

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора
Ивашенко Антона Владимировича
на диссертацию Иванова Александра Дмитриевича
**«Интегрированная система и программное обеспечение интерфейса
мозг-компьютер-виртуальная реальность»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского
назначения (технические науки)

Актуальность темы

Актуальность диссертационной работы Иванова А.Д. определяется необходимостью разработки новых принципов построения человеко-машинных интерфейсов, обеспечивающих двунаправленное взаимодействие между пользователем и технической системой. Создание интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность» представляет собой новую междисциплинарную задачу, решение которой позволит реализовать динамическую адаптацию виртуальной среды к состоянию человека на основе регистрации его биоэлектрической активности.

Ключевой проблемой в этой области является отсутствие научно обоснованных способов и алгоритмов, обеспечивающих сквозную обработку данных: от регистрации сигналов и выделения информативных параметров ритмов электроэнцефалографии (альфа, бета, тета, дельта) до формирования управляющих воздействий для персонализированной настройки сцен виртуальной реальности.

Структура и содержание 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.

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

Материалы, изложенные в диссертации, позволяют сформировать достаточно полное представление о проведенных исследованиях и полученных результатах.

В первой главе представлен подробный обзор и критический анализ актуальных проблем, связанных с диагностикой и лечением неврологических и психиатрических патологий. Автор подчеркивает, что анатомо-физиологические изменения головного мозга являются серьезной медицинской проблемой, ведущей к инвалидизации и снижению качества жизни. Особенная актуальность темы обусловлена ростом числа пациентов с посттравматическим стрессовым расстройством в рамках проведения Специальной военной операции. Проведен анализ современных инструментальных методов диагностики, таких как магнитно-резонансная томография (МРТ) и компьютерная томография (КТ), которые позволяют визуализировать структуру мозга. Однако особое внимание уделено электроэнцефалографии (ЭЭГ) как методу, обеспечивающему оперативную регистрацию функционального состояния мозга в реальном времени. Среди разнообразия энцефалографов выделены нейроинтерфейсы, обеспечивающие длительный мониторинг в условиях свободной двигательной активности пациента. Рассмотрены достижения ведущих российских и зарубежных ученых в области практического применения интерфейсов «мозг-компьютер» (ИМК) в клинической практике, образовании и игровой индустрии, а также для оценки профессиональной пригодности. На основе проведенного анализа сформулирована необходимость разработки интегрированной системы «мозг-компьютер-виртуальная реальность» для динамической адаптации виртуальной среды

на основе данных ЭЭГ.

Во второй главе описан разработанный автором способ функционирования и архитектура интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность» (МКВР). Предложенный способ обеспечивает синхронную обработку сигналов электрической активности головного мозга в ответ на реакции пользователя на имитацию воздействия внешней среды. Это позволяет проводить персонализированную настройку виртуального пространства в режиме реального времени. Способ включает этапы регистрации, обработки и выделения значимых параметров сигналов ЭЭГ, ввода корректирующих параметров и синхронизации сцен виртуальной реальности, реализуя таким образом обратную связь между пользователем и виртуальной средой. Впервые в работе вводится понятие интерфейса МКВР как единой системы, состоящей из синхронизированных узлов: нейроинтерфейса, платформы и сцен виртуальной реальности, функционирующих под управлением специализированного программного обеспечения. Ключевым элементом системы является разработанный опытный образец нейроинтерфейса, который включает неинвазивные электроды, усилители, аналоговые фильтры, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и модуль беспроводной передачи данных. Описаны конструктивные особенности, обеспечивающие совместимость нейроинтерфейса со шлемом виртуальной реальности и надежность регистрации сигналов в условиях свободного движения. Для визуализации и адаптации виртуальных сцен используется среда Unreal Engine, позволяющая настраивать параметры объектов (цвет, текстуру, форму) на основе данных ЭЭГ. Программная часть системы реализована на Python 3.12 с использованием GUI-фреймворка PyQt 5, поддерживает протокол OSC UDP для передачи данных, экспорт в формате CSV и интеграцию с MATLAB и Unreal Engine. Приведены основные технические характеристики системы, такие как скорость перерисовки графиков (20 мс) и размеры буферов для raw-сигнала и ЭЭГ-ритмов.

Третья глава посвящена разработке и описанию системы для тестирования и испытания нейроинтерфейса. Данная система предназначена для генерации и имитации сигналов электрической активности головного мозга, что создает контролируемые условия для отладки, настройки и проверки работоспособности интерфейса МКВР на этапах его разработки. Основным компонентом системы является генератор сигналов, который может быть выполнен как в виде автономного экранированного устройства, подключаемого к измерительному тракту вместо электродов, так и в виде встроенного модуля на плате нейроинтерфейса. Генератор воссоздает различные ритмы ЭЭГ (альфа, тета, бета, дельта), а также моделирует артефакты и помехи, такие как электромиографические наводки, дрейф изолинии и движение глаз. Для генерации сигналов используется математическая модель, учитывающая векторные параметры, которые изменяются на основе данных от виртуальных сцен (смена события, изменение объектов, освещения), что позволяет моделировать воздействия внешней среды. При использовании в качестве автономного устройства генератор позволяет проводить всесторонние испытания измерительного тракта, в то время как встроенная версия выполняет функцию автоматической самодиагностики: при активации основной канал отключается от электродов, а на вход АЦП подается тестовый сигнал для проверки целостности цепи, корректности смещения нуля и функционирования всех каналов регистрации. Управляемая генерация сигналов позволяет настраивать амплитудно-частотные характеристики и моделировать переходы между различными физиологическими состояниями, что особенно ценно для отладки алгоритмов адаптации виртуальных сцен на ранних этапах проектирования, обеспечивая повторяемость и управляемость условий испытаний.

В четвертой главе представлено описание разработанной автором платформы для симуляции движения человека в виртуальном пространстве. Платформа представляет собой гироскопическую конструкцию из трех

колец, обеспечивающую три степени свободы (3 DoF): крен, тангаж и рыскание. Она сопряжена со шлемом виртуальной реальности и специализированным программным обеспечением, что позволяет синхронизировать положение пользователя в реальном пространстве с движениями его виртуального аватара. В главе приведен критический анализ существующих платформ (3DoF и 6DoF), обоснован выбор схемотехнических и конструктивных решений. Структурно платформа состоит из персонального компьютера (средой Unreal Engine), блока управления на базе микроконтроллера и узлов двигателей (серводвигатели мощностью 1 кВт с редукторами). Для точного позиционирования и обратной связи используются оптические энкодеры. Управление движением осуществляется по модифицированному ПИД-закону, в который введен коэффициент обратной связи, передаваемый от нейроинтерфейса и зависящий от реакции пользователя на внешние стимулы по данным ЭЭГ. Это позволяет адаптировать характер движения платформы к психофизиологическому состоянию пользователя. Платформа развивает угловую скорость до $180^\circ/\text{с}$, угловое ускорение до $300^\circ/\text{с}^2$ и обеспечивает точность позиционирования $0,1^\circ$. Для связи с ПК используются протоколы Ethernet, Wi-Fi, UDP и Serial. Рассмотрены вопросы безопасности и эргономики, включая систему аварийного отключения и ограничения углов и скорости. Приведены технические характеристики платформы и результаты моделирования, показавшие зависимость средней абсолютной ошибки позиционирования от коэффициента обратной связи. Платформа предназначена для повышения реалистичности и эффективности реабилитационных мероприятий и профессиональных испытаний за счет имитации физического воздействия внешней среды.

Совокупность представленных в диссертационной работе результатов:

- предложенный способ функционирования интерфейса «мозг-компьютер-виртуальная реальность» обеспечивает плавное и устойчивое взаимодействие пользователя с виртуальной реальностью за счет динамиче-

ской 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;

- 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;

- 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;

- платформа для симуляции движения в виртуальной реальности с гироскопической конструкцией развивает угловую скорость до $180^\circ/\text{с}$ и ускорение до $300^\circ/\text{с}^2$ с точностью позиционирования $0,1^\circ$. 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.

Научная новизна исследований и полученных результатов

- 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;
- создан интерфейс «мозг-компьютер-виртуальная реальность», отличающийся наличием синхронизированных узлов системы: нейроинтерфейса, платформы и сцен виртуальной реальности, в рамках единого специализированного программного обеспечения;
- предложена система для испытания нейроинтерфейса, отличающегося наличием инструментов имитации ритмов электрической активности головного мозга при моделировании воздействий внешней среды;
- разработана платформа для симуляции движения в виртуальной реальности, отличающаяся наличием инструментов имитации воздействий внешней среды с обратной связью.

Достоверность результатов исследования

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 натурного эксперимента.

Результаты диссертационного исследования использованы и внедрены в виде:

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

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

- 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;

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

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

- 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.

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.

Основные результаты диссертационной работы получены при выполнении следующих НИОКР:

– 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.;

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

– 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.;

– 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.

Автореферат полноценно отражает содержание диссертационной работы.

Замечания по автореферату и диссертационной работе в целом

1. Не представлены результаты, демонстрирующие повышение эффективности диагностики или реабилитации по сравнению с традиционными методами. Отсутствуют метрики, подтверждающие заявленное «повышение эффективности».

2. Не в полной мере раскрыт протокол и механизм обеспечения синхронизации между потоками данных ЭЭГ (с задержкой ≤ 40 мс) и рендерингом сцен в Unreal Engine (адаптация ≤ 20 мс).

3. Отсутствует детализация модульной структуры специализированного программного обеспечения, интерфейсов взаимодействия между компонентами и используемых протоколов данных (кроме упоминания UDP/OSC) в программно-аппаратном комплексе

«интерфейс мозг-компьютер-виртуальная реальность».

4. Не приведены допустимые значения входного сопротивления и собственных шумов регистрирующих каналов при совместной работе с VR-оборудованием, что не позволяет оценить помехоустойчивость комплекса и полную эффективность ее применения в условиях проведения реабилитационных мероприятий.

5. В диссертации описаны алгоритмы адаптации виртуальных сценариев под конкретного пользователя, однако отсутствуют критерии автоматического прекращения сеанса в условиях дезориентации или повышенной тревожности пациента.

6. В главе 3 перечень тестовых режимов системы испытаний генератора, содержит только типовые ритмические сигналы, однако отсутствуют отдельные режимы проверки отклика системы на кратковременные импульсные помехи и вызванные потенциалы.

7. По тексту встречаются орфографические ошибки и опечатки.

Приведенные замечания не меняют общего положительного мнения о диссертации и не снижают научную и практическую значимость результатов исследования. Диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК, предъявляемыми к докторским диссертациям.

Заключение по работе

Диссертация Иванова А.Д. является законченной научно-квалификационной работой, которая содержит новые и усовершенствованные результаты исследования актуальных научных задач в области построения изделий медицинского назначения для целей развития реабилитационной индустрии и персонализированной медицины.

Диссертационная работа «Интегрированная система и программное обеспечение интерфейса мозг-компьютер-виртуальная реальность» соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных

степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 N 842 (с изменениями на 18 марта 2023 года) к диссертации на соискание степени доктора наук, а автор, Иванов Александр Дмитриевич заслуживает присуждение ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки).

Официальный оппонент, директор Передовой медицинской инженерной школы ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава России, доктор технических наук, профессор,

Иващенко Антон Владимирович

19.11.2025

Специальность 05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах.

Сведения об организации: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава России)

Адрес: 443099, Самарская область, г. Самара, ул. Чапаевская, д. 89

Тел.: +7 (846) 374-10-04 доб. 4924

e-mail: info@samsmu.ru Сайт: <https://www.samsmu.ru>

Подпись Иващенко А.В. заверяю:

Начальник отдела кадров по персоналу подразделений управления, учебного процесса и науки ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава России



Ю.Д. Абакумова