

## УТВЕРЖДАЮ

ИО Проректора по научной работе  
и международной деятельности  
ФГБОУ ВО «Юго-Западный  
государственный университет»  
кандидат технических наук, доцент  
А.Ю. Алтухов



« 26 » май 2025 года

## ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ) на диссертацию Кириленко Николая Евгеньевича на тему: «Метод частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

### 1. Актуальность темы исследования

Разработка интерфейсов «мозг-компьютер» (ИМК) является одним из ключевых направлений современных нейротехнологий, находящих применение в медицине, робототехнике, космических системах и потребительской электронике. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, около 15% населения мира страдает от двигательных нарушений, вызванных инсультами, травмами спинного мозга или нейродегенеративными заболеваниями. Для таких пациентов ИМК становятся критически важным инструментом реабилитации и взаимодействия с внешним миром. Однако существующие системы сталкиваются с фундаментальными проблемами: высокой зашумленностью сигналов электроэнцефалограммы (ЭЭГ), априорной неопределенностью паттернов моторной и когнитивной активности, а также вариативностью психофизиологических состояний пользователей.

Традиционные методы анализа ЭЭГ, такие как оконное преобразование Фурье или дискретное вейвлет-преобразование, демонстрируют ограниченную эффективность в условиях маскирования полезных сигналов шумами с близкими спектральными характеристиками. В ряде исследований погрешность локализации, например, премоторных паттернов при использовании классических подходов достигает 500–1000 мс, что неприемлемо для систем реального времени. Кроме того, спектральные свойства паттернов зависят от типа движения (реального, мысленного,

баллистического) и индивидуальных особенностей пользователя, что требует разработки адаптивных алгоритмов.

Исходя из вышесказанного, диссертационное исследование Кириленко Н.Е., направленное на повышение точности классификации команд нейроуправления посредством более точной частотно-временной локализации паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса, является **актуальным**.

## **2. Достоверность и научная новизна результатов работы**

**Достоверность** и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, полученных автором, подтверждается грамотной постановкой основных задач исследования, обоснованностью принятых допущений, корректным применением математического аппарата теории информации, вейвлет-анализа и статистики, а также непротиворечивостью и согласованностью с известными фактами, и исследованиями в рассматриваемой области, экспериментальными исследованиями разработанного метода и алгоритмов, высокой степенью сходимости теоретических результатов с данными экспериментов.

Достоверность результатов работы подтверждается апробацией работы в научных изданиях и выступлениях с докладами на научных конференциях, а также внедрением программных средств в коммерческой организации.

**Научная новизна** рассматриваемого исследования определяется разработанным методом частотно-временной локализации паттернов с априорно неопределенными параметрами, а также разработанными критериальными функциями и алгоритмами применимыми в составе нейроинтерфейсов.

Предложенный и разработанный автором метод отличается от известных методов тем, что обладает свойством робастности к неизвестной вариативности текущего функционального состояния человека, позволяющий повысить точность классификации команд нейроуправления. Автору удалось предложить новые критерии оптимальности для выбора локального частотного диапазона на основе использования трансформант преобразования Фурье, а также на основе трансформант непрерывного вейвлет-преобразования. Предложенные критерии отличающиеся от имеющихся тем, что применимы в условиях маскирования паттерна шумами с близкими или частично совпадающими энергетическими спектрами. Предложенный автором алгоритм, реализующий разработанный метод позволяет проводить частотно-временную локализацию специфических паттернов ЭЭГ в условиях неполноты информации.

## **3. Наиболее существенные результаты исследований и ценность для практического использования полученных соискателем результатов**

Новыми и значимыми для науки и практики являются следующие результаты, полученные в диссертации:

1. Разработан метод частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса, отличающийся от известных методов тем, что обладает свойством робастности к неизвестной вариативности текущего функционального состояния человека и к типу подготавливаемого человеком движения – реальному или мысленному, произвольному или баллистическому, позволяющий повысить точность классификации команд нейроуправления в составе нейрокомпьютерного интерфейса.

2. Разработаны критерии оптимальности для поиска границ локального частотного диапазона, максимально соответствующего частотному диапазону искомого паттерна биоэлектрической активности мозга человека, которые отличаются тем, что применимы в условиях маскирования паттерна шумами с близкими или частично совпадающими энергетическими спектрами, позволяющие позволяющий определять временные и частотные границы паттернов команд нейроуправления.

3. Разработан алгоритм, отличающийся тем, что реализует разработанный метод и позволяет повысить точность классификации команд нейроуправления в нейрокомпьютерном интерфейсе.

**Практическая ценность** диссертационной работы заключается в разработке программно-алгоритмического обеспечения, реализующего новый метод частотно-временной локализации ЭЭГ-паттернов биоэлектрической активности мозга человека, которое позволяет повысить точности классификации команд нейроуправления в ИМК. Подтверждением практической значимости работы является наличие у соискателя свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, а также использование результатов диссертации в научно-исследовательских проектах и грантах ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Ростов-на-Дону) для разработки нейроинтерфейсов и специализированного программного обеспечения, о чем свидетельствуют представленные акты о внедрении.

#### **4. Соответствие требованиям по выполнению, оформлению и апробации диссертационной работы**

Диссертация изложена на 134 страницах, содержит 4 главы, 31 рисунок, 3 таблицы, 3 приложения и список литературы из 126 источников.

**Во введении** обоснована актуальность темы, связанная с необходимостью повышения точности классификации команд нейроуправления в условиях зашумленности сигналов ЭЭГ. Четко сформулированы цель и задачи, объект и предмет, а также методология проведенных исследований, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, представлены сведения о достоверности и апробации результатов, внедрении, публикациях автора, объеме и структуре работы.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена системному анализу современных методов обработки сигналов ЭЭГ в нейрокомпьютерных интерфейсах. Автор детально рассмотрел классические подходы, такие как оконное преобразование Фурье, пространственная фильтрация и вейвлет-анализ, а также их применение для детектирования паттернов, связанных с эпилептической активностью и моторными командами. Выявлены ключевые ограничения традиционных методов: низкое частотное разрешение при использовании дискретного вейвлет-преобразования, высокая чувствительность к шумам с близкими частотными характеристиками и неспособность адаптироваться к вариативности функциональных состояний пользователя. На основе проведенного анализа обоснована необходимость разработки адаптивного метода, сочетающего непрерывное вейвлет-преобразование и энтропийный анализ.

**Во второй главе** диссертационной работы дано подробное описание разработанного метода частотно-временной локализации паттернов. Автор провел математическую формализацию задачи, предложив критерии оптимальности для выбора локальных частотных диапазонов на основе вейвлет-энтропии и спектральной энтропии. Для этого использовано непрерывное вейвлет-преобразование (НВП), обеспечивающее высокое разрешение за счет избыточности параметров масштаба и сдвига. Разработаны критериальные функции, позволяющие определить локальный частотный диапазон, который соответствует наиболее неравномерному распределению энергии в частотно-временном континууме, что позволяет локализовать границы паттернов посредством последующего применения вейвлет-энтропии. Для снижения вычислительной сложности предложена модификация метода с использованием быстрого преобразования Фурье.

**В третьей главе** диссертации описана алгоритмическая и программная реализация метода. Разработаны алгоритмы для LabVIEW и Python, включая функциональные блоки для вычисления критериев оптимальности, вейвлет-энтропии и определения временных границ паттернов. Представлены блок-диаграммы виртуальных приборов, реализующих этапы обработки сигналов. Проведено моделирование с использованием аддитивных паттернов, подтвердившее устойчивость алгоритмов к шумам. Для интеграции в системы с ограниченными ресурсами предложены упрощенные версии алгоритмов на основе спектральной энтропии.

**Четвертая глава** диссертационной работы посвящена экспериментальным исследованиям. В эксперименте участвовали 24 здоровых добровольца, выполнявших реальные и мысленные движения руками. Сигналы ЭЭГ регистрировались на 20 каналах с частотой дискретизации 250 Гц, параллельно фиксировалась электромиограмма (ЭМГ) для определения точных временных меток начала движений. Разработанный метод показал погрешность локализации конечной

границы преоторного паттерна 96–102 мс против 616–930 мс у традиционных методов. При классификации состояний «Покой» и «Подготовка к движению» точность составила 98.6% для разработанного метода и 72.3% для аналогов. Результаты подтверждены статистической обработкой данных и внедрены в проекты РФ и Постановления Правительства РФ №218.

**В заключении** представлены основные результаты работы и сделаны итоговые выводы.

**В приложениях** приведены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, а также копии актов об использовании результатов исследования.

Основные результаты достаточно полно отражены в 22 публикациях, среди них 4 статьи в научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ рецензируемых научных изданий, соответствующих требованиям к публикациям основных результатов кандидатских диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук (в том числе с квартилем K1); 1 публикация в зарубежном издании, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus (с квартилем Q2); 1 монография. Получены 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Основные положения диссертационного исследования докладывались и обсуждались на 6 международных и всероссийских научных конференциях.

Содержание диссертации изложено в последовательной форме. Стиль изложения в целом ясный. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат соискателя в полной степени отражает ее наиболее существенные положения, выводы и рекомендации.

## **5. Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы**

Теоретические и практические результаты диссертации Кириленко Н.Е. целесообразно использовать в научных и иных организациях, деятельность которых связана с исследованиями электроэнцефалограммы, разработкой интерфейсов мозг-компьютер, методов поиска структурных особенностей в биоэлектрических сигналах: ФЦМН (г. Москва); ИВНД и НФ РАН (г. Москва); ИМЧ РАН (г. Санкт-Петербург); НМИЦ им. В. А. Алмазова (г. Санкт-Петербург), а также в других научно-исследовательских организациях при разработке нейроинтерфейсов.

Кроме того, результаты диссертации могут быть использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов по направлениям «Информатика и вычислительная техника», «Нейробиология».

## **6. Замечания и недостатки**

В целом диссертация заслуживает высокой оценки. Однако, она несвободна от недостатков, к числу которых относятся следующие:

1. Недостаточно обоснован выбор базисной вейвлет-функции (db14) для различных типов паттернов;

2. Отсутствует сравнение предлагаемого метода с методами классификации паттернов ЭЭГ на основе глубокого обучения;

3. Отсутствует обоснование возможности применения быстрого преобразования Фурье к исследуемым фрагментам сигнала – нет оценки стационарности;

4. Отсутствие анализа устойчивости метода к изменению параметров ЭЭГ-оборудования;

7. Стилистические погрешности в описании экспериментов (например, не указан размер выборки для вербальных паттернов).

Отмеченные недостатки носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Кириленко Н.Е.

## 7. Выводы

Диссертация Кириленко Николая Евгеньевича представляет собой актуальный научно-исследовательский труд, посвященный разработке метода частотно-временной локализации паттернов с априорно неопределенными параметрами в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса.

Новые научные результаты, полученные в диссертации, имеют высокую значимость в области информатики и направлены на решение актуальной научной задачи, имеющей важное значение для развития технологии интерфейсов мозг-компьютер.

Работа Кириленко Николая Евгеньевича на тему: «Метод частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика, является самостоятельной, завершенной научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и имеющей теоретическую и практическую значимость.

Основные положения диссертации представлены в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК, а также в изданиях, индексированных в реферативной базе Scopus, апробированы на международных и всероссийских научных конференциях. Диссертационная работа соответствует пунктам 3, 4 и 5 паспорта научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Несмотря на отмеченные замечания, работа Кириленко Н.Е. по своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и практической значимости полученных результатов полностью соответствует требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 "О порядке присуждения ученых степеней" (с изменениями и дополнениями) в редакции от 01 января 2025 г.,

предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика. Кириленко Николай Евгеньевич, достоин присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв подготовил доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской инженерии Филлист Сергей Алексеевич.

Отзыв ведущей организации о диссертационной работе Кириленко Николая Евгеньевича на тему: «Метод частотно-временной локализации априорно неопределенных паттернов в составе зашумленных сигналов нейрокомпьютерного интерфейса», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика, обсужден и принят на заседании кафедры биомедицинской инженерии, протокол № 10 от 23 мая 2025 г.

«23» мая 2025 г.



(подпись)

Филлист Сергей Алексеевич

Заведующий кафедрой «Биомедицинская инженерия», д.т.н., профессор

«23» мая 2025 г.



(подпись)

Серегин Станислав Петрович

Профессор кафедры «Биомедицинская инженерия», доктор технических наук, профессор Филлист Сергей Алексеевич, научные специальности: 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и 05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах 05.13.10 Управление в социальных и экономических системах.. Адрес: 305004, г. Курск, ул. Челюскинцев, д.19, аудитория 100а, тел.: 8 (4712) 22-26-60, e-mail: [SFilist@gmail.com](mailto:SFilist@gmail.com).

Заведующий кафедрой «Биомедицинская инженерия», доктор медицинских наук, профессор Серегин Станислав Петрович, научная специальность: 14.01.23 - Урология. Адрес: 305004, г. Курск, ул. Челюскинцев, д.19, аудитория 104, тел.: 8 (4712) 22-26-61, e-mail: [kstubi@yandex.ru](mailto:kstubi@yandex.ru).



С.Ф. Филлист С.А.  
С.В. Серегин  
23.05.2025