

ОТЗЫВ
официального оппонента

на диссертацию Бабича Николая Александровича
**«УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ НА ОСНОВЕ
НЕЙРОИНТЕРФЕЙСА С ПРИМЕНЕНИЕМ МАШИННОГО
ОБУЧЕНИЯ»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика
ИПМаш РАН, 2025г.

Диссертация Бабича Н.А. относится к области искусственного интеллекта, в частности, технологий, основанных на интерфейсах «мозг-компьютер» (ИМК). Она посвящена вопросам разработки неинвазивных ИМК и их применению в системах бесконтактного управления транспортными средствами. В настоящее время ИМК получили широкое распространение как средства связи между мозгом человека и компьютером, в котором могут анализироваться и декодироваться сигналы электрической активности головного мозга с целью определения ментальных состояний человека. Одним из трендов применения ИМК является их использование для управления устройствами с помощью воображения движений с последующей их классификацией и преобразованием в команды управления. Однако решение задачи классификации воображаемых движений даже крупными частями тела, например, руками и ногами, затруднено, вследствие сильной вариативности сигналов мозга и сложности регистрируемых процессов. Особенно это относится к неинвазивным ИМК, которые регистрируют многоканальные электроэнцефалограммы (ЭЭГ), очень грубо отображающие пространственно-временную активность головного мозга при воображении движений. Большой проблемой здесь является повышению точности классификации воображаемых движений. Другая проблема – увеличение числа классов распознаваемых движений. Решение этих проблем актуально именно для использования неинвазивных ИМК в системах управления транспортными устройствами, поскольку низкая точность классификации воображаемых движений приводит к нежелательным ошибкам в управлении, а недостаточное число классов распознаваемых движений ограничивает возможность маневрирования транспортного средства. Следует отметить, что в настоящее время весьма актуальной становится задача создания бесконтактных систем управления индивидуальными транспортными средствами, обеспечивающими индивидуальную мобильность людей с ограниченной подвижностью, вызванной ранениями, а также заболеваниями мозга, например, инсультами. Хотя задача классификации воображаемых движений по сигналам ЭЭГ имеет давнюю историю, она до сих пор является актуальной, особенно в плане достижения высокой точности их классификации и создания практически

применимых систем бесконтактного управления индивидуальными транспортными средствами на базе неинвазивных ИМК. Указанные проблемы обуславливают **актуальность** избранной темы диссертации Бабица Н.А., которая нацелена на разработку экспериментальной системы управления транспортными средствами на основе нейроинтерфейса с применением машинного обучения. Для разработки системы управления в данной работе выбрана инвалидная коляска, являющаяся важным техническим средством взаимодействия с миром для людей с ограниченными двигательными способностями.

Положения, выносимые на защиту: (1) математическое описание процесса сбора и обработки сигналов ЭЭГ для систем управления транспортным средством на основе ИМК; (2) разработанная структура системы управления и ее составные элементы; (3) разработанные алгоритмы предобработки, анализа и классификации сигналов ЭЭГ, а также алгоритмы принятия решений и управления; (4) разработанный метод почти ближайших соседей (FANN); (5) разработанный алгоритм классификации сигналов ЭЭГ с учётом дрейфа параметров, а также дообучения классификатора; (6) разработанная программная платформа на языке Python, позволяющая реализовывать различные системы управления на основе неинвазивных нейроинтерфейсов; (7) разработанный план эксперимента для тестирования разработанной системы управления, направленный на определение точности работы системы и ее эффективности при выполнении экспериментов с реальными испытуемыми.

Теоретически значимые результаты, имеющие новизну:

- метод почти ближайших соседей (FANN), являющийся модификацией известного метода ближайших соседей (KNN), которая позволила снизить зависимость от значения числа k и повысить точность распознавания;

- алгоритм классификации сигналов ЭЭГ с учётом дрейфа параметров, а также дообучения классификатора, который обеспечивает адаптацию системы управления и позволяет повысить точность распознавания сигналов ЭЭГ;

- комплекс алгоритмов предобработки, анализа и классификации сигналов ЭЭГ, а также принятия решений и управления, имеющий универсальный характер и использованный, в частности, при разработке бесконтактной системы управления инвалидной тележкой.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что, созданная программная платформа на языке Python, позволяет реализовывать системы управления на основе нейроинтерфейсов. Эта платформа использована для разработки бесконтактной системы управления роботизированной инвалидной тележкой. Эксперименты с инвалидной тележкой, оснащенной разработанной системой управления, показали возможность практического применения такого средства индивидуальной мобильности для облегчения перемещения людей с нарушениями двигательных способностей в автономном режиме.

Апробация. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 5-ти зарубежных и российских научно-практических конференциях, а также рассматривались и обсуждались на многочисленных семинарах ИПМаш РАН.

Публикации. По теме диссертации опубликовано достаточное количество работ (6 работ, из них 2 – в изданиях из перечня научных журналов, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертаций и журналов, входящих в «Белый список», 4 – в изданиях, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus, 2 – в изданиях, входящих в РИНЦ).

Личный вклад автора. Основные научные положения, теоретические выводы и практические решения, результаты тестирования сформулированы и изложены автором самостоятельно.

Использование результатов. Разработанная система управления на основе ИМК может служить основой для разработки подобных систем для использования в составе индивидуальных транспортных средств инвалидов с ограниченными двигательными способностями. Часть результатов диссертации получена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2021-573 (мегагранта).

Диссертация объёмом 114 страниц состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (61 источник) и приложения.

Анализ содержания глав диссертации Бабица Н.А. позволил выявить следующие **положительные моменты**.

Проведенный в первой главе анализ текущего состояния исследований в области ИМК позволил выявить проблемы при создании и использовании ИМК, возможные пути их решения, а также обоснованно сделать постановку задач диссертации.

Основные теоретические результаты представлены во второй главе. Разработанный и подробно описанный метод почти ближайших соседей (FANN), являющийся модификацией метода ближайших соседей (KNN), позволил снизить зависимость от значения числа k и повысить точность распознавания ЭЭГ-паттернов воображаемых движений рук. Алгоритм классификации сигналов ЭЭГ с учётом дрейфа параметров, а также дообучения классификатора обеспечивает адаптацию системы управления и позволяет повысить точность различения воображаемых отдельных или совместных движений левой и правой рук. Показано, что в ходе тренировки происходит не только обучение системы управления, адаптирующейся к свойствам головного мозга и двигательной системы пациента, но и адаптация человека к особенностям работы при взаимодействии с компьютерной системой через ИМК. Предложенный способ позволяет учесть одновременно оба процесса адаптации в разрабатываемой системе управления.

Состав и структура разработанной программной платформы, представленные в третьей главе, достаточно подробно описаны и указаны задачи, которые решаются каждым из созданных программных модулей, а также способы решения этих задач. Программная платформа

разрабатывалась как универсальная, но для управления инвалидным креслом была специализирована с ориентацией графического интерфейса на проведения экспериментов. Платформа имеет множество модулей, позволяющих эффективно и удобно проводить испытания, связанные с управлением инвалидным креслом по сигналам активности мозга. Модульная архитектура позволяет достаточно быстро менять источники и способы обработки сигналов ЭЭГ и изменять их параметры. Графический интерфейс позволяет контролировать различные параметры эксперимента.

Основные практические результаты представлены в четвертой главе, где описывается процесс тестирования разработанной системы управления инвалидным креслом, приводится план проведения экспериментов и результаты экспериментальной проверки работоспособности системы. Были проведены три эксперимента. Первый эксперимент был направлен на тестирование поворота инвалидного кресла в течение нескольких интервалов (эпох), начало которых определяется подачей звуковых сигналов, длительность которых определяет, куда нужно повернуть кресло. В каждую эпоху пользователь должен попытаться вообразить движение левой или правой рукой, чтобы выполнить поворот влево или вправо. Сохраненные отрезки сигнала ЭЭГ при удачных попытках дополняют собой набор данных для обучения классификатора. Второй эксперимент с движением инвалидного кресла вперёд требовал от испытуемого воображать движения обеими руками одновременно, чтобы заставить инвалидное кресло двигаться вперёд. Для старта движения подается длинный звуковой сигнал, а для остановки – короткий. Испытания показали возможность управления движением вперед путем воображения движений левой и правой рукой одновременно со средней успешностью распознавания 66%. Третий эксперимент, с остановкой движущегося по прямой инвалидного кресла, требовал от испытуемого в обозначенный момент вообразить препятствие на своем пути. Испытания показали, что разработанный метод обеспечивает среднюю успешность распознавания 80%.

Проведенные испытания показали работоспособность разработанной системы управления инвалидным креслом с помощью ИМК на основе воображаемых движений рук. Показано, что помимо адаптации (обучения) системы управления инвалидным креслом также происходит и адаптация (тренировка) испытуемого, степень которой определяется длительностью тренировки. В диссертации отмечается, что в течение одной сессии способность испытуемого совершать воображаемые движения так, чтобы получить правильную реакцию системы управления, растёт.

По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**.

1. Семь положений на защиту – слишком много, нормой считается 3-4..
2. Из 6-ти публикаций с участием автора диссертации только последняя статья в журнале «Информатика и автоматизация» является полноформатной (23 стр.), остальные опубликованы в трудах конференций и имеют формат тезисов (4 стр.).

3. Предобработка не включает удаление эпох с мышечными артефактами, которые могут привести к ложным результатам.

4. Моменты начала воображений движения рук определяются по звуковым сигналам. Так можно делать при обучении классификатора, но при управлении инвалидным креслом пользователь может начать воображение тогда, когда захочет куда-то переместиться. Чтобы так сделать, нужно уметь автоматически определять начало воображения по ленте сигнала ЭЭГ, но как это делается в системе, непонятно.

5. В обзорной главе (в подразделах 1.3 и 1.4) приведена очень общая и известная информация об ИМК, в том числе инвазивных, но отсутствуют конкретные примеры российских и зарубежных разработок в области управления роботизированными мобильными средствами с использованием неинвазивных ИМК. Поэтому сравнивать сделанную систему не с чем.

6. В подразделе 2.2 приведено математическое описание этапов обработки информации в нейроинтерфейсе в рамках 1-го положения на защиту и, почему-то, приведена ссылка на работу [33] по интерфейсу на вызванных потенциалах Р300, в то время, как в диссертации используется моторное воображение.

7. Как это следует из текста диссертации, на вход классификатора ЭЭГ-паттернов воображаемых движений рук подается вектор признаков. Однако отсутствует объяснение, как получается этот вектор и какой он имеет формат.

8. Разработанный автором классификатор FANN и его классический предшественник KNN имеют одинаковые точности распознавания двух классов ЭЭГ-паттернов, 94%. Поэтому с точки зрения успешности распознавания модификация классификатора практически не дала выигрыша.

9. Неясно, в чем конкретно проявляется адаптация при обучении к свойствам головного мозга и двигательной системы человека (при воображении движений сам человек не двигается), а также адаптация при взаимодействии с компьютером через нейроинтерфейс.

10. Успешность распознавания, зарегистрированная в экспериментах с управлением по воображаемым движениям левой, правой и одновременно обеими руками колеблется от 60% до 80%, что может привести к трудностям при реальном управлении инвалидным креслом. Вопрос, как можно улучшить эти показатели, в диссертации не рассматривается.

11. В тексте диссертации имеют место не совсем корректные выражения и описки. Например, подраздел 2.1. назван «Структура системы управления нейроинтерфейса», а по существу здесь говорится о структуре системы управления на основе нейроинтерфейса. Другой пример – в списке литературы два раза дана ссылка на одну и ту же работу, [1] и [7].

Несмотря на сделанные замечания, диссертация **в целом** содержит ответы на все положения, выдвинутые на защиту, и достаточно полно характеризует личный вклад автора в их разработку.

Представляется, что разработанная программная платформа **может быть эффективно использована** при создании бесконтактных систем управления индивидуальными мобильными средствами, обеспечивающими автономное перемещение людей с ограниченными двигательными способностями.

В рамках **развития исследований автора**, вероятно, будет полезным увеличить число классов воображаемых движений, например, включить дополнительно воображение движений ног для управления движением вперед и остановки. Кроме этого, желательно повысить успешность выполнения команд, например, за счет усреднения результатов нескольких попыток управления. Было бы полезно не только реализовать прямое управление транспортным средством, которое очень напрягает пользователя, но и супервизорное управление, при котором пользователь путем воображения инициирует определенный сценарий перемещения, а само средство его исполняет, используя собственную интеллектуальную систему управления.

Вывод. Диссертационная работа Бабича Николая Александровича выполнена на актуальную тему, является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей решенные задачи, отличающиеся новизной и имеющее научное и практическое значение в области систем управления на основе нейроинтерфейсов, удовлетворяет требованиям п.7 Положения ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Официальный оппонент:

к.т.н., доцент Высшей школы автоматизации и робототехники Института механики, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Л.А. Станкевич

06.11.2025

