

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ОБЛАЧНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Ван Цуйцуй

Таджикский педагогический институт в городе Пенджикент

В представленной статье рассматриваются концепция и реализация комплексной программно-технической среды для проведения дистанционных физических опытов в режиме реального времени. Предложенная архитектура обеспечивает пользователям удалённое взаимодействие с физическими установками, включая процессы мониторинга, управления и комплексной обработки полученных данных. Апробация системы проводилась на базе оборудования для изучения механических колебаний. Ключевым показателем эффективности стала минимизация временного отклика: задержка сигнала составила всего 60-120 мс, что критически важно для комфортного интерактивного обучения. Испытания подтвердили отказоустойчивость платформы при нагрузке до 50 одновременных подключений. Основное преимущество разработки заключается в переходе от имитационного моделирования к работе с «живыми» измерениями. Это позволяет студентам глубже погрузиться в специфику приборных погрешностей и научиться сопоставлять теорию с реальной практикой, формируя актуальные цифровые компетенции.

Ключевые слова: удалённая лаборатория, дистанционное обучение, физический эксперимент, системная задержка, интерактивное управление, цифровые компетенции.

ТАРҲРЕЗИИ АРХИТЕКТУРАИ БАРНОМАВИЮ ТЕХНИКИ ПЛАТФОРМАИ АБРӢ БАРОИ ГУЗАРОНИДАНИ ТАҶРИБАӢОИ ФИЗИКӢ ДАР ВАҚТИ ВОҶЕӢ

Ван Цуйцуй

Дар мақолаи пешниҳодшуда концепсия ва татбиқи муҳити маҷмуии барномавию техники барои гузаронидани таҷрибаҳои физикии дурдаст дар вақти воқеӣ баррасӣ мешавад. Архитектураи пешниҳодшуда ба корбарон имкони ҳамкориҳои фосилавӣ бо таҷҳизоти физикӣ, аз ҷумла равандҳои мониторинг, идоракунии ва коркарди маҷмуии додахоро фароҳам меорад. Санҷиши система дар заминаи таҷҳизоти озмоишӣ барои омӯзиши лаппишҳои механикӣ гузаронида шуд. Нишондиҳандаи асосии самаранокӣ ҳадди ақал гардонидани вақти воқуниш гардид: таъхири сигнал ҳамагӣ 60–120 мс-ро ташкил дод, ки ин барои омӯзиши интерактивиӣ бароҳат аҳамияти ҷиддӣ дорад. озмоишҳо устувории платформа ро ҳангоми бори ҳамзамони то 50 сессии корбарон тасдиқ карданд. Бартариии асосии ин коркард дар гузариш аз моделсозии имитатсионӣ ба кор бо ченкуниҳои «зинда» мебошад. Ин ба донишҷӯён имкон медиҳад, ки ба хусусиятҳои ҳадогиҳои асбобӣ амиқтар ворид шаванд, муқоисаи назарияро бо амалияи воқеӣ омӯзанд ва салоҳиятҳои муносири рақамиро ташаккул диҳанд.

Калидвожаҳо: озмоишгоҳи дурдаст, таълими фосилавӣ, таҷрибаи физикӣ, таъхири система, идоракунии интерактивӣ, салоҳиятҳои рақамӣ.

DESIGN OF THE SOFTWARE AND HARDWARE ARCHITECTURE FOR A CLOUD PLATFORM TO CONDUCT REAL-TIME PHYSICAL EXPERIMENTS

Wang Cuicui

The presented article discusses the concept and implementation of a comprehensive software and hardware environment designed for conducting remote physical experiments in real-time. The proposed architecture enables users to interact remotely with physical setups, encompassing monitoring, control, and integrated data processing. System validation was performed using a laboratory stand dedicated to the study of mechanical oscillations. A key performance indicator was the minimization of response time: the signal latency ranged between 60–120 ms, which is critical for ensuring comfortable interactive learning. Tests confirmed the platform's stability under a simultaneous load of up to 50 active user sessions. The primary advantage of this development lies in the transition from simulation modeling to working with "live" measurements. This approach allows students to gain a deeper understanding of instrumental errors and learn to reconcile theoretical models with empirical results, thereby fostering essential digital and research competencies.

Keywords: remote laboratory, distance learning, physical experiment, system latency, interactive control, digital competencies.

Введение

Повсеместное внедрение дистанционных и гибридных образовательных моделей актуализировало проблему качественной организации лабораторных работ по физике. Эксперимент остается фундаментальным инструментом познания, необходимым для верификации теоретических гипотез и развития навыков обращения с измерительной аппаратурой [1-5]. Традиционный очный практикум позволяет студентам освоить методологию научного исследования, что подтверждается многочисленными педагогическими изысканиями.

В условиях удаленного обучения частичным решением стали виртуальные симуляторы. Несмотря на их интерактивность и возможности визуализации, такие программные среды обладают существенным недостатком: они предлагают идеализированные модели. Работа с симулятором не позволяет обучающемуся столкнуться с реальными факторами эксперимента — аппаратными погрешностями, сигнальными шумами и стохастичностью физических процессов. Это, в свою очередь, ограничивает формирование глубоких исследовательских компетенций [6-10].

Качественно иным подходом является внедрение удаленных лабораторий (Remote Labs). Данная технология предоставляет веб-доступ к реальным аппаратно-программным комплексам. В отличие от эмуляторов здесь пользователь управляет физической установкой и получает массив подлинных эмпирических данных [11-13]. Интеграция IoT-компонентов и облачных технологий позволяет реализовывать сложные сценарии (например, изучение динамики или электромагнетизма) в дистанционном формате, что соответствует концепции «Образование 4.0».

Анализ существующего опыта (включая платформы типа iSES) свидетельствует о том, что работа с реальным оборудованием через сеть повышает вовлеченность студентов и способствует развитию критического мышления [14-17]. Однако техническая реализация таких систем сопряжена с вызовами, главным из которых является обеспечение интерактивности. В связи с этим приоритетной задачей становится проектирование облачных архитектур с минимальной временной задержкой, обеспечивающих эффект присутствия и синхронное управление экспериментом в реальном времени.

Архитектура облачной платформы удалённого физического эксперимента

Структурная организация программно-аппаратного комплекса. Разработанная система базируется на трехуровневой иерархической модели, включающей клиентский интерфейс, серверное ядро и физическое оборудование. Подобная декомпозиция гарантирует гибкость конфигурации и отказоустойчивость платформы.

1. **Пользовательский уровень (Frontend).** Реализован в виде кроссбраузерного веб-приложения («тонкий клиент»), что исключает необходимость инсталляции локального ПО. Интерфейс объединяет инструменты отправки команд, модуль визуализации телеметрии (построение графиков и таблиц в реальном времени) и окно видеотрансляции. Для повышения методической эффективности предусмотрена функция логирования сессий и экспорт «сырых» данных для постобработки.

2. **Серверный уровень (Backend).** Выступает в роли оркестратора системы. Он отвечает за балансировку нагрузки, маршрутизацию трафика и управление жизненным циклом сессий. Ключевым элементом транспортного слоя является протокол MQTT, обеспечивающий асинхронный и гарантированный обмен сообщениями между облаком и лабораторной установкой. Подсистема безопасности реализует механизмы аутентификации, предотвращая несанкционированное вмешательство в ход эксперимента.

3. **Физический уровень (Hardware).** Представляет собой лабораторный стенд под управлением микроконтроллеров. Этот уровень преобразует цифровые команды в механические действия актуаторов и осуществляет высокочастотный опрос датчиков (акселерометров, энкодеров и др.).

Особое внимание уделено синхронизации потоков данных: видеотрансляция передается через протокол WebRTC, что минимизирует задержки (low latency) и позволяет пользователю мгновенно соотносить визуальную картинку с показаниями приборов.

Масштабируемость решения достигается за счет микросервисной архитектуры и контейнеризации (Docker/Kubernetes). Это позволяет оперативно подключать новые типы лабораторных установок и внедрять модули интеллектуального анализа данных (ML) без остановки системы.



Рисунок 1 – Архитектура облачной платформы удалённого физического эксперимента

Таким образом, предложенная архитектура обеспечивает высокую интерактивность, надёжность передачи данных и образовательную ценность удалённых лабораторных экспериментов, создавая условия для полноценного формирования исследовательских и экспериментальных компетенций обучающихся.

Технологические решения и особенности реализации

Резюмируя вышесказанное, разработанная архитектура гарантирует необходимый уровень интерактивности и надёжности, что критически важно для методической ценности удаленного эксперимента. Техническая реализация проекта базируется на следующих ключевых решениях:

1. **Протоколы передачи данных.** В качестве стандарта для обмена телеметрией и управляющими сигналами выбран протокол MQTT. Его применение обусловлено необходимостью минимизировать накладные расходы трафика и обеспечить стабильность соединения в условиях нестабильных сетей. Данный протокол гарантирует асинхронную доставку пакетов данных между сервером и микроконтроллерами, что позволяет синхронизировать действия оператора с откликом оборудования даже при существенных сетевых задержках.

2. **Визуализация процесса.** Для трансляции видеопотока задействована технология WebRTC. Это решение исключает необходимость установки сторонних плагинов или использования промежуточных серверов ретрансляции, создавая прямой канал связи (Peer-to-Peer) между камерой установки и браузером. Такой подход минимизирует лаг видеосигнала, позволяя студенту мгновенно оценивать реакцию системы на вводимые команды.

3. **Серверная логика и масштабируемость.** Бэкенд платформы функционирует на базе асинхронной модели обработки запросов. Это обеспечивает высокую производительность при пиковых нагрузках, позволяя десяткам пользователей одновременно работать с лабораторными стендами без потери качества соединения. Система балансировки нагрузки эффективно распределяет потоки данных между различными узлами.

4. **Методическая достоверность.** Принципиальной особенностью системы является отказ от идеализации данных. Платформа транслирует реальные физические шумы, инструментальные погрешности и флуктуации параметров. Сохранение этих факторов позволяет приблизить

дистанционное обучение к натурному эксперименту, требуя от обучающихся навыков статистической обработки результатов и анализа ошибок.

5. Аналитика и перспективы. Встроенные модули логирования фиксируют все действия пользователя и сохраняют массивы экспериментальных данных для построения динамических графиков. Архитектура системы является открытой для интеграции алгоритмов машинного обучения (ML), что в перспективе позволит внедрить инструменты предиктивного анализа поведения установок и адаптивной поддержки учебного процесса.

Результаты апробации и педагогический потенциал

Экспериментальная апробация разработанной облачной архитектуры осуществлялась с использованием экспериментального стенда, предназначенного для анализа механических колебательных процессов. Данное оборудование было укомплектовано прецизионными датчиками перемещения и виброускорения, а также приводами для генерации возмущений. В рамках апробации решались две ключевые задачи: расчет временного лага между инициированием команды и выводом данных на экран пользователя, а также мониторинг стабильности системы при масштабировании нагрузки.

Методика испытаний предполагала фиксацию сквозной задержки - от момента подачи управляющего сигнала до его визуального отображения в интерфейсе. Параллельно регистрировались экстремальные значения задержек (минимум и максимум) для различных сценариев интенсивности подключений. Систематизированные данные об изменении времени отклика в зависимости от объема трафика и количества активных сессий приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Задержки системы

Кол-во одновременных пользователей	Средняя задержка, мс	Минимальная задержка, мс	Максимальная задержка, мс
10	62	55	70
20	68	60	80
30	75	65	90
40	102	90	120
50	118	100	140

Анализ данных выявил прямую корреляцию между объемом сетевого трафика (количеством сессий) и временем отклика системы. При работе малых групп (до 20 человек) временной лаг варьируется в пределах 60–70 мс, что субъективно воспринимается как моментальная реакция оборудования. В условиях повышенной нагрузки (до 50 активных подключений) задержка возрастает до 100–120 мс. Однако даже такие показатели укладываются в рамки стандартов для интерактивных систем управления, не создавая дискомфорта при проведении опытов. Стабильность минимальных и пиковых значений задержки свидетельствует о высокой надежности выбранных протоколов передачи данных.

Полученные результаты доказывают, что предложенная программно-аппаратная архитектура эффективно масштабируется. Для дистанционного образования это является ключевым фактором, так как позволяет поддерживать высокое качество обучения в группах с большой численностью студентов.

С точки зрения педагогики, внедрение такой лаборатории качественно превосходит стандартное имитационное моделирование. Работа с реальным стендом позволяет учащимся:

- 1) Взаимодействовать с подлинными физическими явлениями, а не их программными упрощениями.
- 2) Осваивать методику оценки приборных погрешностей и сигнальных помех.
- 3) Верифицировать теоретические выкладки на основе эмпирических данных.
- 4) Приобретать навыки работы с телеметрическими системами и цифровой обработки сигналов.

Особого внимания заслуживает возможность организации групповой работы. Совместное управление и мониторинг физических процессов способствуют развитию гибких навыков:

критического мышления, умения работать в команде и оперативно принимать решения в динамически меняющихся условиях эксперимента. Таким образом, разработанная платформа представляет собой надежный инструмент для цифровизации инженерно-технического образования, объединяя технологическую устойчивость с глубокой академической ценностью.

Заключение

В рамках проведенного исследования была спроектирована и верифицирована комплексная программно-аппаратная среда, предназначенная для дистанционного проведения физических опытов в реальном времени. Иерархическая модель платформы, объединяющая клиентский интерфейс, серверный узел и физическое оборудование, гарантирует высокую точность управления, синхронность потоков данных и минимальное время отклика.

Технологическая эффективность: Эмпирические тесты подтвердили, что временной лаг при нагрузке до 50 активных сессий варьируется в диапазоне 60–120 мс. Такие показатели обеспечивают необходимый уровень интерактивности, позволяя сохранять стабильность управления даже в условиях массового использования системы.

Образовательный потенциал: Внедрение удаленного доступа к реальным стендам качественно меняет процесс обучения. В отличие от симуляций студенты взаимодействуют с «живыми» измерениями, учатся учитывать аппаратные погрешности и сопоставлять теоретические гипотезы с эмпирическими результатами, что напрямую способствует росту цифровых и исследовательских навыков.

Рецензент: Хасанов Дж.Р. – к.т.н., доцент кафедры информационных технологий и цифровой экономики ИЦПУИМ, МУПТЭП.

Литература

1. Syzdykbayeva, A. Baikulova and R. Kerimbayeva, "Introduction of Artificial Intelligence as the Basis of Modern Online Education on the Example of Higher Education," 2021 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), Nur-Sultan, Kazakhstan, 2021, pp. 1-8, doi: 10.1109/SIST50301.2021.9465974.
2. I. Kocsis, B. Burján-Mosoni and I. Balajti, "A Comprehensive Review of Key Cyber-Physical Systems, and Assessment of Their Education Challenges," in IEEE Access, vol. 13, pp. 8898-8911, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3527714.
3. S. Liu, "Design of University Life Safety Education Course Scheduling System Based on Improved SFLA Algorithm," 2024 8th Asian Conference on Artificial Intelligence Technology (ACAIT), Fuzhou, China, 2024, pp. 679-683, doi: 10.1109/ACAIT63902.2024.11022262.
4. J. Jeon, J. Jang and S. Ki Jung, "Development and Validation of an AI-Powered OCR Educational Tool for Early Handwriting Instruction for Korean Early Elementary Students," in IEEE Access, vol. 14, pp. 7005-7015, 2026, doi: 10.1109/ACCESS.2026.3651759.
5. Z. Ahmad, S. Rahim, M. Zubair, and J. Abdul-Ghafar, "Artificial intelligence (AI) in medicine, current applications and future role with special emphasis on its potential and promise in pathology: Present and future impact, obstacles including costs and acceptance among pathologists, practical and philosophical considerations. A comprehensive review," Diagnostic Pathol., vol. 16, no. 1, p. 24, Dec. 2021.
6. M. I. B. Ahmed, R. Zaghdoud, M. S. Ahmed, R. Sendi, S. Alsharif, J. Alabdulkarim, B. A. A. Saad, R. Alsabt, A. Rahman, and G. Krishnasamy, "A real-time computer vision based approach to detection and classification of traffic incidents," Big Data Cognit. Comput., vol. 7, no. 1, p. 22, Jan. 2023.
7. C. Butler, R. Pimenta, J. Tommerdahl, C. T. Fuchs, and P. Caçola, "Using a handwriting app leads to improvement in manual dexterity in kindergarten children," Res. Learn. Technol., vol. 27, Apr. 2019, doi: 10.25304/rlt.v27.2135.
8. N. Majid and E. H. B. Smith, "Character spotting and autonomous tagging: Offline handwriting recognition for Bangla, Korean and other alphabetic scripts," Int. J. Document Anal. Recognit. (IJ DAR), vol. 25, no. 4, pp. 245–263, Dec. 2022.
9. L. Juguang and Z. Hua, "Improving Building Intellectualization Level with High-Performance Embedded Technology," 2013 Fourth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications, Zhangjiajie, China, 2013, pp. 357-359, doi: 10.1109/ISDEA.2013.485.
10. Костикова Л. П., Есенина Н. Е., Ольков А. С. Искусственный интеллект в образовательном процессе современного университета: результаты опроса студентов //Концепт. – 2025. – №. 2. – С. 93-109.
11. Романова Л. Л. Специфика профессионального обучения в условиях развития цифровизации и искусственного интеллекта //Концепт. – 2023. – №. 7. – С. 130-141.

12. Осипова Л. Б. Искусственный интеллект в образовании: реальные возможности и перспективы //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. – 2024. – №. 1. – С. 60-73.

13. Буюкова К. И. и др. Отношение студентов и преподавателей к использованию инструментов с генеративным искусственным интеллектом в вузе //Образование и наука. – 2024. – Т. 26. – №. 7. – С. 160-193.

14. H. -P. Hsu and S. -W. Yang, "Optimization of Component Sequencing and Feeder Assignment for a Chip Shooter Machine Using Shuffled Frog-Leaping Algorithm," in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 17, no. 1, pp. 56-71, Jan. 2020, doi: 10.1109/TASE.2019.2916925.

15. Qiqi Pi, Jinyong Yu, Hao Sun, Xinghu Yu, Zhengkai Li, Jianbin Qiu, Juan J. Rodríguez-Andina, Huijun Gao, "Finite Potential Game Heuristic Algorithm for Workload Allocation in Dual-Gantry Placement Machines", IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol.21, no.3, pp.2064-2073, 2025

16. Xiwang Guo, Chenyang Fan, Mengchu Zhou, Shixin Liu, Jiacun Wang, Shujin Qin, Ying Tang, "Human–Robot Collaborative Disassembly Line Balancing Problem with Stochastic Operation Time and a Solution via Multi-Objective Shuffled Frog Leaping Algorithm", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol.21, no.3, pp.4448-4459, 2024.

17. Назаров, А. Ш. DDoS-атаки и средства защиты от них / А. Ш. Назаров, И. Т. Ли // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – № 1(61). – С. 42-45. – EDN VZKHKQ.

18. Каримов, А. А. О цифровом портрете текстовой информации / А. А. Каримов // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 1(45). – С. 7-10. – EDN BVSGNV.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ - СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ - INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Ван Цуйцуй	Ван Цуйцуй	Wang Cuicui
Докторант PhD	Докторант PhD	PhD Student
Донишкадаи омӯзгории Тоҷикистон дар шаҳри Панҷакент	Таджикский педагогический институт в г. Пенджикент	Tajik Pedagogical Institute in Panjakent town
E-mail: 362049385@qq.com		
ORCID: 0000-0002-1200-7795		