Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.057.7:61

Угланова
Екатерина Романовна

Антропоморфная физическая модель электрической активности головного мозга

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 0713-02 Электронные системы и технологии
(Медицинские электронные системы)

Научный руководитель:
Давыдов Максим Викторович
Кандидат технических наук, доцент

Минск, 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современная медицинская диагностика и нейрофизиология активно используют методы регистрации биоэлектрической активности организма, среди которых особое место занимают электроэнцефалография (ЭЭГ) и электромиография (ЭМГ). Данные методы позволяют получать информацию о функциональном состоянии центральной и периферической нервной системы, выявлять патологические изменения и осуществлять мониторинг эффективности проводимого лечения.

Развитие медицинской техники, нейроинтерфейсов, систем искусственного интеллекта и биомедицинских измерительных комплексов предъявляет повышенные требования к качеству тестирования, калибровки и сертификации диагностической аппаратуры. В настоящее время для этих целей используются либо реальные пациенты и добровольцы, либо электронные генераторы тестовых сигналов. Однако оба подхода имеют существенные ограничения.

Использование добровольцев связано с этическими вопросами, высокой стоимостью исследований и невозможностью обеспечить воспроизводимость параметров биосигналов. Электронные генераторы, в свою очередь, воспроизводят сигналы непосредственно на входах измерительных систем, не учитывая влияние биологических тканей, контактного импеданса электродов и пространственного распределения потенциалов на поверхности головы.

Перспективным направлением решения данной проблемы является создание антропоморфных физических моделей (фантомов), сочетающих цифровую генерацию сигналов и объемную модель головы человека с эквивалентными электрофизическими характеристиками тканей. Подобные системы позволяют максимально приблизить условия испытаний медицинской аппаратуры к реальной клинической практике.

Таким образом, разработка антропоморфного программно-аппаратного комплекса для эмуляции ЭЭГ и ЭМГ сигналов является актуальной научно-технической задачей, находящейся на стыке биомедицинской инженерии, микроэлектроники, материаловедения и информационных технологий.

Цель исследования

Разработка антропоморфного программно-аппаратного комплекса, предназначенного для моделирования и воспроизведения электроэнцефалографических и электромиографических сигналов с учетом пространственного распространения электрических потенциалов в биологических тканях головы человека.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

– провести анализ современных методов регистрации ЭЭГ и ЭМГ;

– исследовать существующие средства эмуляции биопотенциалов;

– разработать конструкцию многослойного антропоморфного фантома головы;

– подобрать материалы с электрофизическими характеристиками, близкими к параметрам биологических тканей;

– разработать аппаратную платформу комплекса;

– реализовать многоканальную систему генерации биосигналов;

– разработать математическую модель распространения электрических потенциалов;

– создать программное обеспечение для генерации нормальных и патологических сигналов;

– реализовать систему беспроводного и проводного взаимодействия между программным и аппаратным уровнями.

Объект исследования:

Биоэлектрическая активность головного мозга и мышечной системы человека.

Предмет исследования

Методы аппаратно-программного моделирования и пространственного воспроизведения ЭЭГ и ЭМГ сигналов в антропоморфных физических моделях.

Научная новизна работы

Научная новизна исследования заключается в разработке комплексного подхода к воспроизведению биоэлектрической активности человека, объединяющего:

– многослойную антропоморфную физическую модель головы;

– многоканальную цифровую генерацию ЭЭГ и ЭМГ сигналов;

– математическое моделирование пространственного распределения потенциалов;

– возможность воспроизведения физиологических, патологических и артефактных сигналов в реальном времени.

В отличие от существующих электронных симуляторов разработанный комплекс учитывает влияние геометрии и проводимости биологических тканей на формирование электрического поля.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанного комплекса:

– при проектировании и испытаниях электроэнцефалографов и миографов;

– в процессе метрологической поверки медицинской техники;

– для обучения студентов медицинских и инженерных специальностей;

– при разработке нейрокомпьютерных интерфейсов;

– для тестирования алгоритмов искусственного интеллекта, выполняющих анализ биоэлектрических сигналов;

– в научно-исследовательской деятельности в области нейротехнологий.

Основные положения, выносимые на защиту

1 Конструкция многослойного антропоморфного фантома головы человека с воспроизведением электрофизических свойств биологических тканей.

2 Методика формирования пространственно распределенных ЭЭГ и ЭМГ сигналов посредством многоканальной генерации и системы внутренних электродов-излучателей.

3 Аппаратная реализация комплекса на базе микроконтроллера ESP32-WROOM-32D и прецизионных цифро-аналоговых преобразователей.

4 Математическая модель распространения электрических потенциалов в многослойной среде фантома.

5 Кроссплатформенное программное обеспечение для управления комплексом и генерации биоэлектрических сигналов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведён анализ существующих методов регистрации электроэнцефалографических и электромиографических сигналов. Рассмотрены международные стандарты размещения электродов, характеристики основных физиологических ритмов головного мозга и особенности регистрации мышечной активности.

Проведен обзор существующих электронных симуляторов и физических фантомов. Показано, что современные решения не обеспечивают одновременное воспроизведение пространственного распределения потенциалов и биологически достоверных сигналов.

Особое внимание уделено исследованию артефактов, возникающих в процессе регистрации ЭЭГ и ЭМГ, включая электрокардиографические, электроокулографические и мышечные помехи. Рассмотрены основные патологические состояния, диагностируемые по ЭЭГ, в том числе эпилептическая активность, нарушения сна и органические поражения головного мозга.

Во второй главе разработана конструкция антропоморфного фантома головы. В основу модели положен принцип послойного воспроизведения анатомических структур человека.

Конструкция включает четыре основных слоя: мозговую ткань, костный слой черепа, мышечную структуру и наружный кожный покров. Для каждого слоя выполнен подбор материалов на основании их электрической проводимости и механических характеристик.

Предложены рецептуры композитных материалов, позволяющие воспроизводить свойства соответствующих биологических тканей. Выполнено обоснование выбора гидрогелей, силиконовых компаундов, эпоксидных материалов и проводящих наполнителей.

Проведен анализ соответствия используемых материалов требованиям санитарно-эпидемиологических норм и международных стандартов биосовместимости.

Третья глава посвящена разработке аппаратной части комплекса.

В качестве центрального вычислительного устройства выбран модуль ESP32-WROOM-32D, обеспечивающий поддержку Wi-Fi, Bluetooth и USB-интерфейсов. Для формирования сигналов использованы высокоточные шестнадцатиразрядные цифро-аналоговые преобразователи DAC8568.

Разработана архитектура многоканального генератора, содержащего 32 независимых канала формирования сигналов. Для обеспечения высокой точности воспроизведения реализованы схемы гальванической развязки, фильтрации и подавления шумов.

Выполнено схемотехническое моделирование аналогового тракта, подтвердившее возможность формирования сигналов микровольтового уровня с низким уровнем собственных шумов.

В четвертой главе представлены математические модели генерации и пространственного распределения ЭЭГ и ЭМГ сигналов.

Для описания распространения электрических потенциалов использован аппарат квазистатического приближения уравнений Максвелла. Реализована модель многослойной сферической среды, позволяющая рассчитывать распределение потенциалов на поверхности фантома.

Разработаны алгоритмы синтеза физиологических ритмов головного мозга, генерации патологических состояний и моделирования различных типов артефактов.

Для моделирования миографической активности предложена функция пространственного затухания сигнала, учитывающая особенности распространения потенциалов в мышечной ткани.

В пятой главе рассмотрена программная реализация комплекса.

Разработано кроссплатформенное программное обеспечение на базе Unity. Реализован пользовательский интерфейс для настройки параметров генерации сигналов, выбора режимов работы и визуализации распределения электрического поля.

Создан универсальный коммуникационный модуль, обеспечивающий обмен данными между программным обеспечением и аппаратной частью по каналам Wi-Fi, Bluetooth и USB.

Разработанное программное обеспечение обеспечивает генерацию сигналов в режиме реального времени и позволяет расширять функциональные возможности комплекса за счет интеграции новых математических моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы разработан антропоморфный программно-аппаратный комплекс для эмуляции электроэнцефалографических и электромиографических сигналов.

Основным результатом исследования является создание концепции универсальной системы, объединяющей физическую модель головы человека, многоканальную цифровую генерацию биосигналов и программные средства моделирования физиологических и патологических состояний.

Разработанный комплекс обеспечивает более высокую степень приближения к реальным условиям регистрации биоэлектрической активности по сравнению с существующими электронными симуляторами.

Полученные результаты могут быть использованы при создании медицинской диагностической аппаратуры, разработке нейроинтерфейсов, обучении специалистов и проведении научных исследований в области биомедицинской инженерии.

Перспективы дальнейших исследований связаны с созданием полноразмерного опытного образца, расширением библиотеки патологических сигналов, внедрением методов машинного обучения и использованием технологий дополненной реальности для визуализации процессов распространения биоэлектрической активности.