

## ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОТЕЗАМИ: ОБЗОР

А. М. Самандари<sup>1</sup>, А. Н. Афонин<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия  
<sup>1</sup> aliofphysics777ali@gmail.com, <sup>2</sup> afonin@bsu.edu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Облегчение адаптации, физической реабилитации и подготовки к протезированию людей, лишившихся части тела, имеет огромное значение для поиска новых возможностей и альтернатив современным протезам конечностей. Бионическое протезирование может значительно улучшить качество жизни людей с ограниченными возможностями, обеспечивая максимально возможное восстановление двигательных функций. Однако управлять такими протезами очень сложно. Наиболее часто используемые сегодня системы контроля: электроэнцефалография (ЭЭГ), электромиография (ЭМГ) и функциональная спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона (fNIRS) (при независимом использовании) – неспособны стать системами управления из-за присущих им недостатков. Рассматриваются будущие перспективы создания гибридной системы, которая может стать многообещающей системой для управления протезами конечностей. *Материалы и методы.* Было проведено несколько исследований с целью систематического обзора опубликованных статей, чтобы предоставить исследователям и экспертам значимую информацию о современных методах контроля, используемых в протезах рук. *Результаты.* 109 изученных статей тесно связаны с исследованием и подтверждают идею создания гибридной системы управления протезами. *Выводы.* Обзор состоит из трех осей. Первая ось предназначена для сбора, обобщения и оценки информации из соответствующих исследований, опубликованных за последнее десятилетие. Вторая ось представляет важные результаты предыдущих экспериментов, проведенных в рамках текущих исследований, и записи результатов экспериментов, как автономных, так и гибридных методов. Это исследование проводится систематически, чтобы предоставить всем экспертам и ученым полную картину и научные доказательства методов лечения протезами. Третья ось определяет широкую область знаний, которая требует дальнейшего изучения, рекомендаций и руководств для будущих исследований, поскольку гибридные системы для сценариев управления протезированием или реабилитации и восстановления утраченных функций все еще не используются на практике, и это служит стимулом для будущих исследований по поиску гибридной и интегрированной системы управления (аппаратное и программное обеспечение) для протезирования или реабилитации и восстановления утраченных функций.

**Ключевые слова:** инвалидность, гибридный интерфейс мозг-компьютер (ГИМК), система управления, электроэнцефалография (ЭЭГ), электромиография (ЭМГ), функциональная спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона (fNIRS), протезы

**Для цитирования:** Самандари А. М., Афонин А. Н. Перспективы создания гибридной системы управления протезами: обзор // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 2. С. 102–118. doi: 10.21685/2227-8486-2024-2-7

## PROSPECTS FOR CREATING A HYBRID CONTROL SYSTEM FOR PROSTHESES: A REVIEW

A.M. Samandari<sup>1</sup>, A.N. Afonin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia  
<sup>1</sup> aliofphysics777ali@gmail.com, <sup>2</sup> afonin@bsu.edu.ru

**Abstract.** *Background.* Facilitating the adaptation, physical rehabilitation and preparation for prosthetics of people who have lost a body part is of great importance for finding new opportunities and alternatives to modern limb prostheses. Bionic prosthetics can significantly improve the quality of life of people with disabilities, ensuring the maximum possible restoration of motor functions. However, controlling such prostheses is very challenging. The most commonly used control systems today: electroencephalography (EEG), electromyography (EMG) and near-infrared functional spectroscopy (fNIRS) (When used independently), are unable to become control systems due to their inherent shortcomings. Likewise, this review sheds light on the future prospects of creating a hybrid system, which may be a promising system for controlling prosthetic limbs. *Materials and methods.* Several studies have been conducted to systematically review published articles to provide researchers and experts with meaningful information about current state-of-the-art control methods used in prosthetic arms. *Results.* The 109 articles studied are closely related to the research and confirm the idea of creating a hybrid prosthetic control system. *Conclusions.* The review consists of three axes. The first axis is designed to collect, summarize and evaluate information from relevant studies published over the past decade. The second axis represents important results of previous experiments conducted within the framework of current research, and records of experimental results, both autonomous and hybrid methods. This research is conducted systematically to provide all experts and scientists with a complete picture and scientific evidence of prosthetic treatment methods. The third axis defines a wide area of knowledge that requires further study, recommendations and guidelines for future research, since hybrid systems for prosthetics management scenarios or rehabilitation and restoration of lost functions are still not used in practice, and this serves as an incentive for future research to find a hybrid and integrated management system (hardware and software) for prosthetics or rehabilitation and restoration of lost functions.

**Keywords:** disability, hybrid brain–computer Interface (hBCI), control system, electroencephalography (EEG), electromyography (EMG), functional near infrared spectroscopy (fNIRS), prostheses

**For citation:** Samandari A.M., Afonin A.N. Prospects for creating a hybrid control system for prostheses: a review. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(2):102–118. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-2-7

### Введение

Многочисленные войны, несчастные случаи и болезни вызывают множество случаев инвалидности. Одним из наиболее распространенных и наиболее заметных видов инвалидности является ампутация нижних и верхних конечностей [1]. Инвалидами из-за ампутации рук во всем мире становятся миллионы людей. Различают пять уровней ампутации рук [2]:

- 1) удаление запястья;
- 2) ампутация на уровне предплечья;
- 3) ампутация на уровне плеча;

- 4) удаление плечевого сустава;
- 5) ампутация передней четверти.

Инвалидность при утрате части тела – это сложный психологический удар для человека, который вызывает у него чувство тревоги, стресса, депрессии, оказывает сильное влияние на его личность и может даже привести к суицидальным мыслям. Таким образом, инвалидность является проблемой, требующей действий по улучшению жизни людей с ограниченными возможностями. Решение ее состоит в том, чтобы заменить ампутированные конечности искусственными устройствами, которые называются протезами. В прошлом протезы конечностей использовались в лишь в косметических целях, чтобы вернуть телу его полную форму.

В настоящее время протезы по функционалу все больше соответствуют замещенной конечности и улучшают жизнь инвалидов, поскольку современные бионические протезы содержат приводы, которые позволяют перемещать их в пространстве, а для управления приводами этих протезов используются биоинтерфейсы. В тех случаях, когда конечность ампутирована не полностью и сохранились остаточные мышцы культи, в качестве биоинтерфейса обычно используется электромиография (ЭМГ), основанная на электрической активности мышц [3, 4]. В случае, если остаточные мышцы отсутствуют или атрофировались, для управления бионическими протезами могут быть использованы только нейроинтерфейсы. Интерфейсы мозг-компьютер (ИМК) или просто нейроинтерфейсы – это быстро развивающаяся технология, которая измеряет мозговую активность и преобразует ее в команды для компьютера или другого внешнего устройства и позволяет оператору управлять этими устройствами, используя только свои мысли. Нейроинтерфейсы основаны на обнаружении в режиме реального времени характерных сигналов (паттернов) мозговой активности с использованием методов нейровизуализации, таких как электроэнцефалография (ЭЭГ), электрокортикография (ЭКоГ) [5–7], магнитоэнцефалография (МЭГ), функциональная спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона (fNIRS) [8–10] и др., и преобразовании полученной информации в команды управления протезами [11, 12].

Однако каждый из ИМК в отдельности обладает рядом недостатков, которые ограничивают их применение для управления протезами. В связи с этим актуальной является задача создания гибридной системы управления протезами на основе нескольких нейроинтерфейсов, которая рассматривается в данном обзоре.

### **Методы**

Целью проведенного обзора является разработка рекомендаций по созданию гибридной системы управления протезами. Для достижения данной цели был проведен систематический обзор опубликованных статей, позволяющий предоставить исследователям и экспертам исчерпывающую информацию о методах создания этой системы (рис. 1). Были рассмотрены материалы из ведущих наукометрических баз данных, а именно Scopus, Google Scholar, различных сайтов, таких как <https://scholar.google.com>, <https://www.mdpi.com/journal/sensors>, <https://www.refseek.com>, <https://www.base-search.net> и др. Обзор основан на анализе сотен источников, из которых 95 % за период с 2020 по 2023 г.

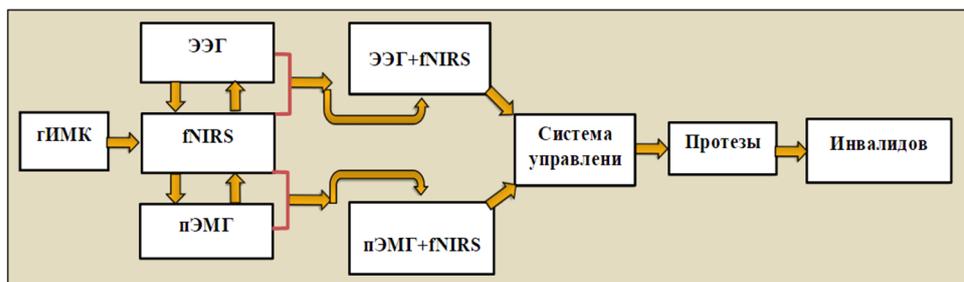


Рис. 1. Последовательность применения методологии исследования

### *Классификация нейроинтерфейсов*

Для разработки и эффективного применения ИМК необходимо изучение функций мозга, тесно связанное с биофизикой. Классификация состояний мозга может быть выполнена в режиме реального времени в соответствии с зарегистрированной активностью мозга, вызванной либо спонтанными физиологическими процессами, либо внешней стимуляцией с использованием интеллектуальной системы ИМК. Несмотря на то, что нейротехнологии получили значительное развитие только в последние годы, существующие нейроинтерфейсы отличаются разнообразием [13]. Важнейшими признаками классификации нейроинтерфейсов являются следующие:

– **по принципу действия.** По принципу действия нейроинтерфейсы можно разделить на работающие на основе анализа электрической и химической активности нервной системы [12, 14];

– **по направлению.** В зависимости от направленности сигналов ИМК разделяют на однонаправленные (принимающие сигналы от мозга или отправляющие их в него) и двунаправленные (позволяющие обмениваться информацией в обоих направлениях);

– **по типу управляющих команд.** В зависимости от типа управляющей команды, подаваемой оператором ИМК, нейронные интерфейсы можно классифицировать следующим образом: активные (регистрируют сознательную активность мозга в форме мысленных команд), реактивные (регистрируют реакцию мозга на внешние раздражители) и пассивные (регистрируют текущее состояние мозга);

– **по способу обработки входных данных.** В зависимости от способа обработки входных данных ИМК можно разделить на синхронные и асинхронные;

– **по расположению в организме.** В зависимости от расположения в организме ИМК разделяют на неинвазивные и инвазивные.

В настоящее время для управления бионическими протезами наибольшее применение нашли следующие технологии:

ЭМГ – метод, позволяющий регистрировать биоэлектрические сигналы, возникающие в результате сокращения мышц. Поверхностная электромиография (пЭМГ) измеряет электрический сигнал на поверхности кожи, генерируемый мышцами. Измерение может проводиться либо инвазивно, либо поверхностно (неинвазивно), на уровне отдельного мышечного волокна, отдельной двигательной единицы или всей мышцы. Обработка информации ЭМГ-сигналов позволяет диагностировать мышечные и нервно-мышечные

нарушения, а также использовать их для управления протезами или экзоскелетами [7]. ЭМГ относится к активным нейроинтерфейсам.

ЭЭГ – это неинвазивная технология, основанная на электрической активности нервной системы, которая все еще слишком низка для обмена информацией между мозгом и устройством. ЭЭГ доказала свою эффективность во многих областях, в частности в клинических применениях [5], но в области управления протезами она все еще слабо применяется из-за ряда недостатков [1]. ЭЭГ затруднительно использовать в качестве активного нейроинтерфейса. Чаще всего она используется как реактивный нейроинтерфейс [6].

fNIRS – это неинвазивный метод оптической визуализации, который обычно использует две различных длины волн инфракрасного излучения для измерения концентрации насыщенного кислородом гемоглобина (оxоHb) и дезоксигенированного гемоглобина (deоxоHb) (между 650 и 1000 нм) в коре головного мозга. Некоторые эксперименты с использованием fNIRS для управления протезами оказались относительно успешными [2, 10].

Преимущества и недостатки этих технологий перечислены в табл. 1.

Таблица 1

Преимущества и недостатки технологий ЭЭГ, ЭМГ и fNIRS соответственно

Преимущества	Недостатки
<b>Электроэнцефалография</b>	
1. Низкая стоимость. 2. Портативный, неинвазивный и простой в использовании. 3. Может обеспечить высокое временное разрешение анализа мозговой активности	– Низкое пространственное разрешение из-за высокой скорости распространения электромагнитных волн. – Восприимчивы к артефактам, связанным с движениями глаз, мышечными сокращениями и т.д., которые во многих случаях могут затруднить или сделать невозможной интерпретацию данных
<b>Электромиография</b>	
1. Высокое временное разрешение, а также отличные возможности локализации источника. 2. Низкая стоимость	– Необходимость хорошей сохранности остаточных мышц культи
<b>Функциональная спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона</b>	
1. Портативность и низкая стоимость. 2. Высокое пространственное разрешение	– Более низкое временное разрешение, чем у систем ЭЭГ или ЭМГ, из-за их зависимости от гемодинамических реакций, а не от электрических сигналов непосредственно от нейронов. – Не подходит для измерения активности глубоких структур головного мозга

В табл. 2 приведены результаты предыдущих исследований, в которых использовались упомянутые технологии как независимые автономные системы с применением различных методов распознавания полученных сигналов.

Результаты точности классификации для ИМК  
(самостоятельное использование)

Источник и год публикации	Независимая система	Метод распознавания сигнала	Точность
[15], 2021	ЭЭГ	Сквозная неглубокая архитектура	83,20 %
[16], 2022	ЭЭГ	Многократная встроенная передача обучение	83,14 %
[17], 2021	fNIRS	NN_LSTM, NN_ConvLST, NN_ResNet	91 %
[18], 2020	fNIRS	Среднее значение сигнала, Асимметрия, Экссесс, Стандартное отклонение	90,54 %
[7], 2023	ЭМГ	CNN-LSTM	70 %:30 %

### *Гибридные системы*

#### *Гибридная система fNIRS и ЭЭГ*

Основная суть любой гибридной системы, будь то растительная, животная, техническая или программная, заключается в том, что каждая из входящих в нее систем должна компенсировать недостатки другой. При этом возможности гибридной системы должны превосходить возможности каждой из входящих в нее систем в отдельности. С другой стороны, интегрируемые системы должны иметь частично схожие характеристики для обеспечения их совместимости.

Возможность создания гибридной системы fNIRS и ЭЭГ согласуется с вышеизложенным, поскольку результаты, полученные с помощью интеграции этих методов, лучше, чем результаты, полученные при их независимом использовании (табл. 2, 3). Кроме того, некоторые характеристики этих двух методов схожи. В составе ЭЭГ датчики-электроды размещаются на коже верхней части черепа (международная система «10 – 20») и улавливают электрические сигналы от нейронов головного мозга, что позволяет отслеживать сложную нейрональную активность и ее изменения. ЭЭГ может образовывать гибридную систему с fNIRS [19–21], а также с ЭМГ [22, 23]. ЭЭГ, как и fNIRS, относится к неинвазивным методам. Сигналы ЭЭГ обеспечивают высокое временное разрешение в отличие от fNIRS, который имеет временную задержку в 3–5 с при обнаружении областей мозговой активности. Установлено, что лучшей производительности ИМК можно достичь с помощью мультимодального анализа, оценивающего как электрическую активность мозга, так и активность системы кровообращения [24, 25].

В настоящее время комбинация ЭЭГ-fNIRS широко изучается из-за дополняющих друг друга свойств этих ИМК, а именно точности классификации и скорости передачи информации [26]. И ЭЭГ, и fNIRS приносят некоторую дополнительную информацию об активности мозга. Комбинация этих технологий имеет определенные уникальные характеристики, поскольку основанием их сочетания является зависимость от физиологического феномена, называемого нейроваскулярной связью в мозге. Система из этих двух технологий

является перспективной для управления протезами [27, 28]. Было подтверждено, что эффективность отдельных ИМК обеспечивает более низкую точность классификации, чем гИМК [29–32]. Одной из основных причин, по которой гИМК не получили широкого распространения, является огромная аппаратная часть и сложность сигналов. Чтобы расшифровывать эти сложные сигналы, необходимо внедрять легкие и компактные гИМК [33], но с осторожностью, чтобы уменьшить снижение производительности. Исследования показали, что использование гИМК только с двумя каналами ЭЭГ [34] и двумя парами источников-детекторов fNIRS позволяет достичь высокой точности классификации, при этом система будет отличаться простотой использования [35, 36].

#### *Гибридная система fNIRS и nЭМГ*

ЭМГ применяется для диагностики мышечных и нервно-мышечных нарушений, а также для реабилитации инвалидов или управления роботами [37, 38]. Диапазоны частот сигналов ЭМГ варьируются от 0,01 Гц до 10 кГц в зависимости от типа исследования (ЭМГ или электрокардиограмма). Наиболее полезные и важные диапазоны частот находятся в диапазоне 50–15 Гц [39], в то время как частота fNIRS составляет примерно 1 Гц при длине волны 830 нм [40, 41].

Есть ряд исследований, посвященных совместному применению ЭМГ и fNIRS. В работе [42] предложено выполнять одновременные измерения ЭМГ, механомиографии (MMG) и спектроскопии в ближнем инфракрасном диапазоне (NIRS) с использованием беспроводного многослойного датчика, который может быть использован для прогнозирования мышечной усталости. При регистрации потребления кислорода и мышечной активности икроножной мышцы левой ноги в работах [43, 44] описаны положительные корреляции между сигналами ЭМГ и fNIRS при сравнении между участниками с наиболее активным и наименее активным образом жизни. В соответствующем контексте формы сигналов ЭМГ и fNIRS во время тренировки предполагают их взаимную связь во время динамических движений. Тесные и значимые положительные корреляции между изменениями оксигенации головного мозга fNIRS и ЭМГ сигналами во время движений свидетельствуют о возможности создания гибридной системы.

В системах управления на основе ЭМГ добавление большего количества ЭМГ-датчиков может улучшить эффективность управления, но этот метод бесполезен для людей с ампутированными конечностями из-за отсутствия достаточного количества остаточных мышц [45]. Более того, добавление датчиков также увеличило бы сложность, вес и стоимость протезов. Чтобы быть клинически значимым, идеальный интерфейс управления верхней конечностью должен основываться на минимальном количестве сенсорных каналов и ограниченной вычислительной сложности [46].

В табл. 3 приведены результаты упомянутых выше исследований, в которых данные технологии использовались как гибридные системы, и при сравнении этих двух результатов (табл. 2, 3) мы видим явное превосходство над гибридными системами.

Результаты точности классификации сигналов для гибридных ИМК

Источник и год публикации	Гибридная система	Метод	Точность или среднее значение точности
[47], 2022	ЭЭГ+fNIRS	Векторно-фазовый анализ	82 %, 89, 87, 86
[48], 2022	ЭЭГ+fNIRS	fNIRS-сеть управляемого внимания (FGANet)	78,59 % ± 8,86
[27], 2023	ЭЭГ+fNIRS	FBCSP+PCA+SVM, GLM+MBLL	92,25 % ± 4,99
[49], 2017	пЭМГ+fNIRS	SVM, LDA	86,4 %
[50], 2021	пЭМГ+fNIRS	LDA	96,4 % и 94,1 %
[51], 2020	пЭМГ+fNIRS	LDA	78–81 %

**Аппаратные средства, программное обеспечение и алгоритмы, используемые для обработки сигналов**

Когда мозг активируется любым из триггеров, начинается этап получения сигнала ИМК. Принимаемый сигнал сопровождается шумом, артефактами и другими воздействиями, таким образом, принятый сигнал проходит несколько этапов, прежде чем быть преобразованным в управляющую команду. Фазы сигнала, полученного с использованием триггеров активации коры головного мозга в рамках концепций гибридных систем, проходят через те же фазы сигнала, полученного с использованием концепций независимых систем, как показано на рис. 2.

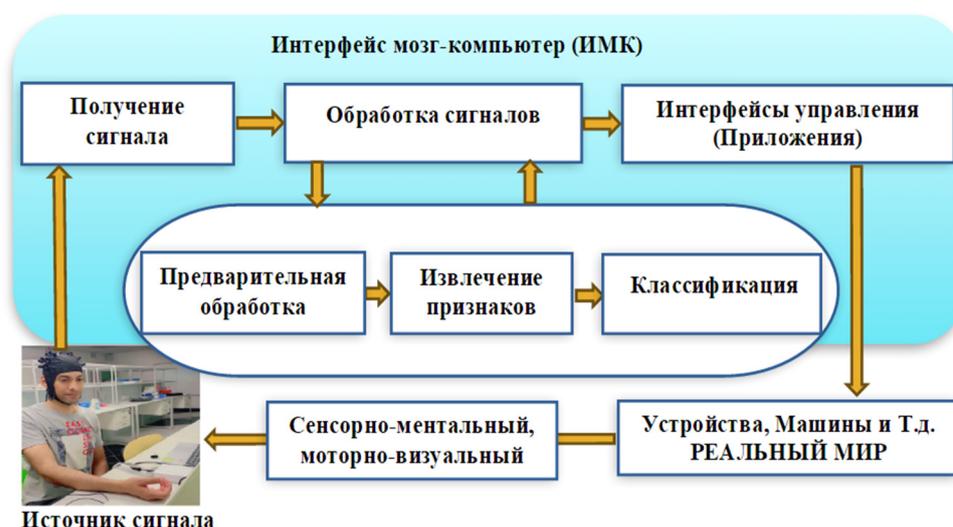


Рис. 2. Этапы прохождения сигнала

Современный программно-аппаратный комплекс ИМК – это система, основанная на искусственном интеллекте, которая может анализировать мозговую активность в режиме реального времени и распознавать определенный конечный набор паттернов активности центральной нервной системы [11].

Одним из современных и многообещающих подходов к анализу нейрофизиологических сигналов является машинное обучение. Подходы к машинному обучению традиционно делятся на четыре широкие категории в зависимости от характера входных данных и стратегии обучения (рис. 3).



Рис. 3. Основы машинного обучения в его четырех стратегиях

Эти методы предполагают анализ данных без предварительного знания источника данных, т.е. данных, не связанных с моделью. Другими словами, лежащая в основе математическая модель (или динамическая система), которая генерирует временные ряды, неизвестна. В то же время машинное обучение может построить эту модель на основе выборочных данных, известных как «обучающие данные». Таким образом, эти методы, обучаемые на разумном и репрезентативном объеме обучающих данных, позволяют выполнять различные задачи (классификация, обнаружение, прогнозирование) на основе вновь полученных данных [12].

Процесс извлечения признаков не лишен сложностей, поскольку он в значительной степени зависит от предшествующих сложных знаний во времени, и это приводит к риску потери информации [52, 53]. Существуют различные и часто используемые методы выделения признаков, например, сигналы активности мозга могут быть отфильтрованы в трех диапазонах для ЭЭГ или в одном диапазоне для fNIRS, чтобы улучшить качество сигнала для последующего анализа [13, 27].

При этом интеграция ИМК не ограничивается только технологиями получения сигналов, но также может распространяться на этап их обработки. В работе [24] комбинация, состоящая из декомпозиции диапазона волн с каноническим корреляционным анализом для коррекции артефакта движения одноканальных сигналов ЭЭГ и fNIRS, показывает лучшие результаты, чем использование декомпозиции диапазона волн независимо для каждой технологии.

В работе [55], демонстрирующей предпочтение производительности одномоментных и смешанных методов, использующих традиционный алгоритм оптимизации и бинарный улучшенный алгоритм оптимизации, показали высокую точность классификации (90, 37, 7,66 % и 94,22, 5,39 % соответственно), производительность классификации увеличилась на 3,85 % по сравнению с обычным алгоритмом оптимизации.

### ***Обсуждение и результаты***

После подробного разбора преимуществ и недостатков вышеописанных методов путем сравнения результатов технологий установлено, что гибридная система управления бионическими протезами дает более точные результаты, чем каждая система по отдельности.

Наиболее вероятным преимуществом гибридной системы является то, что каждая из двух технологий компенсирует недостатки другой и что подтверждается рядом исследований [56]. Отсюда следует вывод, что результаты, полученные с помощью гибридных систем управления, имеют большие перспективы и очень обнадеживают в отношении создания бионических протезов.

### ***Заключение***

Точное управление бионическими протезами – одна из самых больших проблем, существующих в настоящее время в сфере реабилитации инвалидов. Проанализировать мозговую активность и преобразовать ее в команды для управления машинами и устройствами, используя только мысленные команды, чрезвычайно сложно. Однако современные технологии ИМК добились определенных успехов. Каждая из этих технологий имеет свои особенности и недостатки, которые привели к недостаточной эффективности систем управления бионическими протезами. Гибридная система, интегрирующая несколько этих технологий, может стать решением для достижения более высокой эффективности управления.

Отмечается, что будущие разработки по созданию гибридной системы управления протезами не ограничиваются рассмотренными технологиями, а могут распространяться и на другие. Однако методы ЭЭГ, ЭМГ и fNIRS доказали относительно большой успех в управлении протезами. При этом технология fNIRS считается наиболее удобной в сочетании с ЭЭГ и ЭМГ, что подтверждается многочисленными экспериментальными научными исследованиями. В будущем это послужит стимулом для изучения этих ИМК как независимо друг от друга, так и в гибридной форме, поскольку они наиболее близки и удобны для компенсации недостатков друг друга, что приведет к созданию гибридной системы управления для клинических сценариев, в частности для бионического протезирования или реабилитации и восстановления утраченных функций.

### ***Список литературы***

1. Sattar N. Y., Kausar Z., Usama S. A. [et al.]. fNIRS-Based Upper Limb Motion Intention Recognition Using an Artificial Neural Network for Transhumeral Amputees // *Sensors*. 2022. Vol. 22. P. 726. doi: 10.3390/s22030726
2. Асадуллаев Р. Г., Афонин А. Н., Щетинина Е. С. Распознавание паттернов двигательной активности нейронной сетью по непрерывным данным оптической томографии fNIRS // *Экономика. Информатика*. 2021. Т. 48, № 4. С. 735–746.
3. Afonin A. N., Asadullaev R. G., Sitnikova M. A. [et al.]. Brain-computer interfaces in robotics, COMPUSOFT // *An International Journal of Advanced Computer Technology*. 2019. Vol. 8 (8). P. 3356–3361.
4. Peksa J., Mamchur D. State-of-the-Art on Brain-Computer Interface Technology // *Sensors*. 2023. Vol. 23. P. 6001. doi: 10.3390/s23136001

5. Osama M., Allauddin U. Design and modelling of lower prosthetic limb for additive manufacturing // Proceedings of IMEC-2022, 14<sup>th</sup>–15<sup>th</sup> January 2022, Karachi, Pakistan.
6. Satam I. A. A comprehensive study of EEG-based control of artificial arms // Vojnotehnicki Glasnik. Military Technical Courier. 2023. Vol. 71, iss. 1.
7. Song T., Yan Z., Guo S. [et al.]. Review of sEMG for Robot Control: Techniques and Applications // Journals Applied Sciences. 2023. Vol. 13, iss. 17. doi: 10.3390/app13179546
8. Khorasani A., Hulsizer J. Myoelectric interface for neurorehabilitation conditioning to reduce abnormal leg co activation after stroke: a pilot study. 2023. doi: 10.21203/rs.3.rs-3398815/v1
9. Asanza V., Pelaez E., Loayza F. [et al.]. Identification of Lower-Limb Motor Tasks via Brain-Computer Interfaces: A Topical Overview // Sensors. 2022. Vol. 22 (5). doi: 10.3390/s22052028
10. Abdalmalak A., Milei D., Cohen D. [et al.]. Using fMRI to investigate the potential cause of inverse oxygenation reported in fNIRS studies of motor imagery // Neuroscience Letters. 2020. Vol. 714. doi: 10.1016/j.neulet.2019.134607
11. Wang H., Yan F., Xu T. [et al.]. Brain-Controlled Wheelchair Review: From Wet Electrode to Dry Electrode, from Single Modal to Hybrid Modal, from Synchronous to Asynchronous. 2021. Vol. 9. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3071599
12. Xu B., Li W., Liu D. [et al.]. Continuous Hybrid BCI Control for Robotic Arm Using Noninvasive Electroencephalogram, Computer Vision, and Eye Tracking // Mathematics. 2022. Vol. 10 (4). doi: 10.3390/math10040618
13. Sun Z., Huang Z., Duan F., Liu Y. A Novel Multimodal Approach for Hybrid Brain-Computer Interface // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 89909–89918. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994226
14. Pichiorri F., Toppi J., Seta V. [et al.]. Exploring high-density corticomuscular networks after stroke to enable a hybrid Brain-Computer Interface for hand motor rehabilitation Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2023. doi: 10.1186/s12984-023-01127-6
15. Si J., Yang Y., Xu L. [et al.]. Evaluation of residual cognition in patients with disorders of consciousness based on functional near-infrared spectroscopy // Neurophotonics. 2023. Vol. 10, № 2. doi: 10.1117/1.nph.10.2.025003
16. Hamid H., Naseer N., Nazeer H. [et al.]. Analyzing Classification Performance of fNIRS-BCI for Gait Rehabilitation Using Deep Neural Networks // Sensors. 1932. № 22 (5). doi: 10.3390/s22051932
17. Mustafa A. H. H., Muhammad U. K., Deepti M. A Computationally Efficient Method for Hybrid EEG-fNIRS BCI Based on the Pearson Correlation // BioMed Research International. 2020. P. 1838140. doi: 10.1155/2020/1838140.
18. Sial M. B., Wang S., Wang X. [et al.]. A Survey on EEG-fNIRS based Non-invasive hBCIs // International Conference on Artificial Intelligence (ICAI). Islamabad, Pakistan, 2021. P. 240–245. doi: 10.1109/ICAI52203.2021.9445246
19. Wang Z., Yang L., Zhou Y. [et al.]. Incorporating EEG and fNIRS Patterns to Evaluate Cortical Excitability and MI-BCI Performance During Motor Training // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2023. Vol. 31. P. 2872–2882. doi: 10.1109/TNSRE.2023.3281855
20. Radha H. M., Karim A., Al-Timemy A. H. [et al.]. Recognition of Upper Limb Movements Based on Hybrid EEG and EMG Signals for Human-Robot Interaction // Iraqi Journal of Computers, Communications, Control & Systems Engineering (IJCCCE). 2023. Vol. 23, № 2. doi: 10.33103/uo.ijccce.23.2.14
21. Fu L., Li H., Ji H., Li J. EEG-EMG Analysis Method in Hybrid Brain Computer Interface for Hand Rehabilitation Training // Computing and Informatics. 2023. Vol. 42. P. 741–761. doi: 10.31577/cai 2023 3 741

22. Kwon J., Shin J., Im C. H. Toward a compact hybrid brain-computer interface (BCI): Performance evaluation of multi-class hybrid EEG-fNIRS BCIs with limited number of channels // *PLoS One*. 2020. Vol. 15, № 3. doi: 10.1371/journal.pone.0230491
23. Beniczky S., Donald L. S. Electroencephalography: basic biophysical and technological aspects important for clinical applications // *Epileptic Disord*. 2020. Vol. 22, № 6. doi: 10.1684/epd.2020.1217
24. Marius V. D., Hadar A., Goga N. [et al.]. Design and Implementation of an EEG-based BCI Prosthetic Lower Limb Using Raspberry Pi 4 // *UPB Scientific Bulletin. Series C*. 2023. Vol. 85, iss. 3. URL: [https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/rez353\\_504936.pdf](https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez353_504936.pdf) (дата обращения: 10.06.2024).
25. Li H., Guo S., Bu D., Wang H. [et al.]. Subject-Independent Estimation of Continuous Movements Using CNN-LSTM for a Home-Based Upper Limb Rehabilitation System // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2023. Vol. 8, № 10.
26. Jin H., Li C., Sun L. [et al.]. To classify two-dimensional motion state of step length and walking speed by applying cerebral hemoglobin information // 10th International Conference on Human System Interactions (HSI). Ulsan, Korea (South), 2017. P. 216–222. doi: 10.1109/HSI.2017.8005032
27. Yang L., Song Y., Ma K. [et al.]. A novel motor imagery EEG decoding method based on feature separation // *Journal of Neural Engineering*. 2021. Vol. 18. P. 036022. doi: 10.1088/1741-2552/abe39b
28. Афонин А. Н., Асадуллаев Р. Г., Ситникова М. А., Анализ данных fNIRS-томографа для управления протезами конечностей с помощью интерфейса мозг-компьютер // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2018. № 11. С. 182–185.
29. Hermosilla D., Codorniu R., Baracaldo R. [et al.]. Shallow Convolutional Network Excel for Classifying Motor Imagery EEG in BCI Applications // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 98275–98286. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091399
30. Aydin E. A. Subject-specific feature selection for near infrared spectroscopy based brain-computer interfaces // *Computer Methods and Programs Biomedicine*. 2020. Vol. 195. P. 105535.
31. Asadullaev R. G., Afonin A. N., Shchetinina E. S. Recognition of patterns of motor activity by a neural network based on continuous optical tomography fNIRS data // *Economics. Information technologies*. 2021. Vol. 48 (4). P. 735–746. doi: 10.52575/2687-0932-2021-48-4-735-746
32. Bin Abdul Ghaffar M. S., Khan U. S., Naseer N. [et al.]. Improved Classification Accuracy of Four Class fNIRS-BCI // 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). Bucharest, Romania, 2020. P. 1–5. doi: 10.1109/ECAI50035.2020.9223258
33. Guo W. C., Zhang X., Liu H., Zhu X. Toward an enhanced human machine interface for upper-limb prosthesis control with combined EMG and NIRS signals // *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2017. Vol. 47, № 4. P. 564575. doi: 10.1109/THMS.2016.2641389
34. Lin J. F. L. Dual-MEG interbrain synchronization during turn-taking verbal interactions between mothers and children // *Cerebral Cortex*. 2023. Vol. 33 (7). P. 4116–4134. doi: 10.1093/cercor/bhac330
35. Maher A., Qaisar S. M., Salankar N. [et al.]. Hybrid EEG-fNIRS brain-computer interface based on the non-linear features extraction and stacking ensemble learning // *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 2023. Vol. 43 (2). P. 463–475. doi: 10.1016/j.bbe.2023.05.001
36. Liu Z., Shore J., Wang M. [et al.]. A systematic review on hybrid EEG/fNIRS in brain-computer interface // *Biomed Signal Process Control*. 2021. Vol. 68. P. 102595.
37. Xu T., Zhou Z., Yanf Y. [et al.]. Motor Imagery Decoding Enhancement Based on Hybrid EEG-fNIRS Signals // *IEEE Access*. 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3289709

38. Li R., Yang D., Fang F. [et al.]. Concurrent fNIRS and EEG for Brain Function Investigation: A Systematic, Methodology-Focused Review // *Sensors*. 2022. Vol. 22, № 15. doi: 10.3390/s22155865
39. Chunfu L., Ruite G., Zhichuan T. [et al.]. Multi-channel FES gait rehabilitation assistance system based on adaptive sEMG modulation // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2023. Vol. 31. P. 3652–3663. doi: 10.1109/tnsre.2023.3313617
40. Cheng X., Sie E. J., Boas D. A., Marsili F. Choosing an optimal wavelength to detect brain activity in functional near-infrared spectroscopy // *Optics Letters*. 2021. Vol. 46, № 4. P. 924.
41. Song T., Yan Z., Guo S., [et al.]. Review of sEMG for Robot Control: Techniques and Applications // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 17. doi: 10.3390/app13179546
42. Radek M., Martina L., Michaela S. [et al.]. Advanced bioelectrical signal processing methods: Past, present, and future approach. Part III: Other biosignals // *Sensors*. 2021. Vol. 21 (18). doi: 10.3390/s21186064
43. Kimoto H. F., Machida M. A wireless multi-layered EMG/MMG/NIRS sensor for muscular activity evaluation // *Sensors*. 2023. Vol. 23 (3). doi: 10.3390/s23031539
44. Giminiiani R. D., Marco C., Marco F., Valentina Q. Validation of fabric-based thigh-wearable EMG sensors and oximetry for monitoring quadriceps activity during strength and endurance exercises // *Sensors*. 2020. Vol. 17. P. 1–13. doi: 10.3390/s20174664
45. Daniel N., Sybilski K., Kaczmarek W. [et al.]. Relationship between EMG and fNIRS during Dynamic Movements // *Sensors*. 2023. Vol. 23 (11). doi: 10.3390/s23115004
46. Atzori M., Gijsberts A., Castellini C. [et al.]. Electromyography data for non-invasive naturallycontrolled robotic hand prostheses // *Scientific Data*. 2014. Vol. 1, № 1. P. 1–13.
47. Arif A., Javed K., Sajid H. [et al.]. Hemodynamic response detection using integrated EEG–fNIRS–VPA for BCI // *Computers, Materials and Continua*. 2021. Vol. 70, № 1. P. 535–555. doi: 10.32604/cmc.2022.018318
48. Kwak Y., Song W. J., Kim S. E. FGANet: FNIRS-Guided Attention Network for Hybrid EEG–fNIRS Brain-Computer Interfaces // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2022. Vol. 30. P. 329–339. doi: 10.1109/TNSRE.2022.3149899
49. Dario F., Ning J., Hubertus R. [et al.]. The extraction of neural information from the surface EMG for the control of upper-limb prostheses: Emerging avenues and challenges // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2014. Vol. 22, № 4. P. 797–809.
50. Sattar N. Y., Kausar Z., Usama S. A. [et al.]. Enhancing Classification Accuracy of Transhumeral Prosthesis: A Hybrid sEMG and fNIRS Approach // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 113246–113257. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3099973
51. Nsugbe E., Phillips C., Fraser M. F., McIntosh J. Gesture recognition for transhumeral prosthesis control using EMG and NIR // *IET Cyber-Systems Robotics*. 2020. Vol. 2, № 3. P. 122131. doi: 10.1049/iet-csr.2020.0008
52. Xiang Z., Lina Y., Xianzhi W. [et al.]. A Survey on Deep Learning-based Non-Invasive Brain Signals: recent advances and new frontiers // *Journal of Neural Engineering*. 2020. № 18. P. 031002. doi: 10.1088/1741-2552/abc902
53. Moufassih M., Tarahi O., Hamou S. [et al.]. Boosting motor imagery brain-computer interface classification using multiband and hybrid feature extraction // *Multimedia Tools and Applications*. 2023. № 83 (16). P. 1–32. doi: 10.1007/s11042-023-17118-7
54. Shelishiyah R., Dharan M. B., Kumar T. K. [et al.]. Signal Processing for Hybrid BCI Signals // *Journal of Physics*. 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2318/1/012007
55. Ali M. U., Kim K. S., Kallu K. D. [et al.]. OptEF-BCI: An Optimization-Based Hybrid EEG and fNIRS–Brain Computer Interface // *Bioengineering*. 2023. Vol. 10 (5). doi: 10.3390/bioengineering10050608

56. Samandari A. M. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) as a hybrid system: a review // Modeling, Optimization and Information Technology. 2024. Vol. 12 (1). doi: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.005. URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1459> (дата обращения: 10.06.2024).

### References

1. Sattar N.Y., Kausar Z., Usama S.A. et al. fNIRS-Based Upper Limb Motion Intention Recognition Using an Artificial Neural Network for Transhumeral Amputees. *Sensors*. 2022;22:726. doi: 10.3390/s22030726
2. Asadullaev R.G., Afonin A.N., Shchetinina E.S. Recognition of patterns of motor activity by a neural network based on continuous optical tomography fNIRS data. *Ekonomika. Informatika = Economy. Computer science*. 2021;48(4):735–746. (In Russ.)
3. Afonin A.N., Asadullaev R.G., Sitnikova M.A. et al. Brain-computer interfaces in robotics, COMPUSOFT. *An International Journal of Advanced Computer Technology*. 2019;8(8):3356–3361.
4. Peksa J., Mamchur D. State-of-the-Art on Brain-Computer Interface Technology. *Sensors*. 2023;23:6001. doi: 10.3390/s23136001
5. Osama M., Allauddin U. Design and modelling of lower prosthetic limb for additive manufacturing. *Proceedings of IMEC-2022, 14th–15th January 2022*. Karachi, Pakistan, 2022.
6. Satam I.A. A comprehensive study of EEG-based control of artificial arms. *Vojnotekhnicki Glasnik. Military Technical Courier*. 2023;71(1).
7. Song T., Yan Z., Guo S. et al. Review of sEMG for Robot Control: Techniques and Applications. *Journals Applied Sciences*. 2023;13(17). doi: 10.3390/app13179546
8. Khorasani A., Hulsizer J. *Myoelectric interface for neurorehabilitation conditioning to reduce abnormal leg co activation after stroke: a pilot study*. 2023. doi: 10.21203/rs.3.rs-3398815/v1
9. Asanza V., Pelaez E., Loayza F. et al. Identification of Lower-Limb Motor Tasks via Brain-Computer Interfaces: A Topical Overview. *Sensors*. 2022;22(5). doi: 10.3390/s22052028
10. Abdalmalak A., Milei D., Cohen D. et al. Using fMRI to investigate the potential cause of inverse oxygenation reported in fNIRS studies of motor imagery. *Neuroscience Letters*. 2020;714. doi: 10.1016/j.neulet.2019.134607
11. Wang H., Yan F., Xu T. et al. *Brain-Controlled Wheelchair Review: From Wet Electrode to Dry Electrode, from Single Modal to Hybrid Modal, from Synchronous to Asynchronous*. 2021;9. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3071599
12. Xu B., Li W., Liu D. et al. Continuous Hybrid BCI Control for Robotic Arm Using Noninvasive Electroencephalogram, Computer Vision, and Eye Tracking. *Mathematics*. 2022;10(4). doi: 10.3390/math10040618
13. Sun Z., Huang Z., Duan F., Liu Y. A Novel Multimodal Approach for Hybrid Brain-Computer Interface. *IEEE Access*. 2020;8:89909–89918. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994226
14. Pichiorri F., Toppi J., Seta V. et al. Exploring high density corticomuscular networks after stroke to enable a hybrid Brain Computer Interface for hand motor rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2023. doi: 10.1186/s12984-023-01127-6
15. Si J., Yang Y., Xu L. et al. Evaluation of residual cognition in patients with disorders of consciousness based on functional near-infrared spectroscopy. *NeuroPhotonics*. 2023;10(2). doi: 10.1117/1.nph.10.2.025003
16. Hamid H., Naseer N., Nazeer H. et al. Analyzing Classification Performance of fNIRS-BCI for Gait Rehabilitation Using Deep Neural Networks. *Sensors*. 1932;(22). doi: 10.3390/s22051932

17. Mustafa A.H.H., Muhammad U.K., Deepti M. A Computationally Efficient Method for Hybrid EEG-fNIRS BCI Based on the Pearson Correlation. *BioMed Research International*. 2020;1838140. doi: 10.1155/2020/1838140
18. Sial M.B., Wang S., Wang X. et al. A Survey on EEG-fNIRS based Non-invasive hBCIs. *International Conference on Artificial Intelligence (ICAI)*. Islamabad, Pakistan, 2021:240–245. doi: 10.1109/ICAI52203.2021.9445246
19. Wang Z., Yang L., Zhou Y. et al. Incorporating EEG and fNIRS Patterns to Evaluate Cortical Excitability and MI-BCI Performance During Motor Training. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2023;31:2872–2882. doi: 10.1109/TNSRE.2023.3281855
20. Radha H.M., Karim A., Al-Timemy A.H. et al. Recognition of Upper Limb Movements Based on Hybrid EEG and EMG Signals for Human-Robot Interaction. *Iraqi Journal of Computers, Communications, Control & Systems Engineering (IJCCCE)*. 2023;23(2). doi: 10.33103/uot.ijccce.23.2.14
21. Fu L., Li H., Ji H., Li J. EEG-EMG Analysis Method in Hybrid Brain Computer Interface for Hand Rehabilitation Training. *Computing and Informatics*. 2023;42:741–761. doi: 10.31577/cai 2023 3 741
22. Kwon J., Shin J., Im C.H. Toward a compact hybrid brain-computer interface (BCI): Performance evaluation of multi-class hybrid EEG-fNIRS BCIs with limited number of channels. *PLoS One*. 2020;15(3). doi: 10.1371/journal.pone.0230491
23. Beniczky S., Donald L.S. Electroencephalography: basic biophysical and technological aspects important for clinical applications. *Epileptic Disord*. 2020;22(6). doi: 10.1684/epd.2020.1217
24. Marius V.D., Hadar A., Goda N. et al. Design and Implementation of an EEG-based BCI Prosthetic Lower Limb Using Raspberry Pi 4. *UPB Scientific Bulletin. Series C*. 2023;85(3). Available at: [https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/rez353\\_504936.pdf](https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez353_504936.pdf) (accessed 10.06.2024).
25. Li H., Guo S., Bu D., Wang H. et al. Subject-Independent Estimation of Continuous Movements Using CNN-LSTM for a Home-Based Upper Limb Rehabilitation System. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2023;8(10).
26. Jin H., Li C., Sun L. et al. To classify two-dimensional motion state of step length and walking speed by applying cerebral hemoglobin information. *10th International Conference on Human System Interactions (HSI)*. Ulsan, Korea (South), 2017:216–222. doi: 10.1109/HSI.2017.8005032
27. Yang L., Song Y., Ma K. et al. A novel motor imagery EEG decoding method based on feature separation. *Journal of Neural Engineering*. 2021;18:036022. doi: 10.1088/1741-2552/abe39b
28. Afonin A.N., Asadullaev R.G., Sitnikova M.A., Analysis of FNIRS tomograph data for controlling prosthetic limbs using the brain-computer interface. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2018;(11):182–185. (In Russ.)
29. Hermosilla D., Codorniu R., Baracaldo R. et al. Shallow Convolutional Network Excel for Classifying Motor Imagery EEG in BCI Applications. *IEEE Access*. 2021;9:98275–98286. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091399
30. Aydin E.A. Subject-specific feature selection for near infrared spectroscopy based brain-computer interfaces. *Computer Methods and Programs Biomedicine*. 2020;195:105535.
31. Asadullaev R.G., Afonin A.N., Shchetinina E.S. Recognition of patterns of motor activity by a neural network based on continuous optical tomography fNIRS data. *Economics. Information technologies*. 2021;48(4):735–746. doi: 10.52575/2687-0932-2021-48-4-735-746
32. Bin Abdul Ghaffar M.S., Khan U.S., Naseer N. et al. Improved Classification Accuracy of Four Class FNIRS-BCI. *12th International Conference on Electronics, Comput-*

- ers and Artificial Intelligence (ECAI)*. Bucharest, Romania, 2020:1–5. doi: 10.1109/ECAI50035.2020.9223258
33. Guo W.C., Zhang X., Liu H., Zhu X. Toward an enhanced human machine interface for upper-limb prosthesis control with combined EMG and NIRS signals. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2017;47(4):564575. doi: 10.1109/THMS.2016.2641389
  34. Lin J.F.L. Dual-MEG interbrain synchronization during turn-taking verbal interactions between mothers and children. *Cerebral Cortex*. 2023;33(7):4116–4134. doi: 10.1093/cercor/bhac330
  35. Maher A., Qaisar S.M., Salankar N. et al. Hybrid EEG-fNIRS brain-computer interface based on the non-linear features extraction and stacking ensemble learning. *Bio-cybernetics and Biomedical Engineering*. 2023;43(2):463–475. doi: 10.1016/j.bbe.2023.05.001
  36. Liu Z., Shore J., Wang M. et al. A systematic review on hybrid EEG/fNIRS in brain-computer interface. *Biomed Signal Process Control*. 2021;68:102595.
  37. Xu T., Zhou Z., Yanf Y. et al. Motor Imagery Decoding Enhancement Based on Hybrid EEG-fNIRS Signals. *IEEE Access*. 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3289709
  38. Li R., Yang D., Fang F. et al. Concurrent fNIRS and EEG for Brain Function Investigation: A Systematic, Methodology-Focused Review. *Sensors*. 2022;22(15). doi: 10.3390/s22155865
  39. Chunfu L., Ruite G., Zhichuan T. et al. Multi-channel FES gait rehabilitation assistance system based on adaptive sEMG modulation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2023;31:3652–3663. doi: 10.1109/tnsre.2023.3313617
  40. Cheng X., Sie E.J., Boas D. A., Marsili F. Choosing an optimal wavelength to detect brain activity in functional near-infrared spectroscopy. *Optics Letters*. 2021;46(4):924.
  41. Song T., Yan Z., Guo S. et al. Review of sEMG for Robot Control: Techniques and Applications. *Applied Sciences*. 2023;13(17). doi: 10.3390/app13179546
  42. Radek M., Martina L., Michaela S. et al. Advanced bioelectrical signal processing methods: Past, present, and future approach. Part III: Other biosignals. *Sensors*. 2021;21(18). doi: 10.3390/s21186064
  43. Kimoto H.F., Machida M. A wireless multi-layered EMG/MMG/NIRS sensor for muscular activity evaluation. *Sensors*. 2023;23(3). doi: 10.3390/s23031539
  44. Gimini R.D., Marco C., Marco F., Valentina Q. Validation of fabric-based thigh-wearable EMG sensors and oximetry for monitoring quadriceps activity during strength and endurance exercises. *Sensors*. 2020;17:1–13. doi: 10.3390/s20174664
  45. Daniel N., Sybilski K., Kaczmarek W. et al. Relationship between EMG and fNIRS during Dynamic Movements. *Sensors*. 2023;23(11). doi: 10.3390/s23115004
  46. Atzori M., Gijsberts A., Castellini C. et al. Electromyography data for non-invasive naturally-controlled robotic hand prostheses. *Scientific Data*. 2014;1(1):1–13.
  47. Arif A., Javed K., Sajid H. et al. Hemodynamic response detection using integrated EEG – fNIRS-VPA for BCI. *Computers, Materials and Continua*. 2021;70(1):535–555. doi: 10.32604/cmc.2022.018318
  48. Kwak Y., Song W.J., Kim S.E. FGANet: FNIRS-Guided Attention Network for Hybrid EEG-fNIRS Brain-Computer Interfaces. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2022;30:329–339. doi: 10.1109/TNSRE.2022.3149899
  49. Dario F., Ning J., Hubertus R. et al. The extraction of neural information from the surface EMG for the control of upper-limb prostheses: Emerging avenues and challenges. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2014;22(4): 797–809.
  50. Sattar N.Y., Kausar Z., Usama S.A. et al. Enhancing Classification Accuracy of Transhumeral Prosthesis: A Hybrid sEMG and fNIRS Approach. *IEEE Access*. 2021;9:113246–113257. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3099973

51. Nsugbe E., Phillips C., Fraser M.F., McIntosh J. Gesture recognition for transhumeral prosthesis control using EMG and NIR. *IET Cyber-Systems Robotics*. 2020;2(3): 122131. doi: 10.1049/iet-csr.2020.0008
52. Xiang Z., Lina Y., Xianzhi W. et al. A Survey on Deep Learning-based Non-Invasive Brain Signals: recent advances and new frontiers. *Journal of Neural Engineering*. 2020;(18):031002. doi: 10.1088/1741-2552/abc902.
53. Moufassih M., Tarahi O., Hamou S. et al. Boosting motor imagery brain-computer interface classification using multiband and hybrid feature extraction. *Multimedia Tools and Applications*. 2023;(83):1–32. doi: 10.1007/s11042-023-17118-7
54. Shelishiyah R., Dharan M.B., Kumar T.K. et al. Signal Processing for Hybrid BCI Signals. *Journal of Physics*. 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2318/1/012007
55. Ali M.U., Kim K.S., Kallu K.D. et al. OptEF-BCI: An Optimization-Based Hybrid EEG and fNIRS–Brain Computer Interface. *Bioengineering*. 2023;10(5). doi: 10.3390/bioengineering10050608
56. Samandari A.M. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) as a hybrid system: a review. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(1). doi: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.005. Available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1459> (accessed 10.06.2024).

### ***Информация об авторах / Information about the authors***

#### **Али Мирдан Самандари**

аспирант,  
Белгородский государственный  
национальный исследовательский  
университет  
(Россия, г. Белгород, ул. Победы, 85)  
E-mail: aliofphysics777ali@gmail.com

#### **Ali Mirdan Samandari**

Postgraduate Student,  
Belgorod State National Research University  
(85 Pobedy street, Belgorod, Russia)

#### **Андрей Николаевич Афонин**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры информационных  
и робототехнических систем,  
Белгородский государственный  
национальный исследовательский  
университет  
(Россия, г. Белгород, ул. Победы, 85)  
E-mail: afonin@bsu.edu.ru

#### **Andrey N. Afonin**

Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department  
of information and robotic systems,  
Belgorod State National Research University  
(85 Pobedy street, Belgorod, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 20.11.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 10.06.2024**

**Принята к публикации/Accepted 17.06.2024**