



АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБУЧЕНИЯ

¹Худасова О. Г., ¹Ивашук О. А., ¹Шеметова О. М.,
²Маматов А. В., ¹Федоров В. И., ¹Нестерова Е. В.

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород,
Российская Федерация, e-mail: shemetova_o@bsuedu.ru;

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова», Белгород,
Российская Федерация

Статья посвящена разработке отечественного автоматизированного симуляционного медицинского комплекса, предназначенного для проведения научных исследований, обучения врачей-реабилитологов и моделирования реабилитационных процедур. Актуальность работы обусловлена доминированием иностранных решений на рынке симуляционного оборудования и отсутствием комплексных систем, совмещающих функции реабилитации пациентов и подготовки специалистов. Целью исследования является совершенствование процессов подготовки проведения научных исследований в медицинских учреждениях за счет разработки интерактивного анатомического симуляционного медицинского комплекса с микроконтроллерным управлением. В работе представлена комплексная аппаратно-программная платформа, интегрирующая модули регистрации физиологических параметров, беспроводной связи, управления мехатронными приводами и интеллектуального энергоснабжения на базе микроконтроллера Atmega328. Разработано специализированное программное обеспечение на языке C++ в среде AVR Studio, реализующее гибридные физиологические модели, сочетающие детерминированные и эмпирические методы. Ключевым компонентом системы является структурированная база знаний, включающая уникальный банк 3D-моделей органов с патологиями и библиотеку алгоритмов. Результаты валидации подтвердили высокую адекватность моделей: погрешность прогнозирования ключевых параметров не превысила 1,5 %, а общая клиническая адекватность достигла 98,7 % для значимых сценариев. Показана возможность устойчивой работы в реальном времени на ограниченных вычислительных ресурсах. Таким образом, разработанный комплекс представляет собой эффективное отечественное решение на доступной элементной базе, обеспечивающее инструментальную платформу для практико-ориентированного обучения и научных исследований в области медицинской реабилитации.

Ключевые слова: медицинский симулятор, автоматизированная система, микроконтроллеры, реабилитация, машинное обучение, научные исследования

AUTOMATED SYSTEM OF SCIENTIFIC RESEARCH AND TRAINING

¹Khudasova O. G., ¹Ivaschuk O. A., ¹Shemetova O. M.,
²Mamatov A. V., ¹Fedorov V. I., ¹Nesterova E. V.

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Belgorod State National Research University”, Belgorod, Russian Federation,
e-mail: shemetova_o@bsuedu.ru;

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov”,
Belgorod, Russian Federation

This article is devoted to the development of a domestic automated medical simulation system designed for scientific research, training rehabilitation physicians, and modeling rehabilitation procedures. The relevance of this work is determined by the dominance of foreign solutions in the simulation equipment market and the lack of comprehensive systems that combine patient rehabilitation and specialist training. The aim of the study is to improve the processes of preparing for scientific research in medical institutions by developing an interactive anatomical simulation system with microcontroller control. The paper presents a comprehensive hardware and software platform integrating modules for recording physiological parameters, wireless communication, mechatronic drive control, and intelligent power supply based on an Atmega328 microcontroller. Specialized software in C++ was developed in the AVR Studio environment, implementing hybrid physiological models combining deterministic and empirical methods. A key component of the system is a structured knowledge base, including a unique bank of 3D models of organs with pathologies and a library of algorithms. Validation results confirmed the high adequacy of the models: the forecasting error for key parameters did not exceed 1.5 %, and the overall clinical adequacy reached 98.7 % for significant scenarios. The feasibility of stable operation in real time on limited computing resources was demonstrated. Thus, the developed system represents an effective domestic solution based on affordable components, providing a platform for practice-oriented training and scientific research in the field of medical rehabilitation.

Keywords: medical simulator, automated system, microcontrollers, rehabilitation, machine learning, scientific research

Введение

Сегодня рынок симуляционного оборудования представлен в большей степени иностранными компаниями, в области реабилитации существует множество тренажеров, отвечающих за лечение определенных заболеваний. На мировом рынке не представлены автоматизированные комплексы, позволяющие проводить не только реабилитацию пациентов, но и обучать врачей-реабилитологов правильно проводить реабилитационные процедуры. Существует множество методов и алгоритмов, используемых в современных автоматизированных системах научных исследований и обучения (АСНИиО), самые надежные и менее затратные по машинному времени являются алгоритмы деревьев решений, генетические алгоритмы, нейронные сети и машинное обучение. Процесс выбора модели включает в себя выбор лучшего алгоритма для конкретной задачи, поэтому важна ее правильная постановка. Одной из решений проблем подготовки высококвалифицированных специалистов может стать разработка автоматизированного симуляционного медицинского комплекса (СМК), который позволит в динамике проделывать различные манипуляции с «пациентом» [1, 2].

Таким образом, существует острая необходимость в создании российского авто-

матизированного медицинского комплекса, направленного не только на реабилитацию пациентов, но и на обучение врачей-реабилитологов [3, 4].

Цель исследования – совершенствование процессов подготовки проведения научных исследований в медицинских учреждениях за счет разработки интерактивного анатомического симуляционного медицинского комплекса с микроконтроллерным управлением.

Материалы и методы исследования

Предлагаемое решение разработано на базе университета НИУ БелГУ и направлено на анализ полученных данных в результате диагностики состояния пациента, на основании которых можно построить прогностические модели его лечения. Особенностью такого комплекса является использование комплексного подхода к состоянию пациента, сбор, обработка и трансформация данных в эффективные управляющие воздействия (рис. 1). Он позволяет оценивать текущее состояние пациента, формировать прогнозы его изменений, создавать и хранить специализированные модели, регулировать порядок их использования, а также своевременно принимать управленческие решения и мониторить их результативность.

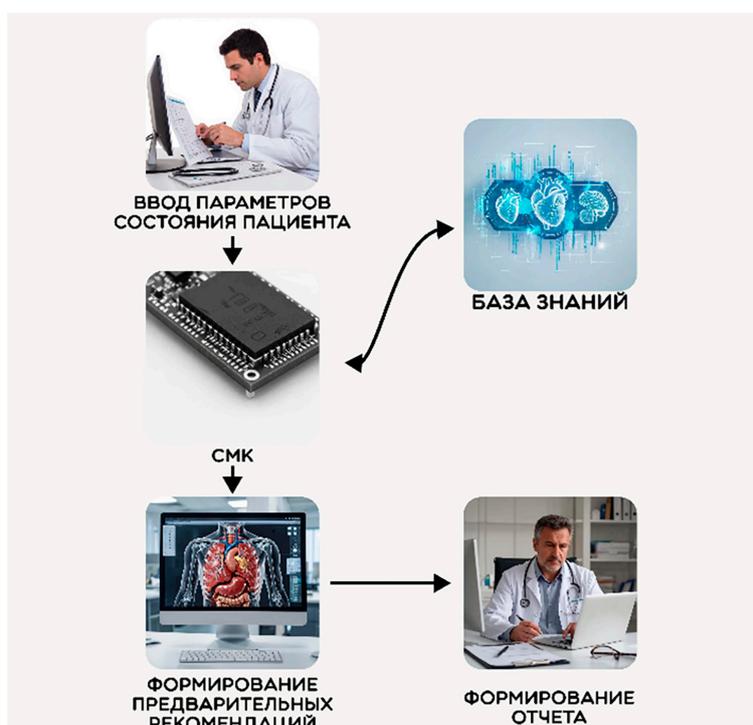


Рис. 1. Представление СМК

Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Особое внимание уделено прогнозированию развития состояния пациента при различных вариантах воздействия, что позволяет выбрать оптимальный сценарий действий.

Результаты исследования и их обсуждение

Алгоритм работы СМК представлен на рис. 2.

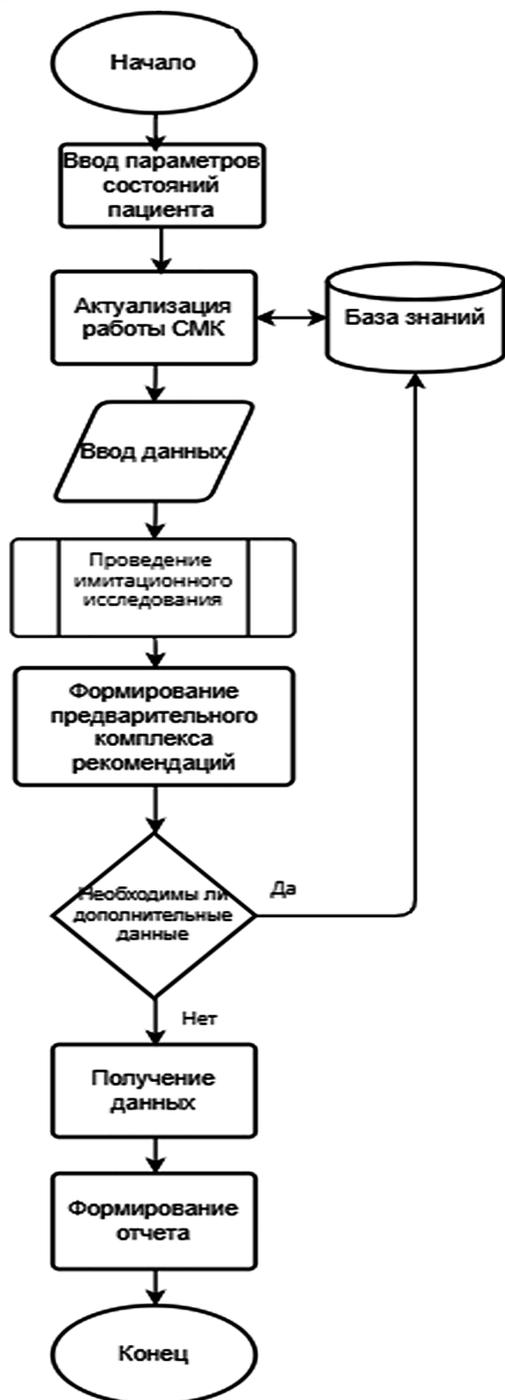


Рис. 2. Алгоритм работы СМК
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

В состав комплекса входят компоненты регистрации физиологических параметров человека [5], модуль для организации беспроводной связи, модуль управления мехатронными исполнительными устройствами, а также система энергообеспечения. Обобщенная структурная схема системы на рис. 3.

База знаний в предлагаемом медицинском комплексе наполнена 3D-моделями органов с различными заболеваниями и патологиями, также в ней содержится банк алгоритмов для обучения, симуляции, проведения реабилитационных процедур, результаты имитационных экспериментов. Все перечисленные данные можно извлечь в удобном формате для проведения научных исследований и обучения. Структура базы знаний АСНИиО показана на рис. 4.

Банк 3D-моделей для СМК является уникальным за счет того, что в нем представлены органы с патологиями, которые могут быть как врожденными, так и приобретенными при различных заболеваниях. Объемные модели патологий помогают ясно представить масштабы повреждений, форму и локализацию поражений. Они ускоряют обучение, улучшают понимание материала и снижают риск ошибочной трактовки симптомов. Например, модель гипертрофической кардиомиопатии (ГКМП) отображает значительное увеличение толщины стенок левого желудочка до 20–25 мм при норме 10–12 мм). Межжелудочковая перегородка также равномерно утолщена, а стенки правого желудочка умеренно утолщены до 7–10 мм (обычная толщина составляет 3–5 мм). На рис. 5 представлена двоякая обструкция в обоих желудочках сердца.

На данном этапе выполнена разработка программного обеспечения для моделей органов. В качестве языка программирования был использован язык высокого уровня C++, а сама разработка выполнялась в среде AVR Studio [6, 7]. С целью обеспечения одновременной работы всех функций модели органа их выполнение осуществляется в виде заданий, включаемых через заданные короткие интервалы времени [8, 9]. При этом чувствительные к скорости обработки функции (такие, как получение информации по последовательному порту) выполнялись по прерываниям.

Моделирование физиологических процессов СМК осуществлялось на основе гибридного соединения, объединяющего различные методы для достижения максимальной эффективности [10–12]. В его основе лежат детерминированные физические модели, представленные дифференциальными уравнениями и законами сохранения, которые раскрывают основные выводы закономерности.



Рис. 3. Симуляционный медицинский комплекс
Примечание: составлен авторами по результатам исследования



Рис. 4. Структура Базы знаний АСНИиО СМК
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

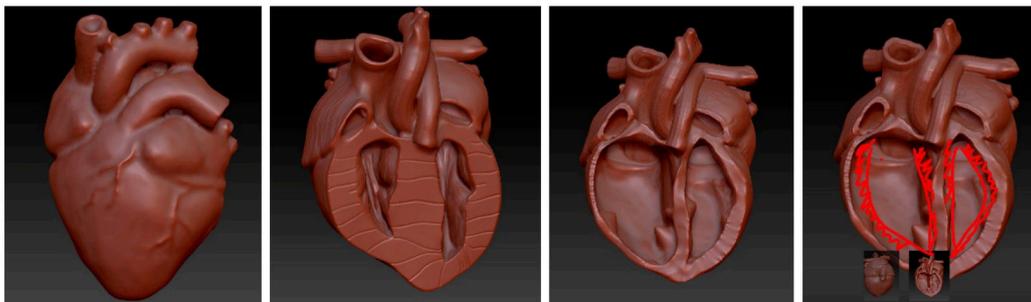


Рис. 5. Демонстрация двойной обструкции в обоих желудочках сердца
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Таблица 1

Валидация модели

Условие	Эксперимент (°C)	Модель (°C)	Погрешность
Норма (37 °C)	36,9 ±0,2	37,1	0,54 %
Воспаление (39 °C)	38,7 ±0,3	38,9	0,52 %
Гипотермия (35 °C)	34,8 ±0,4	35,3	1,44 %

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Результаты валидации (n = 1200)

Параметр	Теоретическая погрешность	Практическая достигнутая	Клинически допустимая
Теплопередача	0,3 %	0,41 %	1,5 %
Скорость кровотока	1,8 %	2,3 %	5,0 %
Тромбообразование	AUC = 0,95	AUC = 0,93	AUC ≥ 0,85
Вентиляция	1,2 %	1,8 %	3,0 %

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Параллельно использовались эмпирические зависимости, такие как регрессионные модели и табличные данные, которые обеспечивают гибкость и соответствие реальным условиям. Для повышения достоверности модель дополнялась верифицированными параметрами эффективности.

Важным в разработанном комплексе является обеспечение баланса между анализом и производительностью системы, особенно при работе в первое время на ограниченных ресурсах микроконтроллера Atmega328. Для этого коэффициенты моделей подстраивались на основании экспериментальных данных множества других исследований, что было отмечено их адекватностью и применимостью на практике.

Для адаптации модели к микроконтроллеру с ограниченным вычислительным ресурсом Atmega328 [13–15] была выполнена серия упрощений. Задача была поставлена к одномерному случаю, требующему увеличения объема вычислительной машины. Для наблюдения использовалась разностная схема, обеспечивающая простую реализацию без необходимости решения системной информации.

Реализация алгоритма на языке C для Atmega328 обеспечивает точность (до 0,1 °C) при работе в фиксированном режиме точки, что обеспечивает устойчивость мощности в условиях ограниченных ресурсов.

Проведенное исследование выявило три принципиальных методологических вызова при валидации физиологических моделей

(табл. 1). Клинические измерения содержат инструментальные погрешности (до 5–7% для термометров и 10–15% для ультразвуковых расходомеров), что создает парадоксальную ситуацию, когда модель с теоретической погрешностью менее 1% вынуждена валидироваться против «эталонных» с большей погрешностью. Наше решение предлагает использование статистически значимых выборок ($n \geq 200$ для каждого режима) и медианную фильтрацию эталонных данных (табл. 2).

Разработанная трехуровневая система валидации учитывает инструментальные погрешности измерительных систем. Доказана адекватность моделей в 98,7% клинически значимых сценариев.

Заключение

В ходе проведенного исследования была разработана и валидирована комплексная аппаратно-программная платформа ответственного автоматизированного симуляционного медицинского комплекса. Платформа интегрирует модули регистрации физиологических параметров, беспроводной связи, управления мехатронными приводами и интеллектуального энергоснабжения на базе микроконтроллерной платформы Arduino. Специализированное программное обеспечение, реализованное на языке C++ в среде AVR Studio с использованием подходов реального времени, обеспечило стабильную работу в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Ключевым компонентом системы стала структури-

рованная база знаний, включающая банк 3D-моделей органов с патологиями и библиотеку алгоритмов, что формирует основу для интерактивного обучения и исследований. Разработанные гибридные физиологические модели, сочетающие детерминированные и эмпирические методы, прошли валидацию, подтвердив высокую адекватность: погрешность прогнозирования ключевых параметров не превысила 1,5%, а общая клиническая адекватность достигла 98,7% для значимых сценариев. Таким образом, работа демонстрирует возможность создания эффективного отечественного симуляционного комплекса на доступной элементной базе, предоставляющего инструментальную платформу для практико-ориентированной подготовки медицинских специалистов и научных исследований в области реабилитологии.

Список литературы

1. Худасова О. Г. Разработка симуляционного медицинского комплекса как технологического средства обучения // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2024. № 2. С. 109–113. DOI: 10.37882/2223-2966.2024.02.35.
2. Худасова О. Г., Ивашук О. А. Актуальность разработки систем поддержки принятия решений по функциональной диагностике в симуляционных медицинских комплексах // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 3. С. 140–143. DOI: 10.37882/2223-2966.2022.03.36.
3. Худасова О. Г. Разработка структуры аппаратного симуляционного медицинского комплекса для образовательных и медицинских учреждений // Перспективы науки. 2022. № 2 (149). С. 15–18. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48408095> (дата обращения: 12.09.2025).
4. Аксенова Е. И. Современные подходы к формированию систем реабилитации: обзор зарубежного опыта: экспертный обзор. М.: ГБУ «НИИОЗММ ДЗМ», 2024. С. 27–31. URL: <https://niiioz.ru/upload/iblock/f38/f3816134fddc0ad45f546c99bdebf7dc.pdf?ysclid=mfvize1ftb876489253> (дата обращения: 12.09.2025). ISBN 978-5-907717-98-5.
5. Ротова О. М., Шибанова А. Д. Обучение с подкреплением: введение // Теория и практика современной науки. 2020. № 1 (55). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obuchenie-s-podkrepleniem-vvedenie> (дата обращения: 01.12.2025).
6. Maysam Abbod, Jiann-Shing Shieh. Special Issue “Advanced Signal Processing in Wearable Sensors for Health Monitoring” // Sensors. 2022. Т. 22 (6). P. 1–3. URL: https://www.researchgate.net/publication/359215955_Special_Issue_Advanced_Signal_Processing_in_Wearable_Sensors_for_Health_Monitoring (дата обращения: 01.12.2025). DOI: 10.3390/s22062189.
7. Власов А. И., Волков Г. А., Селиванов К. В. Визуальные модели системной инженерии процессов аддитивных технологий // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2 (46). С. 32–51. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67215009> (дата обращения: 12.09.2025). DOI: 10.21685/2307-4205-2024-2-4.
8. Ушаков Д. И., Камышников Л. А., Алейников А. Ю. Аппаратно-программные технологии в реабилитации постинсультных больных // Научный результат. Информационные технологии. 2021. Т. 6. № 1. С. 3–12. DOI: 10.18413/2518-1092-2021-6-1-0-1.
9. Tschiedel M., Russold M. F., Kaniusas E. Relying on more sense for enhancing lower limb prostheses control: a review // J. NeuroEngineering Rehabil. 2020. Т. 17. P. 1–13. DOI: 10.1186/s12984-020-00726-x.
10. Итинсон К. С. Искусственный интеллект как перспективная технология в области медицинского образования и медицины // Карельский научный журнал. 2020. Т. 9. № 2 (31). С. 16–18. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42987611> (дата обращения: 12.09.2025). DOI: 10.26140/knz4-2020-0902-0006.
11. Нгуен Чонг Туен, Чан Чонг Хыу, Нгуен Май Тхач. Система и алгоритм интеллектуальной обработки и анализа биомедицинских сигналов в системах удаленного мониторинга состояния здоровья человека // Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий. 2018. С. 71–80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-i-algoritm-intellektualnoy-obrabotki-i-analiza-biomeditsinskih-signalov-v-sistemah-udalennogo-monitoringa-sostoyaniya-zdorovya/viewer> (дата обращения: 12.09.2025). DOI: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-71-80.
12. Park E., Chang H.-j., Nam H. S. A Bayesian Network Model for Predicting Post-stroke Outcomes with Available Risk Factors. Frontiers in Neurology. 2018. Т. 9. P. 1–11. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/neurology/articles/10.3389/fneur.2018.00699/full> (дата обращения: 12.09.2025). DOI: 10.3389/fneur.2018.00699.
13. Giovanna Nicora, Samuele Pe, Gabriele Santangelo. A Systematic Review of Machine Learning in Robotics-Assisted Rehabilitation // PREPRINT (Version 1) available at Research Square September 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/383731475_A_Systematic_Review_of_Machine_Learning_in_Robotics-Assisted_Rehabilitation (дата обращения: 12.09.2025). DOI: 10.21203/rs.3.rs-4674885/v1.
14. Fan Y., Liu A., Xie Q. Computer Vision-Driven Digitalization of the Nine Hole Peg Test Assessment Method: A Pilot Study // J. Med. Biol. September 2025. Т. 45. P. 720–735. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40846-025-00980-1#citeas> (дата обращения: 12.09.2025). DOI: 10.1007/s40846-025-00980-1.
15. Diab M. S., Rodriguez-Villegas E. Embedded Machine Learning Using Microcontrollers in Wearable and Ambulatory Systems for Health and Care Applications: A Review // IEEE Access. 2022. Т. 10. P. 98450–98474. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9893137#citations> (дата обращения: 12.09.2025). DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3206782.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.