication Technology, Springer International Publishing, 2018, pp. 193-203. doi: 10.1007/978-3-030-01614-2_18
7. Pavasson J. [et al.] Challenges and Opportunities within Simulation-Driven Functional Product Development and Operation, *Procedia CIRP*, 2014, vol. 22, no. 1, pp. 169-174. doi: 10.1016/j.procir.2014.06.149

8. Lindström J., Löfstrand M., Karlberg M., Karlsson L. Functional Product Development: what Information Should Be Shared During the Development Process? *International Journal of Product Development*, 2012, vol. 16, no. 2, pp. 95-111. doi: 10.1504/IJPD.2012.049059

9. Broo D.G., Schooling J.M. Digital Twins in Infrastructure: Definitions, Current Practices, Challenges and Strategies, *International Journal of Construction Management*, 2021, vol. 23, no. 11, pp. 1254-1263. doi: 10.1080/15623599.2021.1966980

10. Rassudov L., Korunets A. Virtual Labs: An Effective Engineering Education Tool for Remote Learning and not only, *29th International Workshop on Electric Drives: Advances in Power Electronics for Electric Drives (IWED)*, 2022, pp. 1-4. doi: 10.1109/IWED54598.2022.9722375

11. Vlasov A.V., Vlasova A.R., Kaychenov A.V., Maslov A.A., Bauer V.A. *Nauka i obrazovaniye – 2013: materialy Mezhdunar. nauch.-tekh. konf.* [Science and Education - 2013: Proc. Int. Scientific-Technical Conf.], Murmansk, 4-11 March 2013, Murmansk, 2013, pp. 36-41. (In Russ.)

12. Kaychenov A.V., Vlasov A.V., Maslov A.A., Vlasova A.R., Selyakov I.Yu. *Sovremennyye instrumental'nyye sistemy, informatsionnyye tekhnologii i innovatsii: sb. nauch. tr. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern instrumental systems, information technologies and innovations: Collection of scientific papers of the XI Int. Scientific-Practical. Conf.], In 4 vols., vol. 2. Kursk, 19-21 March 2014, Murmansk, 2014, pp. 154-157. (In Russ.)

13. Toporkov S.Ye., Mot'ko N.A. *Mirovyye nauchnyye issledovaniya i razrabotki v epokhu tsifrovizatsii: sb. st. XV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [World scientific research and development in the digitalization era: Collection Art. XV Int. Scientific and Practical. Conf.], Part 1, Rostov-na-Donu, 25 November 2021, Rostov n/D, 2021, pp. 231-232. (In Russ.)

14. Maslov A.A., Yatsenko V.V. *Issledovaniye dinamicheskikh svoystv ASR: metod. ukazaniya k vypolneniyu lab. rabot po kursu «Teoriya avtomaticheskogo upravleniya» dlya spetsial'nosti 210200 «Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv»* [Study of the dynamic properties of ACS: method. instructions for completing lab work on the course "Automatic Control Theory" for specialty 210200 "Automation of Technological Processes and Production"], Murmansk : MGTU, 2004, 21p. (In Russ)

Entwicklung und Erforschung des digitalen Zwillingslaborstandes „Automatisches System der Drehzahlregelung des Gleichstrommotors“

Zusammenfassung: Derzeit liegt die vorrangige Richtung der Universitätsentwicklung auf der digitalen Transformation des Bildungsprozesses. Es besteht die Notwendigkeit, virtuelle Räume und virtuelle Labore für die Ausbildung der Studierenden zu schaffen. Es ist eine Designlösung zur Erstellung eines digitalen Zwillings des Laborstandes „Automatisches System zur Regelung der Drehfrequenz des Gleichstrommotors“ betrachtet. Die Gründe, warum es ratsam ist, digitale Zwillinge von Laborständen an Universitäten zu entwickeln, sind identifiziert. Die Entwicklungsumgebung ist ausgewählt. Es sind Experimente durchgeführt, um die Drehfrequenz des Gleichstrommotors und die Drehfrequenz des an einen Laborständer angeschlossenen Permanentmagnetmotors in Echtzeit zu simulieren.

Développement et recherche d'un double numérique d'un stand de laboratoire «Système de régulation automatique du régime moteur à courant continu»

Résumé: Actuellement, la priorité du développement des universités est la transformation numérique du processus éducatif. Il est nécessaire de créer des espaces virtuels et des laboratoires virtuels pour éduquer les étudiants. Est examinée la solution de conception pour la construction du double numérique du stand de laboratoire «Système de régulation automatique de la vitesse du moteur à courant continu». Sont identifiées les raisons pour lesquelles il est conseillé de développer des doubles numériques des stands de laboratoire dans les universités. Est sélectionné l'environnement de développement. Sont réalisées des expériences de simulation de la vitesse du moteur à courant continu et de simulation de la vitesse du moteur à aimant permanent avec connexion au banc de laboratoire en temps réel.

Авторы: *Кайченoв Александр Вячеславович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации и вычислительной техники; *Емашев Максим Олегович* – инженер-программист кафедры автоматизации и вычислительной техники; *Яроцкая Александра Андреевна* – ассистент кафедры автоматизации и вычислительной техники, ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», Мурманск, Россия.