

Анализ подходов к созданию лабораторий дистанционного автоматизированного управления физическими объектами

И. Н. Изотов

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Российская Федерация
Адрес: 620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
ilya.izotov@urfu.ru

Аннотация

Работа посвящена обзору подходов (технологий и методов) применяемых для создания систем удаленных лабораторий, позволяющих дистанционно управлять физическими объектами. В качестве физических объектов понимаются устройства Интернета вещей, то есть микропроцессорные системы, оснащенные инфокоммуникационными технологиями для взаимодействия друг с другом и внешней средой. В связи с неблагоприятной эпидемиологической обстановкой, вызванной коронавирусной инфекцией COVID-19, преподаватели и студенты были вынуждены работать дистанционно. Однако, изучение некоторых учебных дисциплин требует доступ к физическому оборудованию и сетевым сервисам. В такой ситуации предлагается использовать удаленную лабораторию, т. е. аппаратно-программный комплекс, предоставляющий доступ к лабораторному оборудованию, находящемуся в месте физического расположения лаборатории, и позволяющий пользователю проводить работы удаленно. Данные системы также облегчают организацию обучения студентов, у которых нет возможности присутствовать в лаборатории. Цель работы — проанализировать и систематизировать существующие подходы, применяемые при создании удаленных лабораторий, и предложить собственный подход к созданию стенда для дистанционной работы с устройствами Интернета вещей. В статье проводится исторический обзор и анализ научных работ, посвященных созданию удаленных лабораторий. Рассмотрено 12 лабораторий с удаленным доступом, применяющихся для обучения и проведения исследований с аналоговой и цифровой электроникой, микроконтроллерными устройствами и физическими объектами. Среди рассмотренных удаленных лабораторий не выявлено систем, которые были бы ориентированы на исследование технологий Интернета вещей. Рассмотренные системы использовали IoT-технологии для организации связи между лабораторным оборудованием и пользователями. Однако пользователи лабораторий не используют платформы Интернета вещей для экспериментов, не исследуют технологии связи и межмашинное взаимодействие. На основании анализа научных работ предложена концепция цифрового-двойника — удаленной лаборатории для изучения дисциплин, связанных с технологиями Интернета вещей.

Ключевые слова: удаленная лаборатория, Интернет вещей, микроконтроллерная система, удаленный стенд, дистанционное обучение, управление устройствами, межмашинное взаимодействие

Благодарности: автор выражает особую благодарность своему научному руководителю к.п.н., доценту Уральского федерального университета Папуловской Наталье Владимировне за ценные советы при планировании исследования и рекомендации по оформлению статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Изотов И. Н. Анализ подходов к созданию лабораторий дистанционного автоматизированного управления физическими объектами // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2023. Т. 19, № 3. С. 646-658. <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202303.646-658>

© Изотов И. Н., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Analysis of Approaches to the Creation of Laboratories for Remote Automated Control of Physical Objects

I. N. Izotov

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

Address: 19 Mira St., Yekaterinburg 620002, Russian Federation

ilya.izotov@urfu.ru

Abstract

The paper presents a review of the approaches (technologies and methods) used to create remote laboratory systems that allow for remote control of physical objects. Physical objects are Internet of Things devices, that is, microprocessor systems equipped with communication technologies for interacting with each other and the environment. COVID-19 caused an unfavorable epidemiological situation, forcing teachers and students to work remotely. However, the study of some academic disciplines requires access to physical equipment and network services. In such a situation, it is proposed to use a remote laboratory, i.e., a hardware and software complex that provides access to laboratory equipment located in the physical laboratory and allows the user to perform remote work. These systems also facilitate the organization of education for students who do not have the opportunity to be present in the laboratory. The purpose of the work is to analyze and systematize the existing approaches used to create remote laboratories and propose our own approach to creating a stand for remote control of IoT devices. The article provides a historical overview and analysis of scientific works dedicated to the creation of remote laboratories. The study considers 12 remote laboratories that use analog and digital electronics, microcontroller devices, and physical objects for teaching and research. Among the studied remote laboratories, no systems were oriented towards IoT technology research. These systems used IoT technologies to organize communication between laboratory equipment and users. However, laboratory users did not use IoT platforms for experiments, did not research communication technologies, and machine-to-machine interaction. Based on the analysis of scientific works, a concept of a digital twin — a remote laboratory for studying IoT technologies — is proposed.

Keywords: remote access laboratory, Internet of Things, microcontroller system, remote bench, distance learning, devices control, M2M

Acknowledgments: the author expresses special gratitude to his scientific supervisor, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Ural Federal University Natalya Vladimirovna Papulovskaya for valuable advice in planning the study and recommendations on the preparation of the article.

Conflict of interests: The author declares no conflict of interests.

For citation: Izotov I.N. Analysis of Approaches to the Creation of Laboratories for Remote Automated Control of Physical Objects. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2023;19(3):646-658. <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202303.646-658>



Введение

Возникновение эпидемии, вызванной коронавирусной инфекцией COVID-19, изменило профессиональную и образовательную жизнь людей. Перед работодателями и руководителями образовательных учреждений резко встал вопрос о необходимости дистанционного взаимодействия с целью сокращения рисков заражения. Вынужденный переход с очного и гибридного (смешанного) формата занятий исключительно на дистанционное обучение повлиял на качество академического образования из-за возникновения проблем методической готовности педагогов [1]. Дистанционное образование имеет большой потенциал развития для решения существующих и новых задач образовательных организаций, однако для этого необходимо разрабатывать и улучшать как методики обучения, так и цифровые инструменты и технологии [2].

Некоторые технические сферы деятельности в силу специфики трудно перевести на удаленный формат. Например, это касается учебных работ, проводимых с помощью специального лабораторного оборудования. Дистанционный формат лишает студентов доступа к оборудованию, сокращает общение с преподавателем и поэтому снижает эффективность обучения [3]. В такую техническую сферу входят дисциплины, предметом изучения которых является Интернет вещей.

Интернет вещей (англ. Internet of Things, IoT) — это инфраструктура взаимосвязанных сущностей, систем и информационных ресурсов, а также служб, позволяющих обрабатывать информацию о физическом и виртуальном мире и реагировать на нее¹. Устройства Интернета вещей — это микропроцессорные системы, оснащенные инфокоммуникационными технологиями для взаимодействия друг с другом и внешней средой.

Дисциплины, связанные с технологиями Интернета вещей, нацелены на изучение принципов разработки устройств IoT и методов взаимодействия с этими устройствами с помощью сетевых технологий и сервисов. В рамках данной дисциплины студенты работают с лабораторным оборудованием (подключают к отладочной плате с микроконтроллером электронные компоненты и модули — датчики и актуаторы), программируют микроконтроллерные устройства (STM32/ESP8266/ESP32, язык программирования C/C++/Arduino), взаимодействуют с сетевыми сервисами и платформами IoT (MQTT Mosquitto, Node-RED и др.). Например, в одной из лабораторных работ студенты разрабатывают встроенное ПО для системы автоматического полива комнатного растения с удаленным управлением и передачей телеметрии по сетевому протоколу MQTT.

В условиях дистанционного обучения проводить подобные лабораторные занятия затруднительно. На данный момент не разработано универсальное решение, позволяющее проводить обучение технологиям Интернета вещей в онлайн-ре-

жиме. Образовательная организация не имеет возможности предоставить студентам персональный набор оборудования, как предложено в работе [4]. Существующие средства для эмуляции микроконтроллерных устройств (например, симулятор среды разработки Mbed²) позволяют научиться программированию микроконтроллеров, но ограничивают взаимодействие с программными сервисами Интернета вещей, требующими внешнего подключения. Проведение удаленных занятий без выполнения практических упражнений снижает эффективность обучения, потому что студентам труднее закрепить теоретический материал. Появляется явное противоречие в стремлении, с одной стороны, сохранить здоровье людей в случае пандемии, а с другой стороны, улучшить качество образования по дисциплинам, требующим использования лабораторного оборудования.

Создание удаленных лабораторий является одним из методов дистанционного обучения. Удаленная лаборатория — это аппаратно-программный комплекс, предоставляющий онлайн-доступ к лабораторному оборудованию, находящемуся в месте физического расположения лаборатории, и позволяющий пользователю проводить работы удаленно. Данные системы облегчают процесс обучения для иностранных студентов и тех, кто не может физически присутствовать в учебном заведении. Подобные лаборатории существуют как в РФ (Лаборатория электронных средств обучения СибГУТИ³), так и за рубежом (платформа удаленных лабораторий LabsLand⁴). Для организации стендов в таких лабораториях требуются как физические объекты (отладочная макетная плата, веб-камера и др.), так и программная часть, обеспечивающая доступ удаленного пользователя к стенду.

Проектирование и построение удаленной лаборатории требует исследования существующих аналогичных систем. Поэтому цель данной работы — проанализировать и систематизировать существующие подходы (технологии и методы), применяемые для создания онлайн-лабораторий, позволяющих удаленно управлять физическими объектами и предложить собственный подход к созданию стенда для лаборатории с удаленным доступом, предназначенной для дистанционной работы с устройствами Интернета вещей.

Исторический обзор

Удаленные лаборатории (или лаборатории с удаленным доступом, remote access laboratory) являются одним из методов решения образовательных задач и проведения экспериментов. В отличие от виртуальных лабораторий (например, таких как Labster⁵), в которых взаимодействие происходит с эмуляцией исследуемой системы, удаленная лаборатория предоставляет дистанционный доступ к реальным испытательным стендам и измерительным приборам. Пользователь проводит работы

¹ ГОСТ Р 70036-2022 Информационные технологии. Интернет вещей. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 марта 2022 г. № 118-ст: введен впервые: дата введения 2022-04-01. М. : Госстандарт России, 2022. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 50 с.

² Mbed Simulator: симулятор запуска приложений Mbed OS 5 [Электронный ресурс]. URL: <https://simulator.mbed.com/> (дата обращения: 29.08.2023).

³ Лаборатория Электронных Средств Обучения (ЛЭСО) СибГУТИ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.labfor.ru/> (дата обращения: 29.08.2023).

⁴ LabsLand: платформа для доступа к удаленным лабораториям [Электронный ресурс]. URL: <https://labsland.com/> (дата обращения: 29.08.2023).

⁵ Labster: платформа с виртуальными лабораториями [Электронный ресурс]. URL: <https://www.labster.com/> (дата обращения: 29.08.2023).



на реальном оборудовании, находящемся в месте физического расположения лаборатории. Для определения требований к созданию стенда лаборатории Интернета вещей необходимо провести анализ подходов и технологий, применяемых другими учеными и преподавателями.

Лаборатории с удаленным доступом стали появляться в середине 90-х годов прошлого века с развитием сетевых технологий [5]. Одним из первых успешных результатов создания удаленной лаборатории стала разработка ученых в Австралии. В 1994 году Тейлор и Тревельян из Университета Западной Австралии (The University of Western Australia) разработали телеробота [6]. Ученые настроили веб-сервер для управления роботом ASEA IRb-6 через сеть Интернет. Робот перемещал на рабочем месте деревянные бруски. Оператор через веб-страницу отправлял команды телероботу и отслеживал результат работы по принятым фотографиям с камер. В России работы по созданию лабораторий с удаленным доступом также осуществляются начиная с 1995 г. В МГТУ им. Н. Э. Баумана были созданы удаленные лаборатории «Радиотелескоп МГТУ», «Испытание материалов», «Спектрометрия плазмы» [7].

Пандемия COVID-19 привела к ускоренному развитию удаленных лабораторий. Из-за пандемии многие учебные заведения вынуждены были временно закрыться или перейти на дистанционный формат обучения. Как следствие, большое количество студентов и преподавателей из разных уголков мира не имели доступа к лабораторным занятиям в школах и университетах. Создание и совершенствование лабораторий с удаленным доступом открыло новые возможности для улучшения дистанционного образования.

Удаленные лаборатории чаще всего применяются в дисциплинах, связанных с управлением роботизированным оборудованием [6, 8], с изучением электроники и электротехники [5, 9], с работой с FPGA (программируемая логическая интегральная схема, ПЛИС) [10–12], с программированием микроконтроллерных устройств [4, 13, 14], с проведением опытов на основе микрокомпьютера Raspberry Pi [15, 16]. Кроме того, в медицине для проведения хирургических операций применяется система da Vinci, которой хирург управляет с помощью манипуляторов [17]. Также существуют удаленные лаборатории в области нанотехнологий [18, 19].

Одной из ключевых сложностей, возникших при дистанционном формате обучения, является не только отсутствие доступа к оборудованию, но и усложнение взаимодействия студентов и преподавателей. В работе [4] авторы отмечают, что после первых недель онлайн-обучения был проведен опрос, на который ответили 20 студентов, изучающих курс «Микропроцессорная техника». Студенты изучали курс дома, им было предоставлено оборудование. Было задано шесть вопросов об онлайн-обучении и проблемах, связанных с этой формой.

Один из вопросов был сформулирован так: «В чем самая большая проблема онлайн-обучения?» Обучаемые могли выбрать более одного ответа, при этом 50 % ($n = 10$) из них ответили: «У меня возникают проблемы с обращением к преподавателю за помощью через Интернет», а 25 % выборки ответили: «Если преподаватель не спрашивает меня, как я работаю, я не скажу, что программа не работает». В качестве другой проблемы 30 % студентов указали: «Я застрял в программе на одном месте и не могу продолжить».

Другой вопрос имел такую формулировку: «Если бы обучение было очным, вы бы попросили преподавателя помочь с программированием раньше, чем при онлайн обучении?». На вопрос до 85 % студентов ответили «да», и только 15 % из них выбрали «нет».

Результаты данного исследования показывают, что для эффективного обучения работе с микроконтроллерными устройствами требуется регулярная помощь преподавателя. Поэтому важно разрабатывать удаленные лаборатории, обеспечивающие совместный доступ к лабораторному оборудованию.

Сравнение подходов создания удаленных лабораторий

В последние годы появились новые подходы к дистанционному обучению аналоговой и цифровой электронике и микроконтроллерным технологиям, использующие различные методы. Часто такие системы построены с применением технологий и платформ Интернета вещей. Мы рассмотрим несколько примеров систем, используемых для удаленного обучения. Одним из решений для удаленного обучения студентов стало использование IoT-устройств, таких как Raspberry Pi и систем на кристалле (SoC), которые связываются с периферией плат через Интернет. Авторы в работе [11] создали стенд для управления программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС, англ. FPGA) — полупроводниковыми устройствами, находящимися между микропроцессорами и интегральными схемами специального назначения (ASIC). Система состоит из ПЛИС, подключенной к микрокомпьютеру Raspberry Pi Zero, промежуточной базы данных Google Firebase и мобильного приложения. Пользователи через интерфейс мобильного приложения управляют (имитируют нажатие кнопки и изменение состояния переключателя) и отслеживают статус периферии ПЛИС (переключение светодиодов и семисегментных индикаторов). Мобильное приложение и Raspberry Pi Zero подключаются к БД Google Firebase для синхронизации состояния ПЛИС. Микрокомпьютер Raspberry Pi обменивается данными с ПЛИС по интерфейсу UART и сохраняет в БД изменения состояния ПЛИС.

В статье [11] авторы уделяют особое внимание совместной работе студентов. Доступность стенда для одновременной работы пользователей ограничена только полосой пропускания Google Firebase, которая является практически неограниченной в масштабах удаленной лаборатории. Недостаток данного решения заключается в необходимости физического доступа к плате ПЛИС для ее перепрограммирования, то есть пользователям доступно только тестирование текущей прошивки платы.

В работе [12] представлена аналогичная лаборатория LabEAD для изучения ПЛИС и разработки проектов. Лаборатория построена с использованием платформы Blynk. К платформе подключается ПЛИС (через плату ESP8266 в качестве передатчика), лабораторный компьютер и смартфон студента. Студенты с помощью мобильного приложения Blynk отслеживают и настраивают состояние контактов платы ПЛИС и отправляют команды на лабораторный компьютер. Для первичной настройки ключа Blynk и отслеживания состояния ПЛИС через веб-камеру предоставлен контролируемый удаленный



доступ с помощью программы Anydesk. В данной реализации студентам доступна загрузка собственных программ на ПЛИС. Дополнительно студенты могут подключать удаленно персональные датчики, информация от которых транслируется также через плату ESP8266. Лаборатория имеет открытый программный исходный код⁶.

Похожая идея отслеживания и изменения состояния контактов микроконтроллера реализована в работе [4]. Основными частями системы являются отладочная плата STM32 Nucleo-64, устройство мониторинга отладочной платы и приложение для преподавателя, ориентированное на мониторинг и управление микроконтроллером студента. Устройство мониторинга состоит из микроконтроллера STM32 и модуля Интернета вещей esp8266, используемого для связи через Интернет. Сбор данных от приложения преподавателя и устройств мониторинга отладочных плат учащихся осуществляет промежуточный сервер. Преподаватель получает возможность контролировать и наблюдать за активностью учащихся и состоянием их микроконтроллера во время занятия удаленно.

Предлагаемая концепция дистанционного обучения микроконтроллерными технологиям обеспечивает совместную работу преподавателя и студента, однако предполагает наличие у студентов персональной отладочной платы Nucleo-64 и дополнительного устройства мониторинга, что ограничивает применение такого подхода. Реализация подобного архитектурного решения с дистанционным доступом пользователей и возможностью программировать микроконтроллер позволила бы разместить оборудование в лаборатории. Это повысит доступность оборудования, и больше студентов получат возможность выполнять лабораторные работы удаленно.

В работе [9] рассматривается концепция и реализация системы Интернета вещей для удаленного выполнения практических работ по аналоговой электронике. Система имеет клиент-серверную архитектуру, основанную на комбинации двух подсистем: платы STEM Lab Red Pitaya и разработанной авторами работы платы для практических работ.

STEM Lab Red Pitaya⁷ — это проект с открытым исходным кодом, позволяющий заменить многие измерительные приборы. Данная плата выполняет функцию веб-сервера и используется в системе как мини-компьютер для эмуляции генератора сигнала, осциллографа и многих других устройств, необходимых для практических работ в электронике. Разработанная авторами плата позволяет осуществлять интеллектуальный выбор между несколькими встроенными практическими работами, а также дополнительными работами, для которых подключается внешнее оборудование. Студентам доступен веб-интерфейс, позволяющий выбрать практическую работу, которая содержит интерактивную электронную схему, описание работы и задачи, необходимые для выполнения.

Плата переключает (маршрутизирует) с помощью мульти-

плексоров контакты ввода и вывода платы Red Pitaya к необходимым контактам исследуемых схем. Подход с мультиплексированием каналов позволяет пользователям гибко управлять подключением лабораторного оборудования (осциллографом и генератором сигнала). Применение мультиплексирования расширяет возможности стенда к подключению дополнительного периферийного оборудования.

Передача данных между интерфейсом клиента и сервером (платой Red Pitaya) осуществляется по открытому протоколу удаленного взаимодействия для лабораторий RIP⁸ (Remote Interoperability Protocol) [20]. Данный протокол основан на двух технологиях: методах HTTP POST и GET для коммуникационного транспорта и JSON-RPC для форматирования сообщений. Протокол RIP предлагает универсальный подход для реализации клиент-серверной части для управления лабораторией. В качестве пользовательского интерфейса используется инструмент EJS (Easy Java Simulation), который поддерживает интеграцию в онлайн-курс на платформе Moodle [21]. Однако на данный момент разработанные серверные реализации не поддерживаются разработчиками.

В работе [13] авторами предложено для проведения удаленных лабораторных занятий организовать домашнюю лабораторию. Предполагается использование микроконтроллера STM32 в качестве измерительного инструмента — осциллографа, генератора ШИМ-сигнала, счетчика, логического анализатора, вольтметра и анализатора БПФ. Модель домашней лаборатории основана на том, что студент собирает на макетной плате без пайки исследуемую электронную схему в соответствии с инструкциями. К электронной схеме и к компьютеру через USB-порт подключен измерительный инструмент — микроконтроллер со специальным встроенным ПО. С помощью компьютерной программы пользователь проводит эксперимент, получая результаты от измерительного инструмента. Студент может удаленно поделиться своим экраном для консультации с преподавателем при возникновении проблем.

Домашняя лаборатория на основе микроконтроллера является отличным решением для обучения и индивидуальной работы, не требующей высокоточных измерений. К тому же авторы работы [13] отмечают, что индивидуальные проекты, выполненные во время пандемии, требовали большей самостоятельной работы студентов. Проекты были более трудоемкими и требовали тщательной проработки. Студенты принимали решение о закупке необходимого оборудования и использовали механические компоненты в проекте. Общение с преподавателем при этом было ограничено по сравнению с традиционным форматом обучения. Благодаря этой самостоятельности студенты получили хороший практический опыт. Работа [14] посвящена разработке удаленной лаборатории для отладки встроенного ПО на ассемблере для микроконтроллера STM32. Авторы используют для прошивки микроконтрол-

⁶ LabEAD: Репозиторий проекта на платформе Github [Электронный ресурс] // Github, 2023. URL: <https://github.com/vthayashi/labead-labdig> (дата обращения: 29.08.2023).

⁷ Проект Red Pitaya [Электронный ресурс]. URL: <https://redpitaya.com/> (дата обращения: 29.08.2023).

⁸ Torre L. Specification of the Remote Interoperability Protocol for Online Laboratories [Электронный ресурс] // Github, 2023. URL: <https://github.com/UNEDLabs/rir-spec> (дата обращения: 29.08.2023).



лера утилиту OpenOCD⁹, а для отладки кода через веб-браузер — оболочку GDB-отладчика Gdbgui¹⁰. Данное решение позволяет пользователям просматривать области памяти, регистры и ход исполнения загруженной программы с применением режима пошаговой отладки. К недостаткам данной разработки относится отсутствие поддержки одновременной совместной работы пользователей.

В работе [22] предлагается управление удаленной лабораторной установкой по определению скорости звука в воздухе методом стоячих волн в трубе. Система состоит из платы Arduino с подключенными датчиками и модулем связи ESP8266 и облачной платформой Google Firebase. Управление установкой и построение графиков происходит с помощью Google Firebase, с которой коммуницирует ESP8266. Для работы установки не требуется отдельный лабораторный компьютер. Однако данное решение подходит только для выполнения однотипных лабораторных работ, в которых необходимо управлять лабораторным оборудованием и получать значения измерительных приборов.

Еще одна удаленная лаборатория для взаимодействия с ПЛИС представлена в работе [23]. Лаборатория состоит из нескольких стенов, подключенных к серверу. Каждый стенд оснащен отладочной платой ПЛИС и платой Arduino UNO. Пользователь загружает свою программу на ПЛИС. Плата Arduino используется для имитации кнопок и переключателей. Реакцию на воздействие пользователи видят через веб-камеру. Сообщается, что в лаборатории пользователи работают по очереди, одновременное взаимодействие с одним стендом не разрешено.

Особенностью данной лаборатории является веб-платформа, которая основана на проекте с открытым исходным кодом WebLab-Deusto¹¹. Проект представляет собой распределенную архитектуру, состоящую из основного распределительного сервера — ядра системы — и набора лабораторных серверов — управляемых и неуправляемых экспериментов. Ядро системы управляет аутентификацией, авторизацией, отслеживанием пользователей, объединением и планированием ресурсов. Управляемые лаборатории контролируются ядром WebLab-Deusto. Доступ к неуправляемым лабораториям определяется разработчиком. Лаборатории WebLab-Deusto поддерживают интеграцию с системами управления обучением, например с Moodle¹².

Популярная зарубежная онлайн-платформа LabsLand является развитием проекта WebLab-Deusto. Сайт LabsLand позволяет студентам и исследователям из разных учебных заведений и организаций по всему миру получить доступ к удаленному оборудованию, проводить эксперименты и добавлять собственные лаборатории. К сожалению, на данный момент платформа не работает в России.

В работах [15, 24] авторы отмечают, что большая часть современных удаленных лабораторий не использует оборудование с открытым исходным кодом, и лишь небольшое количество лабораторий построено на программном обеспечении с открытым исходным кодом. Это ограничивает разработку и распространение удаленных лабораторий. Поэтому в своих работах авторы предлагают проекты с открытым исходным кодом программного и аппаратного обеспечения — Laborem и RaspyControl Lab.

Проект Laborem [24] предназначен для удаленных практических работ по электронике. Авторы разработали лабораторное устройство Laborem Vox. Устройство состоит из материнской платы, к которой подключаются измерительные приборы и исследуемые взаимозаменяемые электронные схемы, например активные и пассивные фильтры. Схема может также содержать недостающие компоненты, которые студент должен установить с помощью робота-манипулятора. В качестве веб-сервера выступает микрокомпьютер Raspberry Pi с программным обеспечением на основе библиотеки PyScada.

Удаленная лаборатория RaspyControl Lab, описанная в работе [15], используется для изучения систем автоматического управления. Например, в данной лаборатории студенты разрабатывают алгоритм и программный код на языке Python для системы управления резервуаром с водой. Микрокомпьютер Raspberry Pi выступает в роли управляющей и серверной части проекта. Управление помпами осуществляется через подачу сигналов на драйверы через контакты GPIO Raspberry Pi. Веб-приложение разработано с использованием фреймворка Flask (frontend) и NodeJS (backend). Пользователь разрабатывает код в браузере благодаря редактору Ace¹³ и видит трансляцию видео с веб-камеры от сервера WebRTC Janus¹⁴.

В другой работе [25] авторы решают изменить подход к управлению устройствами Интернета вещей. Они предлагают свою схему синхронизации среды VR-IoT, которая имеет название VRITESS — инновационный механизм, который позволяет пользователям управлять реальными устройствами Интернета вещей в виртуальной среде.

Система состоит из устройств Интернета вещей, IoT-шлюзов, платформы интеграции Интернета вещей (ITINP), алгоритма синхронизации VRITESS и платформы Интернета вещей в виртуальной реальности (VRITIP). Управление устройствами Интернета вещей осуществляется физически (например, нажатием кнопки для включения или выключения светильника) и через платформу в виртуальной реальности. Шлюзы IoT объединяют устройства Интернета вещей в сеть и транслируют данные о состоянии устройств на платформу интеграции Интернета вещей. Платформы ITINP и VRITIP синхронизируют состояние физических устройств Интернета вещей и моделей

⁹ OpenOCD: система отладки и программирования микроконтроллеров [Электронный ресурс]. URL: <https://openocd.org/> (дата обращения: 29.08.2023).

¹⁰ Gdbgui: браузерный отладчик кода [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gdbgui.com/> (дата обращения: 29.08.2023).

¹¹ WebLab-Deusto Labs: платформа с лабораториями на базе WebLab-Deusto [Электронный ресурс]. URL: <https://weblab.deusto.es/website/labs.html> (дата обращения: 29.08.2023).

¹² Gateway4labs: проект для интеграции удаленных лабораторий в системы управления обучением [Электронный ресурс]. URL: <https://gateway4labs.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 29.08.2023).

¹³ Ace: встраиваемый редактор кода [Электронный ресурс]. URL: <https://ace.c9.io/> (дата обращения: 29.08.2023).

¹⁴ Janus WebRTC Server: репозиторий сервера для WebRTC-трансляций [Электронный ресурс] // Github, 2023. URL: <https://github.com/meetecho/janus-gateway> (дата обращения: 29.08.2023).



устройств в виртуальной реальности с помощью алгоритма VRITNESS. Они обмениваются данными через локальные сети или облако, используя протоколы MQTT и RESTful API.

Предложенный авторами подход в перспективе применим для создания удаленной лаборатории. Пользователи с помощью гарнитуры и контроллера виртуальной реальности могут управлять физическими устройствами и выполнять лабораторные работы. Например, гарнитура виртуальной реальности позволит увидеть сигнал, сгенерированный микроконтроллером и принятый платой Red Pitaya, на виртуальном осциллографе.

Рассмотренные подходы были объединены в сводную таблицу 1. Проведена систематизация подходов по предмету исследования, описаны применяемые технологии и возможности совместной работы пользователей с оборудованием, выявлены достоинства и недостатки. В таблице приняты следующие сокращения: МК — микроконтроллер, микроконтроллерное устройство; ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема; RPI — микрокомпьютер Raspberry Pi; ПИ — предмет исследования; РО — размещение оборудования, П — оборудование находится в личном пользовании студента; Л — оборудование размещено в учебной лаборатории. Цифрами в колонке ПИ обозначены: 1 — ПЛИС, 2 — МК STM32, 3 — электронная схема, 4 — физические объекты, 5 — устройства Интернета вещей.

На основе изученных работ можно сделать следующие выводы:

1. Для разработки удаленных лабораторий используются различные технологии в зависимости от исследуемых систем. Некоторые лаборатории построены с использованием веб-платформ (Blynk, Firebase) и используют мобильные приложения для управления удаленной системой. В других лабораториях развернут веб-сервер, с которым взаимодействуют студенты и преподаватели. Часть лабораторий построена с использованием открытого исходного кода, что позволяет применять аналогичные решения для построения новых лабораторий. Каждый из подходов имеет свои преимущества и ограничения. Вместе с этим возможно использование виртуальной реальности для управления реальными устройствами Интернета вещей, что является перспективным решением для создания удаленной лаборатории.

2. Среди рассмотренных удаленных лабораторий не выявлено систем, которые были бы ориентированы на исследование технологий Интернета вещей. Представленные системы использовали IoT-технологии для организации связи между лабораторным оборудованием и пользователями. Однако при этом пользователи в лабораториях не используют внешние или персональные платформы Интернета вещей (например, MQTT Mosquitto, Node-RED) для экспериментов и не исследуют технологии связи (например, LoRaWAN, ZigBee) и межмашинное взаимодействие.

Функциональные требования к стенду для удаленной лаборатории

Удаленная лаборатория, предназначенная для дисциплин, изучающих технологии Интернета вещей, должна иметь следующее назначение. Цель системы — предоставить автоматизи-

рованный доступ к стендовому оборудованию и сервисам для проведения исследований в сфере Интернета вещей. Предмет исследования — микроконтроллер STM32 с набором модулей и IoT-сервисы. Оборудование должно быть расположено в лаборатории, а система должна поддерживать одновременную совместную работу нескольких пользователей.

Для построения удаленной лаборатории выбраны следующие подходы.

1. Структура системы:

- управляющий сервер, осуществляющий контроль стеновых узлов и доступа к ним, предоставляющий возможности базовых станций LoRaWAN, ZigBee и разворачивающий приложения для систем Интернета вещей по требованию пользователя;

- отладочные стенды на базе микроконтроллера STM32 и микрокомпьютера Raspberry Pi в роли управляющего звена с подключенной веб-камерой (исполнение запросов управляющего сервера, программирование микроконтроллеров, передача изображений с веб-камеры).

2. Организационная часть:

- пользователи должны иметь возможность объединяться в группы для совместного доступа к стенду;

- преподавателям доступно подключение к каждому стенду;

- желательно, чтобы система поддерживала интеграцию с платформой управления обучением Moodle, как это предложено для WebLab-Deusto и EJS.

3. Аппаратная часть:

исследуемая отладочная плата STM32 Nucleo-64 должна подключаться к устройству отслеживания и изменения состояния контактов микроконтроллера, как это реализовано в работах [4] и [13];

к исследуемому микроконтроллеру могут быть подключены датчики, актуаторы и модули связи; подключение всех компонентов должно быть модульное или с применением мультиплексоров, как предложено в работе [9].

4. Программная часть:

в качестве веб-платформы для лаборатории планируется рассмотреть WebLab-Deusto, на которых построены платформа LabsLand и стенд, описанный в работе [23];

на веб-странице стенда должны быть расположены элементы: редактор кода, терминал последовательного порта, консоль вывода отладочной информации, видеотрансляция с веб-камеры, динамические элементы управления (например, кнопки, ползунковые переключатели, потенциометры, переключатели состояния мультиплексоров);

пользователям должна быть доступна функция загрузки на микроконтроллер файла встроенного ПО, скомпилированного пользователем локально;

- состояние среды должно быть синхронизировано между стендом и пользователями;

- в рамках лаборатории должна быть возможность развернуть временные персональные копии IoT-платформ, с которыми IoT-устройства будут взаимодействовать.



Таблица 1. Сравнение подходов и технологий, применяемых в удаленных лабораториях
Table 1. Comparison of approaches and technologies used in remote laboratories

Система	Цель	ПИ	Технологии		РО	Совместный доступ	Достоинства	Недостатки
			Программное обеспечение	Аппаратное обеспечение				
Remote FPGA [11]	Удаленное совместное управление отладочной платой ПЛИС	1	<i>Rytron Wizard</i> — собственное ПО для конфигурации; <i>Quartus</i> — программирование ПЛИС; <i>Ionic Framework</i> — разработка мобильного приложения; <i>Google Firebase</i> — синхронизация пользователей ПЛИС	<i>RPI Zero</i> — конвертер для связи <i>Google Firebase</i> и ПЛИС	Л, П	Совместное отслеживание и изменение состояния компонентов ПЛИС	Синхронизация состояния ПЛИС между пользователями	Нет механизма удаленного программирования ПЛИС. Не реализован стенд для работы с МК
Лаборатория LabEAD [12]	Обучение и совместная разработка проектов с использованием удаленной ПЛИС	1	<i>Vylnk</i> — облачная IoT платформа для удаленного взаимодействия с ПЛИС; <i>Quartus Prime 16.1</i> — среда разработки ПЛИС; <i>Amydesk</i> — удаленное подключение к лабораторному компьютеру; скрипт <i>Python</i> (открытый исходный код) — управление лабораторным компьютером через платформу <i>Vylnk</i> ; скрипт <i>Arduino IDE</i> (открытый исходный код) — разработка программы под <i>ESP8266</i>	<i>ESP8266</i> — связующая плата для подключения ПЛИС к платформе <i>Vylnk</i> ; <i>Analogue Discovery</i> — измерительное устройство; веб-камера	Л, П	Совместное управление ПЛИС и лабораторным компьютером	Открытый исходный код лаборатории. Возможность подключать персональные сенсоры и модули	Не реализован стенд для работы с МК. В России доступна ограниченная бесплатная версия платформы <i>Vylnk</i>
Дистанционный стенд для синхронной работы с оборудованием на основе ПЛИС [23]	Удаленное взаимодействие с платами ПЛИС с возможностью управления кнопками и переключателями	1	<i>WebLab-Deusto (Python 2.7)</i> — открытый исходный код — набор библиотек для разработки удаленной лаборатории; <i>Quartus Prime 20.1</i> — программирование ПЛИС; <i>Apache, MySQL, JavaScript</i> — компоненты для работы сервера; <i>Arduino IDE</i> — программа для прошивки плат <i>Arduino</i>	<i>Arduino</i> — плата для имитации нажатий на кнопки и активации переключателей ПЛИС; веб-камера	Л	Не предусмотрено: пользователи работают по очереди	Открытый исходный код веб-серверной части удаленной лаборатории. При изменении МК для эмуляции нажатий на кнопки ПЛИС	Нет поддержки совместной работы пользователей. Не реализован стенд для работы с МК
Удаленная IoT лаборатория онлайн-обучения микропроцессорным технологиям [4]	Удаленное отслеживание и изменение состояния МК студента	2	Серверное приложение преподавателя, к которому подключается оснастка для отслеживания состояния платы <i>Nucleo-64</i>	<i>MK STM32</i> с модулем <i>esp8266</i> — оснастка для отслеживания состояния платы <i>Nucleo-64</i>	П	Совместная работа одного студента и преподавателя	Полный контроль над платой студента: есть возможность считать и генерировать сигналы, взаимодействовать через UART-интерфейс	Необходимость предоставлять студентам оборудование. Совместная работа студентов недопустима



Система	Цель	ПИ	Технологии		РО	Совместный доступ	Достоинства	Недостатки
			Программное обеспечение	Аппаратное обеспечение				
Виртуальная лаборатория для изучения архитектуры и программирования МК STM32 [14]	Программирование, прошивка и отладка МК STM32 через веб-браузер	2	<i>arm-pole-eabi-id</i> (открытый исходный код) — GCC-линковщик; <i>OpenOCD</i> (открытый исходный код) — система для загрузки и отладки кода; <i>Gdbgui</i> (открытый исходный код) — браузерная оболочка для GDB-отладчика	Лабораторный сервер; <i>ST-Link v2</i> — программатор; веб-камера	Л	Не предусмотрен	Программирование и отладка МК через веб-браузер. Открытый исходный код используемых инструментов	Не реализована поддержка совместной работы пользователей
Система Интернет вещей для удаленных практических работ по электронике [9]	Проведение лабораторных работ по электронике на удаленном оборудовании	3	<i>RIP (Remote Interoperability Protocol)</i> (открытый исходный код) — протокол удаленного взаимодействия для лабораторий [20]; <i>Python server</i> — серверная реализация RIP (открытый исходный код); <i>Easy Java Simulation</i> — интерфейс управления лабораторным оборудованием	<i>STEMLab Red Pitaya</i> (открытый исходный код, проприетарная архитектура) — плата для сбора и генерации сигналов, выполняющая функцию веб-сервера; веб-камера	Л	Не указано	Отладочная плата позволяет гибко переключать контакты платы Red Pitaya к разным электрическим схемам. Система предоставляет интерфейс для предсказуемого управления платой и проведения изменений	Нет совместного доступа к оборудованию. Разработанные серверные реализации для работы по протоколу RIP больше не поддерживаются
Удаленная лаборатория Labotem [24]	Обеспечение удаленной практической работы по электронике через программно-аппаратную платформу с открытым исходным кодом	3	<i>PyScada (Python 2.7, открытый исходный код)</i> — ПО для получения данных с датчиков или инструментов и управления ими через веб-страницу; <i>mirg-streamer</i> (открытый исходный код) — ПО для трансляции изображения веб-камеры	<i>Labotem Box</i> (материнская плата с набором электронных схем, открытый исходный код) — выбор и реализация эксперимента; <i>RPI</i> — серверная часть системы; робот-манипулятор — подключение дополнительных компонентов; веб-камера	Л	Организована работа по очереди, доступен режим наблюдения	Открытый исходный код ПО и оборудования. Доступен интерфейс для студентов, преподавателей и администраторов. Доступна интеграция в систему управления обучением Moodle	Подход не предназначен для разработки встраиваемого ПО для МК, а предполагает удаление исследований электронных схем
Home Lab [13]	Исследование характеристик лабораторной экспериментальной схемы с помощью системы измерительных приборов на базе МК STM32	3	<i>Zero eLab Viewer</i> ¹ и <i>EMBedded Oscilloscope</i> ² (открытый исходный код) — инструменты для работы с системой измерительных приборов	МК STM32F103, STM32F303, STM32L412, STM32F042 или STM32L072 — выступают в качестве системы измерительных приборов (осциллограф, ШИМ-генератор и др.)	П	Совместная работа по видеоконференции	Использование МК в качестве измерительного прибора. Результаты измерений могут быть продемонстрированы по видеоконференции	Необходимость предоставлять студентам оборудование. Сложности для преподавателя в обнаружении ошибок студентов

¹ Репозиторий проекта Zero eLab Viewer [Электронный ресурс] // Github, 2023. URL: https://github.com/adamberling/zero_eLabviewer (дата обращения: 29.08.2023).

² Репозиторий проекта EMBEDDED OSCILLOSCOPE [Электронный ресурс] // Github, 2023. URL: <https://github.com/ragezi/EMBO> (дата обращения: 29.08.2023).



Система	Цель	ПИ	Технологии		РО	Совместный доступ	Достоинства	Недостатки
			Программное обеспечение	Аппаратное обеспечение				
Лабораторный практикум по физике на базе Arduino [22]	Удаленное проведение физического опыта	4	Firebase — облачный сервис для управления установкой и получения измерений	Arduino — плата для управления экспериментом; ESP8266 — модуль связи;	Л	Предусмотрен	Для лабораторной установки не требуется компьютер. Подход позволяет организовать простые эксперименты, связанные с измерением характеристик	Однотипный эксперимент. Система не предусматривает удаленное программирование МК
Raspberry Control Lab [15]	Разработка удаленной лаборатории с открытым исходным кодом для изучения систем автоматического управления, которая может быть воспроизведена студентами и преподавателями	4	NodeJS, Flask, Apache, Redis (открытый исходный код) — компоненты веб-сервера; ACE (открытый исходный код) — встроенный в веб-страницу редактор кода; Janus WebRTC Server (открытый исходный код) — инструмент для передачи видеоданных из лаборатории	RPI — используется для управления внешней системой; система резервуаров; веб-камера	Л	Не указано	Открытый исходный код. Система может быть адаптирована для разработки под МК	Однотипный эксперимент. Система не предусматривает удаленное программирование МК
Платформа удаленных лабораторий LabsLand	Объединение и создание единого доступа к различным онлайн-лабораториям по всему миру	1, 2, 3, 4	WebLab-Deusto (открытый исходный код) — основа платформы	В зависимости от лаборатории	Л	Предусмотрен	Открытый исходный код веб-серверной части удаленной лаборатории. Интеграция с платформами управления обучением	Зарубежный проект, недоступен на территории РФ
Подход VRITISS (VR-IoT Environment Synchronization Scheme) [25]	Создание цифрового двойника устройства Интернета вещей, синхронизация виртуального устройства, управление устройствами с помощью VR-технологий	5	MQTT и HTTP (RESTful API) — протоколы обмена данными; Adafruit IO — облачная IoT-платформа; Java (JavaServer Faces, Glassfish) и Unity — технологии разработки веб-приложений для взаимодействия с VR-объектами	Oculus Rift — VR-гарнитура	Л	Предусмотрен	Подход применим для создания удаленной лаборатории виртуальной реальности. Упрощение взаимодействия с удаленными объектами, наглядность результатов действий пользователя	Низкая распространенность технологий виртуальной реальности



Заключение

В данной работе был проведен анализ существующих подходов к созданию удаленных лабораторий. Было рассмотрено 12 лабораторий с удаленным доступом, применяющихся для обучения и удаленной работы с аналоговой и цифровой электро-

никой, микроконтроллерными устройствами и физическими объектами. На основании анализа разработаны функциональные и организационные требования к удаленной лаборатории для изучения дисциплин, связанных с технологиями Интернета вещей.

Список использованных источников

- [1] Проблемные вопросы качества профессионального образования при применении дистанционных образовательных технологий в очной форме обучения / Р. Е. Булат [и др.] // Человеческий капитал. 2021. № 3(147). С. 97-113. <https://doi.org/10.25629/HC.2021.03.09>
- [2] Радина Н. К., Балакина Ю. В. Вызовы образованию в условиях пандемии: обзор исследований // Вопросы образования. 2021. № 1. С. 178-194. <https://doi.org/10.17323/1814-9545-2021-1-178-194>
- [3] Захарова У. С., Вилкова К. А., Егоров Г. В. Этому невозможно обучить онлайн: прикладные специальности в условиях пандемии // Вопросы образования. 2021. № 1. С. 115-137. <https://doi.org/10.17323/1814-9545-2021-1-115-137>
- [4] Remote IoT Education Laboratory for Microcontrollers Based on the STM32 Chips / P. Jacko [et al.] // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 4. Article number: 1440. <https://doi.org/10.3390/s22041440>
- [5] Ku H., Ahfock T., Yusaf T. Remote access laboratories in Australia and Europe // European Journal of Engineering Education. 2011. Vol. 36, no. 3. P. 253-268. <https://doi.org/10.1080/03043797.2011.578244>
- [6] Taylor K., Dalton B., Trevelyan J. Web-based telerobotics // Robotica. 1999. Vol. 17. P. 49-57. <https://doi.org/10.1017/S0263574799000752>
- [7] Липай Б. Р., Маслов С. И. Интернет-лаборатория «Основы электротехники и электроники» как пример современного учебного комплекса с удаленным доступом для открытого инженерного образования // Вестник Московского энергетического института. 2017. № 2. С. 71-76. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2017-2-71-76>
- [8] Salzmann C., Gillet D. Challenges in Remote Laboratory Sustainability // Proceedings of the International Conference on Engineering Education – ICEE' 2007. Coimbra, Portugal, 2007. P. 1-6. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=9bc954b248de5302ba554e217dc82379575b07b4> (дата обращения: 29.08.2023).
- [9] Conception and Implementation of an IoT System for Remote Practical Works in Open Access University's Electronic Laboratories / A. M. Taj [et al.] // International Journal of Online and Biomedical Engineering. 2021. Vol. 17, no. 2. P. 19-36. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v17i02.19755>
- [10] The Remote Access to Laboratories: A Fully Open Integrated System / R. Sanchez-Herrera [et al.] // IFAC-PapersOnLine. 2019. Vol. 52, no. 9. P. 139-143. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.135>
- [11] Magyari A., Chen Y. FPGA Remote Laboratory Using IoT Approaches // Electronics (Switzerland). 2021. Vol. 10, no. 18. Article number: 2229. <https://doi.org/10.3390/electronics10182229>
- [12] Teaching Digital Electronics during the COVID-19 Pandemic via a Remote Lab / F. Valencia de Almeida [et al.] // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 18. Article number: 6944. <https://doi.org/10.3390/s22186944>
- [13] Online teaching of practical classes under the Covid-19 restrictions / J. Svatos [et al.] // Measurement: Sensors. 2022. Vol. 22. Article number: 100378. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100378>
- [14] Кузнецов К. С., Тарасов В. Г. Виртуальная лаборатория для изучения архитектуры и программирования микроконтроллеров STM32 // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19, № 4. С. 98-110. <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2021-4-98-110>
- [15] Ariza J., Galvis C. N. RaspyControl Lab: A fully open-source and real-time remote laboratory for education in automatic control systems using Raspberry Pi and Python // HardwareX. 2023. Vol. 13. Article number: e00396. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00396>
- [16] Azad A. K. M. Design and Development of Remote Laboratories with Internet of Things Setting // Advances in Internet of Things. 2021. Vol. 11, no. 3. P. 95-112. <https://doi.org/10.4236/ait.2021.113007>
- [17] Шевченко Ю. Л. От Леонардо Да Винчи к роботу «Да Винчи» // Вестник Национального медико-хирургического центра им. Н. И. Пирогова. 2012. Т. 7, № 1. С. 15-20. EDN: SIAEZT
- [18] RAINing: Remotely Accessible Instruments in Nanotechnology to Promote Student Success / J. M. Ashcroft [et al.] // Current Issues in Emerging eLearning. 2018. Vol. 4, no. 1. P. 63-99. <https://doi.org/10.22158/fet.v2n2p74>
- [19] Making it RAIN: Using Remotely Accessible Instruments in Nanotechnology to Enhance High School Science Courses / A. Min [et al.] // Frontiers in Education Technology. 2019. Vol. 2, no. 2. Article number: 74. <https://doi.org/10.22158/fet.v2n2p74>
- [20] An architecture to implement generalized sampling in Online Laboratories / A. M. Taj [et al.] // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, no. 17. P. 332-337. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.301>
- [21] A Summary Protocol on How to Develop a Remote Laboratory / L. Torre [et al.] // International Scientific Conference on Information Technology and Data Related Research. Belgrade, Singidunum University, Serbia, 2022. P. 163-168. <https://doi.org/10.15308/Sinteza-2022-163-168>



- [22] Колосков С. Ю., Старовиков М. И., Старовикова И. В. Использование цифрового измерительного комплекса на базе платформы Arduino в лабораторном практикуме по физике // Открытое и дистанционное образование. 2017. № 2(66). С. 51-57. <https://doi.org/10.17223/16095944/66/5>
- [23] Измайлова Л. Г., Белоруков А. М., Романов А. Ю. Дистанционный стенд для синхронной работы с оборудованием на основе ПЛИС // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2022. № 4. С. 117-121. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2022-4-117-121>
- [24] Lavayssière C., Larroque B., Luthon F. Laborem Box: A scalable and open source platform to design remote lab experiments in electronics // HardwareX. 2022. Vol. 11. P. 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00301>
- [25] Simiscuca A. A., Markande T. M., Muntean G. M. Real-Virtual World Device Synchronization in a Cloud-Enabled Social Virtual Reality IoT Network // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 106588-106599. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933014>

Поступила 29.08.2023; одобрена после рецензирования 03.10.2023; принята к публикации 06.10.2023.

Об авторе:

Изотов Илья Николаевич, аспирант, ассистент кафедры информационных технологий и систем управления Института радиоэлектроники и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (620002, Российская Федерация, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-1466-1957>, ilya.izotov@urfu.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Bulat R.Y., Baychorova Kh.S., Lebedev A.Yu. et al. *Problemnye voprosy kachestva professional'nogo obrazovaniya pri primenenii distancionnykh obrazovatel'nykh tekhnologij v ochnoj forme obucheniya* [Problematic issues of the quality of professional education in the application of distance learning technologies in full-time study]. *Chelovecheskij kapital = Human capital*. 2021;(3):97-113. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25629/HC.2021.03.09>
- [2] Radnina N.K., Balakina Ju. V. *Vyzovy obrazovaniyu v usloviyah pandemii: obzor issledovanij* [Challenges for Education during the Pandemic: An Overview of Literature]. *Voprosy obrazovaniya = Education issues*. 2021;(1):178-194. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17323/1814-9545-2021-1-178-194>
- [3] Zakharova U.S., Vilkova K.A., Egorov G.V. *Etomu nevozmozhno obuchit' onlajn: prikladnye special'nosti v usloviyah pandemii* [It Can't Be Taught Online: Applied Sciences during the Pandemic]. *Voprosy Obrazovaniya = Educational Studies Moscow*. 2021;(1):115-137. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17323/1814-9545-2021-1-115-137>
- [4] Jacko P., Bereš M., Kováčová I. et al. Remote IoT Education Laboratory for Microcontrollers Based on the STM32 Chips. *Sensors*. 2022;22(4):1440. <https://doi.org/10.3390/s22041440>
- [5] Ku H., Ahfock T., Yusaf T. Remote access laboratories in Australia and Europe. *European Journal of Engineering Education*. 2011;36(3):253-268. <https://doi.org/10.1080/03043797.2011.578244>
- [6] Taylor K., Dalton B., Trevelyan J. Web-based telerobotics. *Robotica*. 1999;17:49-57. <https://doi.org/10.1017/S0263574799000752>
- [7] Lipay B.R., Maslov S.I. *Internet-laboratoriya «Osnovy elektrotekhniki i elektroniki» kak primer sovremennogo uchebnogo kompleksa s udalennym dostupom dlya otkrytogo inzhener'nogo obrazovaniya* [The Internet-Based Laboratory “Fundamentals of Electrical Engineering and Electronics” as an Example of a Modern Remotely Accessible Educational Package for Obtaining Open Engineering Education]. *Vestnik Moskovskogo Energeticheskogo Instituta = Bulletin of the Moscow Energy Institute*. 2017;(2):71-76. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2017-2-71-76>
- [8] Salzmann C., Gillet D. Challenges in Remote Laboratory Sustainability. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Education – ICEE' 2007. Coimbra, Portugal; 2007. p. 1-6. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=9bc954b248de5302ba554e217dc82379575b07b4> (accessed 29.08.2023).
- [9] Taj A., Sombria J., Gaga A. et al. Conception and Implementation of an IoT System for Remote Practical Works in Open Access University's Electronic Laboratories. *International Journal of Online and Biomedical Engineering*. 2021;17(2):19-36. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v17i02.19755>
- [10] Sanchez-Herrera R., Mejías A., Márquez M.A., Andújar J.M. The Remote Access to Laboratories: A Fully Open Integrated System. *IFAC-PapersOnLine*. 2019;52(9):139-143. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.135>
- [11] Magyari A., Chen Y. FPGA Remote Laboratory Using IoT Approaches. *Electronics (Switzerland)*. 2021;10(18):2229. <https://doi.org/10.3390/electronics10182229>
- [12] Valencia de Almeida F., Hayashi V.T., Arakaki R. et al. Teaching Digital Electronics during the COVID-19 Pandemic via a Remote Lab. *Sensors*. 2022;22(18):6944. <https://doi.org/10.3390/s22186944>
- [13] Svatos J., Holub J., Fischer J., Sobotka J. Online teaching of practical classes under the Covid-19 restrictions. Measurement. *Sensors*. 2022;22:100378. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100378>



- [14] Kuznetsov K.S., Tarasov V.G. *Virtual'naya laboratoriya dlya izucheniya arhitektury i programmirovaniya mikrokontrollerov STM32* [Virtual Laboratory for Studying and Programming Stm32 Microcontrollers]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve = Intelligent Systems in Manufacturing*. 2021;19(4):98-110. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2021-4-98-110>
- [15] Ariza J., Galvis C. N. RaspyControl Lab: A fully open-source and real-time remote laboratory for education in automatic control systems using Raspberry Pi and Python. *HardwareX*. 2023;13:e00396. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00396>
- [16] Azad A.K.M. Design and Development of Remote Laboratories with Internet of Things Setting. *Advances in Internet of Things*. 2021;11(3):95-112. <https://doi.org/10.4236/ait.2021.113007>
- [17] Shevchenko Yu.L. *Ot Leonardo Da Vinchi k robotu «Da Vinchi»* [From Leonarda Da Vinci to the "Da Vinci" Robot]. *Vestnik Nacional'nogo mediko-hirurgicheskogo centra im. N. I. Pirogova = Bulletin of Pirogov National Medical & Surgical Center*. 2012;7(1):15-20. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: SIAEZT
- [18] Ashcroft J.M., Cakmak A.O., Blatti J. et al. It's RAINing: Remotely Accessible Instruments in Nanotechnology to Promote Student Success. *Current Issues in Emerging eLearning*. 2017;4(1):63-99. <https://doi.org/10.22158/fet.v2n2p74>
- [19] Min A., Ashcroft J., Monroy J. et al. Making it RAIN: Using Remotely Accessible Instruments in Nanotechnology to Enhance High School Science Courses. *Frontiers in Education Technology*. 2019;2(2):74. <https://doi.org/10.22158/fet.v2n2p74>
- [20] Taj A.M., Chacón J., Torre L. et al. An architecture to implement generalized sampling in Online Laboratories. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(17):332-337. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.301>
- [21] Torre L., Matijević M., Seničić Đ. et al. Summary Protocol on How to Develop a Remote Laboratory. *International Scientific Conference on Information Technology and Data Related Research*. Belgrade, Singidunum University, Serbia; 2022. p. 163-168. <https://doi.org/10.15308/Sinteza-2022-163-168>
- [22] Koloskov S.Yu., Starovikov M.I., Starovikova I.V. *Ispol'zovanie cifrovogo izmeritel'nogo kompleksa na baze platformy Arduino v laboratornom praktikume po fizike* [Software and Hardware Platform Arduino, Digital Measuring System, Laboratory Work in Physics]. *Otkrytoe i distancionnoe obrazovanie = Open and distance education*. 2017;(2):51-57. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17223/16095944/66/5>
- [23] Izmailova L.G., Belorukov A.M., Romanov A.Yu. *Distancionnyj stend dlya sinhronnoj raboty s oborudovaniem na osnove PLIS* [Remote Stand for Synchronous Operation with FPGA-based Equipment]. *Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanoelektronnyh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems (MNS) Development*. 2022;(4):117-121. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2022-4-117-121>
- [24] Lavayssière C., Larroque B., Luthon F. Laborem Box: A scalable and open source platform to design remote lab experiments in electronics. *HardwareX*. 2022;11:1-21. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00301>
- [25] Simiscuca A.A., Markande T.M., Muntean G.M. Real-Virtual World Device Synchronization in a Cloud-Enabled Social Virtual Reality IoT Network. *IEEE Access*. 2019;7:106588-106599. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933014>

Submitted 29.08.2023; approved after reviewing 03.10.2023; accepted for publication 06.10.2023.

About the author:

Ilya N. Izotov, Postgraduate Student, Assistant of the Department of Information Technologies and Control Systems, Institute of radioelectronics and information technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (19 Mira St., Yekaterinburg 620002, Russian Federation), **ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1466-1957>**, ilya.izotov@urfu.ru

The author has read and approved the final manuscript.

