

На правах рукописи



ИВАНОВ Александр Дмитриевич

**ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА И ПРОГРАММНОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСА
МОЗГ-КОМПЬЮТЕР-ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ**

**Специальность 2.2.12. Приборы, системы и изделия
медицинского назначения
(технические науки)**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ПЕНЗА – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Тычков Александр Юрьевич

Официальные оппоненты: **Иващенко Антон Владимирович,**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский государственный
медицинский университет» Министерства
здравоохранения Российской Федерации,
директор Передовой медицинской инженерной
школы (г. Самара);

Филист Сергей Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Юго-Западный государственный
университет», профессор кафедры
биомедицинской инженерии (г. Курск)

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение дополнительного
профессионального образования «Российская
медицинская академия непрерывного
профессионального образования»
Министерства здравоохранения Российской
Федерации (г. Москва)

Защита диссертации состоится 23 декабря 2025 г. в «___» часов на заседании диссертационного совета 24.2.357.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет» и на сайте:
https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tehnicheskie_nauki/ivanov

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Светлов Анатолий Вильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Анатомо-физиологические изменения головного мозга представляют собой серьезную медицинскую проблему, занимающую ключевые позиции в структуре смертности населения во всем мире. В структуру таких заболеваний включены неврологические и психиатрические патологии, особое место среди которых занимают расстройства поведения и когнитивные дисфункции, приводящие к профнепригодности, утрате трудоспособности, снижению качества жизни и инвалидизации населения. В настоящее время, в рамках проведения Специальной военной операции, частота данных проявлений возросла вследствие значительного увеличения числа пациентов с посттравматическим стрессовым расстройством, приобретенным во время выполнения боевых задач и после завершения службы.

Для диагностики таких заболеваний применяют различные инструментальные методы, которые позволяют анализировать структуру и функциональное состояние головного мозга с помощью специализированных стационарных и мобильных медицинских устройств и комплексов. Известные методы магнитно-резонансной и компьютерной томографии получили широкое распространение благодаря формированию трехмерных изображений внутренних структур головного мозга. Однако наряду с этими методами важную роль занимает электроэнцефалография, позволяющая оперативнее регистрировать электрическую активность головного мозга и выявлять функциональные нарушения в режиме реального времени. Среди многообразия известных энцефалографов особое внимание уделяется нейроинтерфейсам, обеспечивающим длительный мониторинг работы головного мозга в условиях полной свободной двигательной активности пациента. Известные ученые в России (А. Я. Каплан, Е. В. Велецкий, В. Л. Дорохов) и за рубежом (J. Alvarez, N. Hatsopoulos, J. Donoghue) уже более полувека накапливают опыт практического использования нейроинтерфейсов в клинической практике. Однако по-прежнему существует ряд нерешенных **проблем**, связанных с отсутствием инструментов их сопряжения с техническими средствами медицинской реабилитации, среди которых значимым представляется технология виртуальной реальности.

Виртуальная реальность позволяет моделировать безопасную контролируемую среду, обеспечивая комплексное воздействие на зрительные, слуховые и сенсорные каналы восприятия пациента. Так, специалисты Федерального центра мозга и нейротехнологий ФМБА России, Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта БФУ им. И. Канта и другие активно применяют виртуальную реальность для лечения неврологических патологий, в частности, на этапе восстановления когнитивных функций пациента после инсульта. Несмотря на значительный прогресс в области развития технологий виртуальной реальности, остается ряд нерешенных **проблем**, ограничивающих их широкое применение в медицинской практике, среди которых отмечается отсутствие технических решений для обеспечения синхронизации виртуального пространства к особенностям психического и когнитивного поведения

пациента. Для решения данной проблемы предлагается интегрировать нейроинтерфейс в устройства и технологии виртуальной реальности. Это позволит обеспечить динамическую адаптацию виртуальной среды к состоянию человека и расширить возможности применения технологий в медицинских приложениях. Создание интегрированной системы позволит обеспечить повышение эффективности и оперативности проведения испытательных, тренировочных и реабилитационных мероприятий, и контроль воздействия визуальных, акустических и тактильных стимулов с объективной оценкой состояния человека по данным электрической активности головного мозга.

Целью диссертационного исследования является научное обоснование и разработка технического решения интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность», обеспечивающего адаптацию виртуального пространства к результатам регистрации электрической активности головного мозга в режиме реального времени и свободной двигательной активности.

Задачи исследования:

1. Разработка способа функционирования интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность», обеспечивающего синхронную обработку сигналов электрической активности головного мозга в результате реакций пользователя на имитацию воздействия внешней среды для персонализированной настройки виртуального пространства в режиме реального времени.

2. Создание системы и специализированного программного обеспечения для одновременной регистрации электрической активности головного мозга и воспроизведения сцен виртуальной реальности с возможностью адаптивного изменения сценариев взаимодействия с пользователем.

3. Проектирование системы для тестирования и испытания нейроинтерфейсов, обеспечивающей оценку эффективности функционирования измерительного канала системы.

4. Создание программно-аппаратной платформы для симуляции движения человека в виртуальной реальности, обеспечивающей согласованное с виртуальным аватаром изменение положения пользователя в пространстве с учетом его реакций на внешние стимулы.

Научная новизна:

1. Разработан способ функционирования интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность», отличающийся наличием персонализированных этапов, обеспечивающих адаптацию сцен виртуальной реальности к значимым параметрам ритмов электрической активности головного мозга человека.

2. Создан интерфейс «мозг-компьютер-виртуальная реальность», отличающийся наличием синхронизированных узлов системы: нейроинтерфейса, платформы и сцен виртуальной реальности, в рамках единого специализированного программного обеспечения.

3. Предложена система для испытания нейроинтерфейса, отличающаяся наличием инструментов имитации ритмов электрической активности головного мозга при моделировании воздействий внешней среды.

4. Разработана платформа для симуляции движения в виртуальной реальности, отличающаяся наличием инструментов имитации воздействий внешней среды с обратной связью.

Практическая значимость исследования:

1. Разработан способ функционирования интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность», направленный на повышение эффективности проведения профессиональных испытаний, диагностики и реабилитации пациентов, в том числе людей с ограниченными возможностями здоровья, за счет обеспечения комплексной стимуляции зрительных, слуховых и сенсорных функций.

2. Создан интерфейс «мозг-компьютер-виртуальная реальность», предназначенный для синхронной регистрации сигналов электрической активности головного мозга в лобных отведениях и визуализации виртуальной реальности средствами графического моделирования, в виде конечного устройства и понятийного пользовательского интерфейса для использования в психодиагностике и оценки профессиональной пригодности.

3. Создана система для испытания нейроинтерфейсов, предназначенная для генерации и имитации сигналов электрической активности головного мозга и создания необходимых условий, обеспечивающих эффективную разработку, настройку и испытание интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность».

4. Разработана платформа виртуальной реальности, предназначенная для повышения оперативности реабилитации пациентов психиатрического профиля, в том числе лиц с ограниченными возможностями здоровья, за счет использования трехосевого вращения в условиях свободной двигательной активности и имитации физического воздействия внешней среды.

Методы исследования. В работе использованы методы регистрации сигналов электрической активности головного мозга; программирование и моделирование в средах Visual Studio, PyCharm, MATLAB и Unreal Engine.

Объект исследования: нейроинтерфейс и устройства виртуальной реальности.

Предмет исследования: сигналы электрической активности головного мозга и сцены виртуальной реальности.

На защиту выносятся:

1. Способ функционирования интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность», обеспечивающий плавное и устойчивое взаимодействие пользователя с виртуальной средой путем динамической адаптации виртуального пространства не более чем за 20 мс к результатам регистрации электрической активности головного мозга в режиме реального времени с задержкой обратной связи не более 40 мс (2.2.12, п. 13).

2. Система и специализированное программное обеспечение для синхронной регистрации электрической активности головного мозга и визуализации сцен виртуальной реальности, обеспечивающие регистрацию, обработку и выделения значимых параметров сигналов электрической активности головного мозга, ввод корректирующих параметров и синхронизацию сцен виртуальной

реальности посредством интеграции со средствами графического и математического моделирования (2.2.12, п. 22).

3. Система для испытания нейроинтерфейса, включающая генератор электрической активности головного мозга, позволяющий выполнять проверку целостности измерительного тракта: отсутствие обрывов в цепи, корректность смещения нуля и функционирование каналов регистрации (2.2.12, п. 1).

4. Платформа виртуальной реальности с гироскопической конструкцией, развивающая угловую скорость до $180^\circ/\text{с}$, ускорение до $300^\circ/\text{с}^2$ и погрешность позиционирования $0,1^\circ$, обеспечивающая плавную регулировку углов поворота и свободное перемещение пользователя по трем осям, позволяющая совершать полный 360° оборот и воспроизводить движения виртуального объекта в реальном времени, что способствует повышению реалистичности воспроизведения сценариев движения (2.2.12, п. 13).

Обоснованность и достоверность положений, выносимых на защиту, подтверждаются тем, что в теоретических построениях диссертационной работы использовались законы и положения, справедливость которых общепризнанна. Достоверность и обоснованность научных положений подтверждена результатами моделирования и натурального эксперимента.

Основные результаты диссертационной работы получены при выполнении следующих НИОКР:

1. Социально-средовая, социально-педагогическая и социально-психологическая реабилитация лиц-инвалидов с психическими расстройствами и расстройствами поведения (Государственное задание РФ). № FSGE-2023-0006, 2023–2025 гг.

2. Нейро-VR, ректорские гранты. Приказ № 245/о от 20 марта 2024 г. «О результатах конкурса "Ректорские гранты" ПГУ», 2024 г.

3. Интеллектуальная система программного управления многоосевой платформой для виртуальной реальности с имитацией воздействия внешней среды и обратной связью (АНО «Институт регионального развития»). № ИС/6, 2022–2023 гг.

4. Система оценки поведения космических туристов при возникновении тревожных, стрессовых или внештатных ситуаций на космических станциях в среде виртуальной реальности (Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, Студенческий стартап), 2022–2023 гг.

Реализация результатов исследования. Результаты диссертационного исследования использованы и внедрены в виде:

1) генератора сигналов, позволяющего выполнять проверку прецизионных низкочастотных измерительных трактов в АО «ФНПЦ "ПО Старт" им. М. В. Проценко», г. Заречный Пензенской области;

2) аппаратно-программного интерфейса для решения задач в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по тематике предприятия АО «НИИФИ», г. Пенза;

3) специализированного программного обеспечения для оказания помощи слабовидящим людям на этапе стимуляции зрительных, слуховых

и сенсорных функций в частном учреждении «Нижегородский областной центр реабилитации инвалидов по зрению "Камерата"», г. Нижний Новгород;

4) специализированного программно-аппаратного комплекса для регистрации электрической активности головного мозга и визуализации виртуальной реальности в МБОУ СОШ № 30, г. Пенза;

5) программно-аппаратных решений для проведения профессиональных испытаний и тренировочных мероприятий на базе школы робототехники и программирования «Парадигма», г. Пенза;

6) теоретических и практических результатов при подготовке студентов технических специальностей Пензенского государственного университета по направлениям 12.03.01, 12.04.01 «Приборостроение», 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы», 30.05.03 «Медицинская кибернетика»; магистрантов, аспирантов и научных работников.

Документы о внедрении представлены в приложении Г диссертации.

Апробация работы. Основные положения работы были представлены на международных и всероссийских конференциях, выставках: IX Национальном форуме реабилитационной индустрии и универсального дизайна «Надежда на технологии» (г. Москва, 2024); региональной выставке, посвященной празднованию Дня российской науки (г. Пенза, 2024, 2025); Всероссийском молодежном форуме законодательных инициатив «Идея-5И» (г. Пенза, 2025); Всероссийской конференции, посвященной Дню радио «РЭУС-ИТ 2024» (г. Москва, 2024); XXVII Всероссийском аспирантско-магистерском научном семинаре, посвященном Дню энергетика и 55-летию КГЭУ «АМС–2023» (г. Казань, 2023); Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения, энергетика и цифровая трансформация» (г. Казань, 2023); V Международной научно-практической конференции «Научные исследования молодых ученых» (г. Пенза, 2020); 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) (Moscow, 2025).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных трудов, из них 3 статьи – в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 1 статья – в журнале, индексируемом базой данных Scopus, 2 публикации – в изданиях, индексируемых международными базами данных, 4 свидетельства на программы для ЭВМ и баз данных, 6 публикаций – в материалах конференций, из них 3 без соавторов.

Личный вклад. Все основные результаты диссертационного исследования получены лично автором или при его непосредственном участии. Автором выполнена постановка целей и задач, разработаны основные теоретические положения, реализованы программные и технические решения, проведены экспериментальные исследования и анализ их результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов, библиографического списка из 150 наименований и 4 приложений. Общий объем работы без приложений – 156 страниц, включая 44 рисунка и 5 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы; сформулированы цель и основные задачи исследования; показаны научная новизна и практическая ценность работы; приведены основные положения, выносимые на защиту; представлены сведения об апробации и внедрении результатов.

В первой главе рассмотрена проблематика диагностики заболеваний головного мозга, представлены актуальность и значимость лечения неврологических и психиатрических патологий. Отмечено, что оперативный контроль и коррекция психических функций человека позволят снизить инвалидизацию населения и повысить качество жизни.

В работе проведены обзор и критический анализ современных методов диагностики заболеваний головного мозга; выделены преимущества и недостатки методов регистрации и визуализации электрической активности головного мозга. Среди многообразия известных методов и средств особое внимание уделено нейроинтерфейсам, обеспечивающим неинвазивную регистрацию и длительный мониторинг работы головного мозга в режиме реального времени и в условиях свободной двигательной активности. Представлены современные достижения науки и опыт применения интерфейсов мозг-компьютер в медицинской практике, образовательной сфере и игровой индустрии. Кроме того, в работе рассматривается применение нейроинтерфейса для оценки профпригодности, обеспечивающего выявление индивидуального порога психофизиологической устойчивости у кандидатов в профессии с высокой степенью ответственности.

Обозначены существующие технические и методологические проблемы интеграции нейроинтерфейсов с системами медицинской реабилитации. В качестве решения рассматриваются создание специализированной аппаратной базы (АЦП, микроконтроллеры и др.), разработка алгоритмов цифровой обработки сигналов, а также использование современных программных средств (Matlab, PyCharm и др.) для анализа и обработки данных.

В диссертационной работе отмечена перспективность использования виртуальных технологий в медицинской реабилитации, проведены обзор и анализ известных отечественных и зарубежных решений. Отмечается, что, несмотря на значительный прогресс, остается ряд нерешенных проблем, ограничивающих широкое использование виртуальной реальности в клинической практике. Среди основных проблем выделяется отсутствие программно-аппаратных решений для обеспечения синхронизации виртуального пространства к особенностям психического и когнитивного поведения человека.

По результатам анализа существующих проблем сформулированы задачи диссертационного исследования. Выявлена необходимость разработки и совершенствования аппаратных и программных средств, способов и алгоритмов регистрации и обработки сигналов электрической активности головного мозга. Особое внимание уделяется созданию технических решений, обеспечивающих динамическую адаптацию виртуального окружения к результатам мониторинга работы головного мозга в реальном времени и в условиях свободной двигательной активности пользователя.

Во второй главе описан предложенный автором способ функционирования интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность», обеспечивающий синхронную обработку сигналов электрической активности головного мозга в результате реакций пользователя на имитацию воздействия внешней среды. Способ предназначен для повышения эффективности диагностики и реабилитации пациентов, в том числе людей с ограниченными возможностями здоровья, за счет обеспечения комплексной стимуляции зрительных, слуховых и сенсорных функций. Данный способ предусматривает этапы регистрации, обработки и выделения значимых параметров сигналов электрической активности головного мозга, ввод корректирующих параметров и синхронизации сцен виртуальной реальности. Способ реализует обратную связь между пользователем и виртуальной средой за счет адаптации сцен и изменений параметров функционирования платформы симуляции движения.

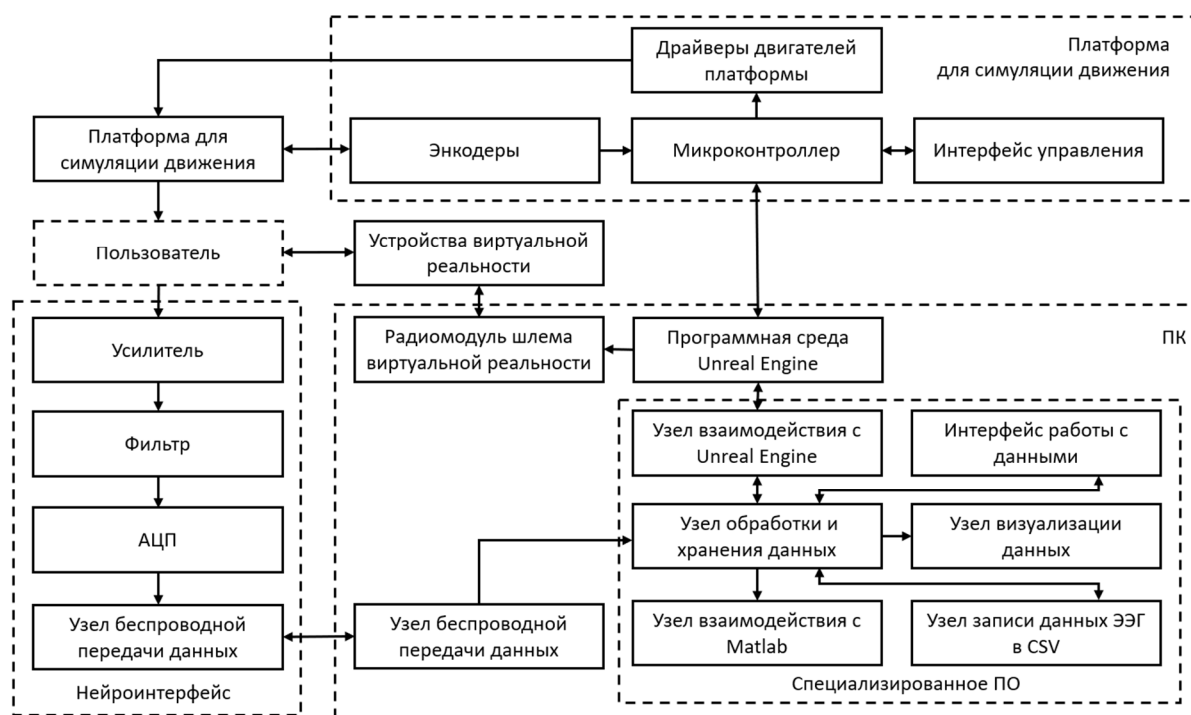


Рисунок 1 – Схема функционирования интерфейса
«МОЗГ-компьютер-виртуальная реальность»

Ключевым элементом интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность» является сам нейроинтерфейс, обеспечивающий регистрацию сигналов электрической активности головного мозга в лобных отведениях. Разработанный в рамках диссертационного исследования опытный образец нейроин-

терфейса приведен на рисунке 2 и состоит из неинвазивных электродов, усилителей, аналоговых фильтров, аналого-цифрового преобразователя и модуля беспроводной передачи данных. Сигналы после регистрации проходят этап усиления и фильтрации, затем преобразуются в цифровую форму и передаются на компьютер. В главе обоснован выбор элементной базы и рассмотрены схемотехнические решения, направленные на улучшение эффективности работы нейроинтерфейса при свободной двигательной активности пользователя. Также приведены конструктивные особенности нейроинтерфейса, повышающие удобство эксплуатации и надежность регистрации сигналов электрической активности головного мозга со шлемом виртуальной реальности в условиях длительного применения (рисунок 3).



Рисунок 2 – Опытный образец нейроинтерфейса

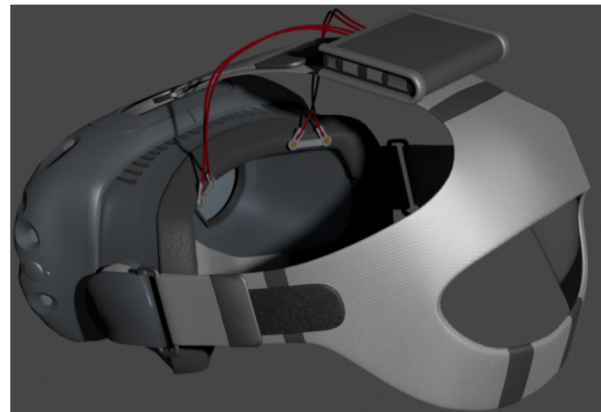


Рисунок 3 – Размещение нейроинтерфейса на шлеме виртуальной реальности

На основе полученных данных от нейроинтерфейса осуществляется настройка виртуальных сцен с использованием среды Unreal Engine (рисунок 4). Для этого применяются средства графического моделирования для настройки цвета, текстуры, формы, прозрачности и других параметров объектов (рисунок 5). Разработанная программная часть нейроинтерфейса также поддерживает экспорт данных в формате CSV и взаимодействие с MATLAB.

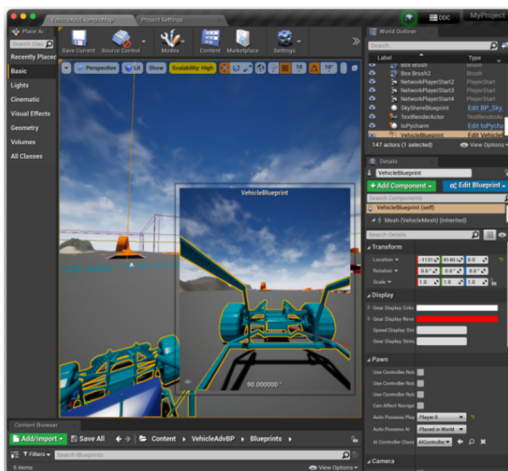


Рисунок 4 – Настройка сцен в среде Unreal Engine

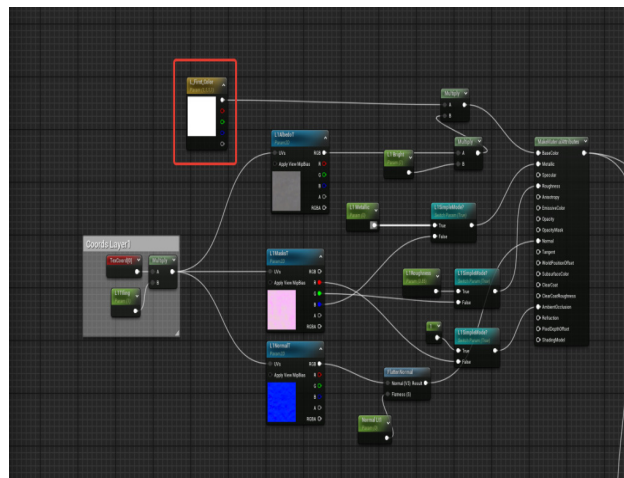


Рисунок 5 – Средства графического моделирования для настройки сцен

На основании результатов моделирования, макетирования и исследования интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность» сформированы его основные технические характеристики, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики интерфейса

Наименование характеристики	Значение характеристики
Язык реализации	Python 3.12
GUI-фреймворк	PyQt 5
Протокол входных данных	OSC UDP
Скорость перерисовки графиков	20 мс
Буфер Raw-сигнала	1000 точек
Буфер ЭЭГ-ритмов	50 точек
Фильтрация данных	Медианная, 10 отсчетов
Одновременно отображаемые графики	6
Формат записи	CSV + Timestamp
Поддерживаемые нейроинтерфейсы	Muse (OSC) и TGAM/MindWave (NeuroPy)
Интеграция с MATLAB	Экспорт данных через UDP/OSC
Интеграция с Unreal Engine	Поток данных по UDP/TCP

В главе решены задачи регистрации сигналов электрической активности головного мозга в условиях свободной двигательной активности пользователя и интеграции с виртуальной средой. Однако для внедрения в клиническую практику необходимо создать инструменты оценки эффективности функционирования измерительного тракта системы.

В третьей главе описана разработанная автором система для тестирования и испытания нейроинтерфейса, предназначенная для генерации и имитации сигналов электрической активности головного мозга и создания необходимых условий, обеспечивающих разработку, настройку и испытание интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность».

В диссертационной работе показаны разработка и особенности построения генератора, имитирующего сигналы электрической активности головного мозга. Для генерации сигналов использовалось выражение, учитывающее условия внешнего воздействия:

$$x(t) = \delta(\Theta_{\delta}; t) + \theta(\Theta_{\theta}; t) + \alpha(\Theta_{\alpha}; t) + \beta(\Theta_{\beta}; t) + \gamma(\Theta_{\gamma}; t) + N(\Theta_M; t) + B(\Theta_N; t),$$

где $\delta(\Theta_{\delta}; t) + \theta(\Theta_{\theta}; t) + \alpha(\Theta_{\alpha}; t) + \beta(\Theta_{\beta}; t) + \gamma(\Theta_{\gamma}; t)$ – функции ритмов; $N(\Theta_M; t)$ – шум; $B(\Theta_N; t)$ – артефакт; Θ_{δ} , Θ_{θ} , Θ_{α} , Θ_{β} , Θ_{γ} , Θ_M , Θ_N – векторные параметры. Раскроем для наглядности функцию дельта-ритма:

$$\delta(\Theta_{\delta}; t) = \delta(\{A_{\delta}(t), f_{\delta}, \varphi_{\delta}\}; t) = A_0 \text{norm} \left[LPF \{ \eta(t) \} \right] \sin(2\pi f_{\delta} t + \varphi_{\delta}),$$

где A_0 – максимальная амплитуда дельта-ритма; *norm* – нормировка результата в диапазон; $LPF \{ \eta(t) \}$ – результат фильтрации шума; $\eta(t)$ – шум, необходимый для создания случайной огибающей, ограничивающей амплитуду ритма; f_{δ} – частота дельта-ритма; φ_{δ} – начальная фаза.

Изменение векторных параметров на основании данных, полученных от виртуальных сцен (смена события, изменение формы объектов, их скорости, освещения), используется при моделировании воздействий внешней среды.

Генератор сигналов использовался на этапах разработки и испытаний нейроинтерфейса. Основное внимание в работе уделено реализации генератора в виде самостоятельного устройства, подключаемого к измерительному тракту системы. Генератор сигналов представляет собой автономное устройство в индивидуальном экранированном исполнении, оснащенное протоколом подключения к входу регистрационного тракта вместо неинвазивных электродов. Генератор формирует ритмы, включая альфа-, тета-, бета- и дельта-активность, а также управляемо воссоздает помехи, такие как электромиографические наводки, дрейф изолинии и движение глаз. При подключении генератора в качестве источника сигнала измерительный тракт функционирует в штатном режиме, а программное обеспечение не требует внесения изменений, поскольку воспринимает входные данные как реальную электрическую активность головного мозга.

Особую значимость генератор приобретает в процессе функционирования интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность». Настройка амплитудно-частотных характеристик сигнала позволяет обеспечить управляемый переход между различными физиологическими состояниями, аналогичными тем, что наблюдаются у реального пользователя. Это дает возможность настроить изменение сцены виртуальной реальности на входные параметры сигналов электрической активности головного мозга. В частности, при изменении значения ритмов в сценах изменяются освещение, цветовая гамма, структура окружающего пространства и поведение объектов в соответствии с логикой адаптации. Это актуально на ранних этапах проектирования интерфейсов и сценариев адаптации, когда важны повторяемость и управляемость событиями.

В дополнение к внешнему исполнению генератора в работе описана возможность реализации его в виде встроенного модуля, размещенного непосредственно на плате нейроинтерфейса. В таком варианте генератор позволяет выполнять функцию автоматической самодиагностики, активируемой программным путем. При включении модуля основной канал отключается от внешних электродов, а на входы АЦП подается тестовый сигнал с параметрами, эквивалентными типовой электрической активности головного мозга. Это позволяет выполнить быструю проверку целостности измерительного тракта, включая отсутствие обрывов в цепи, корректность смещения нуля и функционирование всех каналов регистрации.

В четвертой главе представлено описание платформы для симуляции движения человека в виртуальном пространстве. Платформа сопряжена со шлемом виртуальной реальности и специализированным программным обеспечением для синхронизации электрической активности головного мозга. Платформа обеспечивает изменение положения пользователя в пространстве с учетом его реакций на внешние стимулы и характером движения виртуального

аватара. Платформа может быть использована для медицинской реабилитации пациентов, в том числе лиц с ограниченными возможностями здоровья.

В работе обоснован выбор схемотехнических и конструктивных решений, предложена оригинальная механическая конструкция в виде трех колец, собранных по типу гироскопа, с возможностью плавной регулировки углов поворота каждого из колец. Положение пользователя в пространстве синхронизируется с движениями его виртуального аватара: при движении аватара в виртуальной среде платформа воспроизводит аналогичные движения путем поворота колец.

В работе проведен критический анализ существующих платформ со степенями свободы: 3DoF и 6DoF. Отмечено, что платформы с тремя степенями свободы (3DoF) способны выполнять базовые движения по осям вращения. Несмотря на простоту реализации и относительно низкую стоимость, такие платформы имеют ограничения по диапазону и точности движений, что не позволяет полноценно воспроизвести имитацию внешних воздействий. Платформы с шестью степенями свободы (6DoF) обеспечивают расширенный диапазон перемещения, включая вращательные и поступательные движения, позволяющие имитировать сложные сценарии взаимодействия с виртуальной средой. Тем не менее анализ существующих 6DoF решений показал наличие определенных недостатков, связанных с низкой погрешностью позиционирования. Кроме того, рассмотрены платформы, использующие манипуляторы, представляющие собой механические конструкции и роботизированные устройства, предназначенные для имитации сложных движений с обратной связью. Такие системы позволяют создавать реалистичные ощущения движения, однако характеризуются значительной сложностью конструкции и ограничены для медицинских приложений.

На основании проведенного обзора в работе описан оригинальный макет трехосевой платформы. На рисунке 6 показана структурная схема платформы, которая состоит из персонального компьютера, блока управления и узлов двигателей. Схема описывает принцип вращения трех колец с помощью шаговых двигателей, управляемых микроконтроллером. В основе схемы используется персональный компьютер со средой Unreal Engine. С помощью последовательного порта данные передаются в блок управления. Каждый двигатель подключен к контроллеру через отдельный драйвер шагового двигателя. Для точного позиционирования и обратной связи по положению каждого кольца используются энкодеры, каждый из которых соединен механически со своим кольцом: внешним, средним и внутренним. Для управления в ручном режиме, изменения параметров и отображения текущего состояния используются энкодер управления и LCD-дисплей, которые подключаются к микроконтроллеру. Между драйверами и шаговыми двигателями через токосъемники реализована связь, обеспечивающая передачу управляющих сигналов при вращении подвижных частей. Благодаря такой организации передачи питания платформа способна реализовывать непрерывное вращение в трех степенях свободы, обеспечивающее определенное положение пользователя.

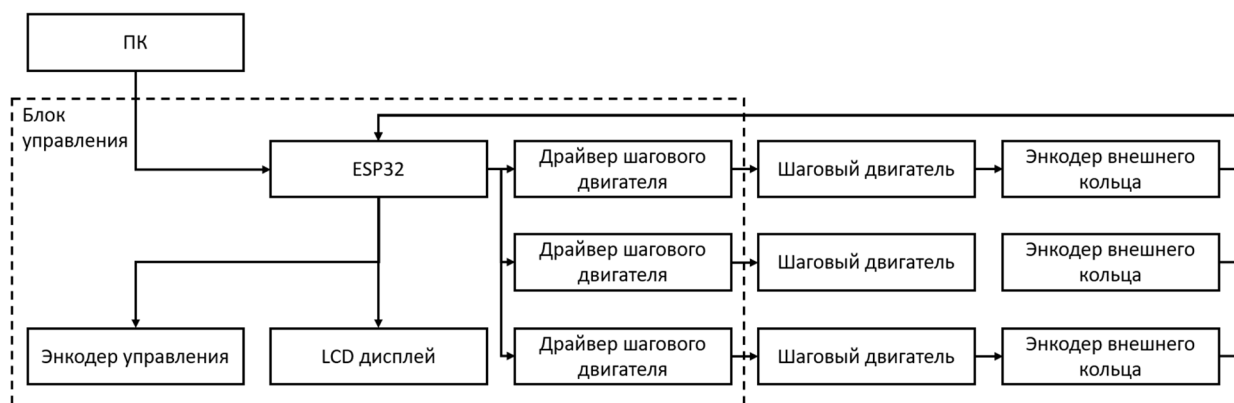


Рисунок 6 – Структурная схема платформы симуляции движения

В диссертации описан блок управления платформой, обеспечивающий взаимодействие элементов и синхронизацию их работы с виртуальными сценариями (рисунок 7). Контроллер получает команды от компьютера, к нему подключены элементы ручного управления и дисплей для отображения рабочих параметров. Управляющие сигналы передаются на приводы, обеспечивающие вращение платформы по трем осям, через токопередающие узлы. Положение каждой оси контролируется с помощью выражения, реализующего обратную связь, что обеспечивает точное управление движением платформы:

$$u(t) = (K_p K_{fb})e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

где $u(t)$ – управляющее воздействие на платформу; K_p – базовое значение пропорционального коэффициента; K_{fb} – коэффициент обратной связи; K_i – интегральный коэффициент; K_d – дифференциальный коэффициент; $e(t)$ – разность между целевым углом из VR-сцены и фактическим углом платформы.

Введенный в классическую формулу коэффициент обратной связи K_{fb} ПИД-регулятора передается от нейроинтерфейса после расчета реакции пользователя на внешнее воздействие на основании данных электрической активности головного мозга. Уменьшение K_{fb} заставляет платформу совершать менее резкие движения, что увеличивает среднюю абсолютную ошибку ERR (таблица 2).

Таблица 2 – Зависимость средней абсолютной ошибки ERR от коэффициента обратной связи K_{fb}

Коэффициент обратной связи K_{fb}	Средняя абсолютная ошибка ERR , град
0,7	7,172
1,0	5,562
4,0	1,576

Отдельное внимание в работе уделено созданию специализированного программного обеспечения для управления платформой, реализованного с использованием сред программирования Visual Studio и PyCharm. Программное

обеспечение, реализующее динамическое изменение сценариев погружения пользователя, предназначено для взаимодействия платформы с виртуальной реальностью и нейроинтерфейсом.

В диссертации подробно описаны элементы конструкции и функциональное назначение каждого из узлов. На рисунке 8 приведена графическая иллюстрация макетного образца платформы.

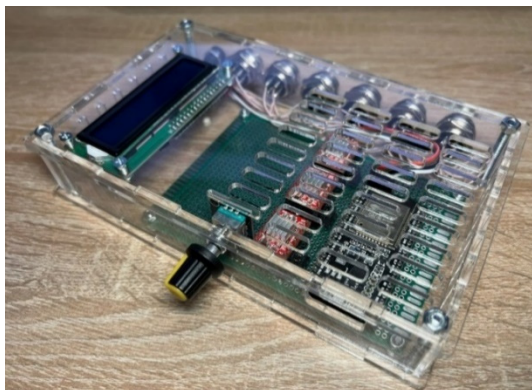


Рисунок 7 – Блок управления платформой симуляции движения



Рисунок 8 – Макет платформы симуляции движения

На основании результатов моделирования и макетирования платформы, а также результатов сравнительного анализа сформированы технические характеристики платформы, приведенные в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики платформы

Наименование характеристики	Значение характеристики
Степени свободы	3 DoF (крен, тангаж, рыскание)
Диапазон вращения осей	360°
Тип приводов	Серводвигатели 1кВт с редукторами
Максимальная скорость вращения	До 180°/с
Максимальное угловое ускорение	До 300°/с ²
Система управления	EtherCAT
Сенсоры обратной связи	Оптические энкодеры
Токосъемник	Промышленный скользящий контакт на 24 канала (до 20 А/канал)
Связь с ПК	Ethernet / Wi-Fi / USB, поддержка протоколов UDP и Serial
Интерфейс отладки	Web-конфигуратор через Wi-Fi (Captive Portal)
Интеграция с виртуальной реальностью	Поддержка Unreal Engine, Unity

В главе рассмотрены вопросы безопасности и эргономики платформы. Проведен анализ потенциальных рисков, возникающих при использовании платформы, предложены конструктивные и программные решения, минимизирующие вероятность травматизма, в частности, предусмотрена система автоматического аварийного отключения и ограничения максимальных углов наклона и скорости движения.

Сделаны выводы о целесообразности дальнейших исследований практического применения платформы для виртуальной реальности в реабилитационных центрах, клиниках и специализированных учреждениях здравоохранения.

В приложениях представлены листинг программы синхронной регистрации электрической активности головного мозга и визуализации сцен виртуальной реальности (приложение А); листинг программы испытания нейроинтерфейса (приложение Б); листинг программы управления платформой симуляции движения виртуальной реальности (приложение В); документы, подтверждающие использование и внедрение результатов диссертационного исследования (приложение Г).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложенный способ функционирования интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность» обеспечивает плавное и устойчивое взаимодействие пользователя с виртуальной реальностью за счет динамической адаптации виртуального пространства до 20 мс на основе регистрации электрической активности головного мозга в режиме реального времени. Задержка обратной связи сигнала не превышает 40 мс, что способствует повышению эффективности диагностики и реабилитации пациентов, включая лиц с ограниченными возможностями здоровья.

2. Лабораторный образец интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность» осуществляет регистрацию сигналов электрической активности головного мозга в лобных отведениях, а также обработку и выделение параметров ритмов. Специализированное программное обеспечение вводит корректирующие параметры и синхронизирует сцены виртуальной реальности посредством интеграции с графическим (Unreal Engine) и математическим (MATLAB) средствами моделирования, что ориентирует его для применения в нейрореабилитации и психодиагностики.

3. Система для испытания нейроинтерфейса имитирует электрическую активность головного мозга и осуществляет проверку целостности измерительного тракта, включая отсутствие обрывов в цепи, корректность смещения нуля и функционирование каналов регистрации.

4. Платформа для симуляции движения в виртуальной реальности с гироскопической конструкцией развивает угловую скорость до 180 °/с и ускорение до 300 °/с² с точностью позиционирования 0,1°. Платформа обеспечивает плавную регулировку углов поворота и свободное перемещение пользователя по трем осям, позволяя совершать непрерывное вращение и воспроизводить движения виртуального объекта в реальном времени. Платформа предназначена для повышения эффективности проведения мероприятий профессионального отбора и реабилитации пациентов психиатрического профиля, включая лиц с ограниченными возможностями здоровья, за счет имитации физического воздействия внешней среды.

5. Проведены натурные испытания системы и специализированного программного обеспечения интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность». Все компоненты системы работали согласованно в реальном времени: регистрация сигналов электрической активности головного мозга, предварительная фильтрация и параметризация, передача данных в Unreal Engine. Симуляционная платформа устойчиво воспроизводила целевые углы вирту-

альных сцен с регулируемыми параметрами реакции на управляющий стимул. Обеспечивались синхронизация визуальной и сенсорной подсистем, корректный обмен данными и отсутствие критичных задержек. Специализированное программное обеспечение выполняло двунаправленную связь с Unreal Engine, визуализацию данных и реализацию дополнительных функций (выбор и управление сценариями, сохранение результатов и т.д.). На основе полученных технических решений сформирован единый экспериментальный стенд, обеспечивающий эффективное и безопасное воспроизведение результатов диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

1. Иванов, А. Д. Применение технологии виртуальной реальности в системах поддержки принятия врачебных решений / А. Ю. Тычков, Д. С. Чернышов, А. Д. Иванов, Н. С. Бофанова, А. К. Алимуратов, П. П. Чураков, З. М. Юлдашев, А. В. Агейкин, О. С. Симаков // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 69–74. – doi: 10.18127/j15604136-202402-09. – EDN: DNWNQK
2. Иванов, А. Д. Система взаимодействия шлема виртуальной реальности и нейроинтерфейса / А. Д. Иванов, А. Ю. Тычков, О. С. Симакова, А. К. Алимуратов, А. Н. Тычкова, Д. С. Чернышов, Д. Л. Овчинников, З. М. Юлдашев // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2024. – Т. 27, № 5. – С. 41–45. – doi: 10.18127/j15604136-202405-06. – EDN: ILLWKN
3. Иванов, А. Д. Интеллектуальная система программного управления многоосевой платформой для виртуальной реальности с имитацией воздействия внешней среды и обратной связью / А. Д. Иванов, А. Ю. Тычков, Д. С. Чернышов, С. Ю. Тверская, Р. В. Золотарев, М. С. Яковлев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2023. – № 2 (44). – С. 97–103. – doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-12. – EDN: NQSMUG

Статья в журнале, индексируемом базой данных Scopus

4. Ivanov, A. D. A system for periodometric analysis of data on brain electrical activity in subjects in virtual space / D. S. Chernyshov, A. Y. Tychkov, O. S. Simakova, D. L. Ovchinnikov, V. N. Gorbunov, A. K. Alimuradov, A. D. Ivanov // Biomed Eng. – 2025. – № 58. – P. 367–370. – doi: <https://doi.org/10.1007/s10527-025-10435>

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science

5. Ivanov, A. D. Adaptive VR Systems Based on EEG and Machine Learning Algorithms / A. D. Ivanov, A. Y. Tychkov, R. N. Khizbullin, A. K. Alimuradov, D. S. Chernyshov. – 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – Moscow, Russian Federation, 2025. – P. 1–5. – doi: 10.1109/REEPE63962.2025.10970853
6. Ivanov, A. D. Development of a Medical Decision Support System for the Assessment of Anxiety-Phobic Disorders Using Virtual Reality Technology / A. Y. Tychkov, D. S. Chernyshov, A. K. Alimuradov, P. P. Churakov, Z. M. Yuldashev, A. D. Ivanov. – 2023 Systems and Technologies of the Digital HealthCare (STDH). – Tashkent, Uzbekistan, 2023. – P. 221–223. – doi: 10.1109/STDH59314.2023.10490802

Публикации в других изданиях

7. Иванов, А. Д. Разработка совместимого с VR-устройствами беспроводного нейроинтерфейса / А. Д. Иванов // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий («РЭУС-ИТ 2024») : доклады Всероссийской конференции, посвященной Дню радио (г. Москва, 31 мая 2024 г.). – Москва : Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова, 2024. – С. 155–159. – EDN: SREAVD

8. Иванов, А. Д. Программное обеспечение для мониторинга электрической активности головного мозга в условиях погружения в виртуальную реальность / А. Д. Иванов, А. Ю. Тычков, Д. С. Чернышов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2024. – Т. 16, № 2 (62). – С. 14–21. – EDN: WOBYWX

9. Иванов, А. Д. Система определения тревожно-фобических расстройств в среде виртуальной реальности / А. Д. Иванов // XXVII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика и 55-летию КГЭУ «АМС–2023» : материалы докладов (г. Казань, 5–6 декабря 2023 г.). – Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 555–559. – EDN: KWZKUG

10. Иванов, А. Д. Система адаптивной виртуальной реальности с использованием нейроинтерфейса / А. Д. Иванов // Вестник Пензенского государственного университета. – 2023. – № 2 (42). – С. 121–126. – EDN: CCGNDG

11. Иванов, А. Д. Оборудование для приема и обработки сигналов / А. Д. Иванов // Научные исследования молодых ученых : сборник статей V Международной научно-практической конференции (г. Пенза, 27 июля 2020 г.). – Пенза : Наука и Просвещение, 2020. – С. 37–39. – EDN: YIKIQU

12. Иванов, А. Д. ISDN-технология передачи цифрового сигнала / А. Д. Иванов, А. Р. Салдаева // Точная наука. – 2020. – № 83. – С. 4–9. – EDN: MCRQLZ

Объекты интеллектуальной собственности

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023618323 Российская Федерация. Программа для управления многоосевой платформой виртуальной реальности / А. Ю. Тычков, Д. С. Чернышов, Р. В. Золотарев, А. Д. Иванов [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». – № 2023616204 ; заявл. 03.04.2023 ; опубл. 21.04.2023. – EDN: EZKVWW

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2024668272 Российская Федерация. Пользовательский интерфейс системы мозг-компьютер / А. Ю. Тычков, Д. С. Чернышов, В. Н. Горбунов, А. Д. Иванов [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». – № 2024667629 ; заявл. 29.07.2024 ; опубл. 06.08.2024. – EDN: TCIFMU

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2024669529 Российская Федерация. Программная реализация системы регистрации и отображения физиологических данных / А. Ю. Тычков, Д. С. Чернышов, В. Н. Горбунов, А. Д. Иванов [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». – № 2024667696 ; заявл. 29.07.2024 ; опубл. 19.08.2024. – EDN: ZNXJLU

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2025682628 Российская Федерация. Программное обеспечение NeuroVR / А. Ю. Тычков, Д. С. Чернышов, В. Н. Горбунов, А. Д. Иванов [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». – № 2025681491 ; заявл. 11.07.2025 ; опубл. 25.08.2025. – EDN: BNQCSC

Научное издание

ИВАНОВ Александр Дмитриевич

**ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИНТЕРФЕЙСА МОЗГ-КОМПЬЮТЕР-ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ**

Специальность 2.2.12. Приборы, системы и изделия
медицинского назначения
(технические науки)

Редактор *Н. А. Сидельникова*
Технический редактор *Р. Б. Бердникова*
Компьютерная верстка *Р. Б. Бердниковой*

Подписано в печать 22.10.2025. Формат 60×84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,16. Заказ № 540. Тираж 100.

Издательство ПГУ.
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
Тел./факс: (8412) 66-60-49, 66-67-77; e-mail: iic@pnzgu.ru