

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ ЭКЗОСКЕЛЕТОМ ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ МОТОРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА

В. М. Антипов^{1,2}, А. А. Бадарин^{1,3}, А. В. Андреев¹, В. В. Грубов^{1,3}, Е. Н. Пицик^{1,3,4}, С. А. Лобов¹, В. А. Максименко^{1,4,5}, В. Б. Казанцев^{1,3}, А. Е. Храмов^{1,3,4}

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта», Балтийский центр нейротехнологий и искусственного интеллекта, г. Калининград, Россия

² Радиофизический факультет, Нижегородский государственный университет им. Лобачевского, г. Н. Новгород, Россия

³ НИИ Нейронаук, Самарский государственный медицинский университет, г. Самара, Россия

⁴ Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

⁵ Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис», г. Казань, Россия

В настоящей работе представлено описание результатов разработки методов управления активным экзоскелетом для реабилитации моторной деятельности верхних конечностей человека. Описана экспериментальная установка, программная реализация системы управления в реальном времени, а также разработанная программная среда для стимуляции испытуемого в процессе проведения нейрофизиологического эксперимента. Объектом исследования описанной системы являются процессы активации участков мозга человека с точки зрения анализа регистрируемых биоэлектрических электроэнцефалографических сигналов во время двигательной активности, пригодные для использования в задачах реабилитации двигательной активности. Цель работы заключается в разработке программно-аппаратной части эксперимента по исследованию алгоритмов реального времени для управления экзоскелетом верхних конечностей для задач реабилитации с использованием интерфейсов «мозг-компьютер».

Ключевые слова: экзоскелет; приводы; интерфейс «мозг-компьютер»; тренировка моторной деятельности.

1. Введение

Традиционно одна из основных областей применения интерфейсов «мозг-компьютер» (ИМК) – управление внешними устройствами, например, антропоморфными манипуляторами, роботами и экзоскелетами, с помощью нейронной активности, генерируемой воображаемыми движениями [1]. В связи с этим применение

ИМК направлено на улучшение качества жизни людей с нарушением двигательных функций вследствие травм, нейродегенеративных заболеваний или потери конечностей. В частности, большое количество работ посвящено разработке интерфейсов «мозг-компьютер» для реабилитации больных после инсульта [2] и травмы спинного мозга [3], а также для управления биопротезом после ампутации конечности [4] и паралича [5].

2. Экспериментальная установка

Для проведения эксперимента по исследованию алгоритмов реального времени для управления экзоскелетом был выбран двухсторонний нейротренажер верхних конечностей 2N (производитель ООО «Нейроассистивные технологии», Россия). Основные компоненты в используемом нейротренажере – две роботизированные руки, оснащенные шестью активными и шестью пассивными степенями свободы. Основные компоненты и внешний вид экспериментальной установки изображены на рис. 1.

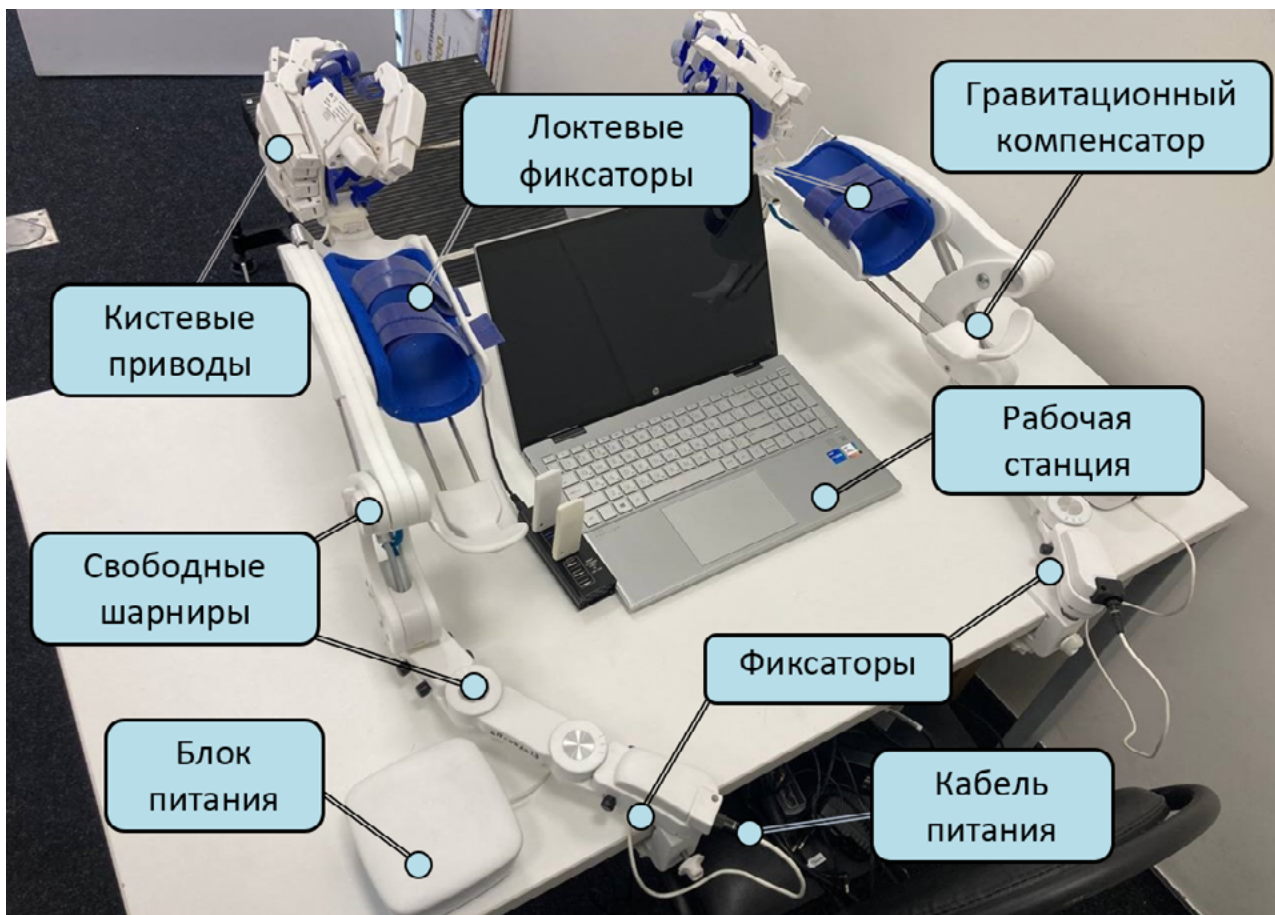


Рис. 1. Экспериментальная установка

В каждом активном шарнире установлены линейные сервоприводы, которые позволяют сгибать и разгибать отдельные пальцы кисти руки человека. Установка линейных редукторов в сервоприводах обусловлена обеспечением высокого момента на выходном валу исполнительного механизма. Это позволяет преодолевать мышечное сопротивление в случае спастики или если испытуемый полностью или частично утратил двигательные функции. Каждый палец надежно фиксируется с помощью гибких самоклеящихся липучек (рис. 2).

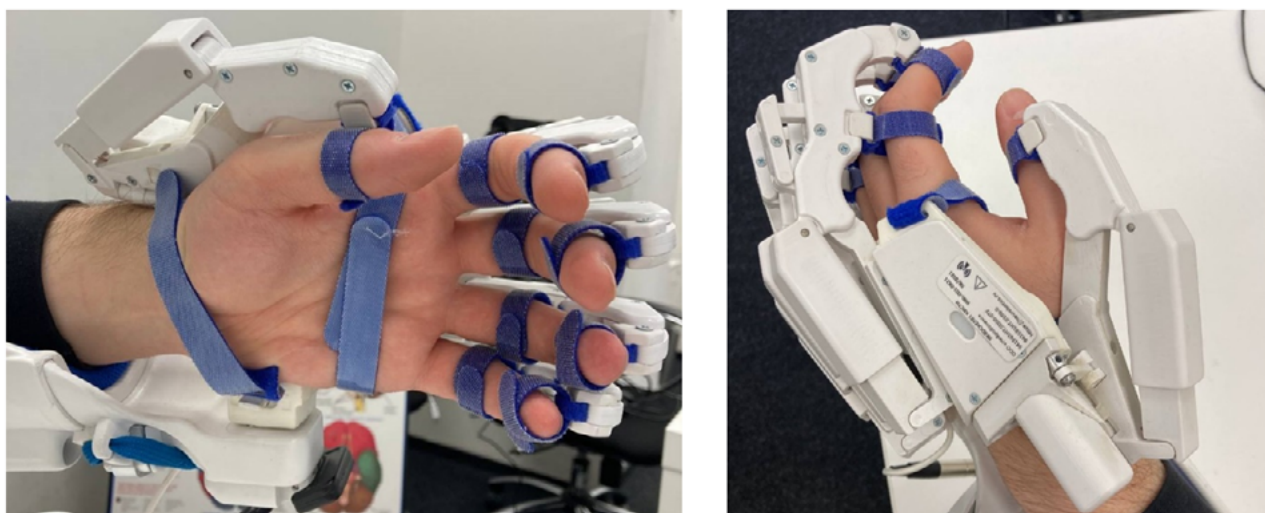


Рис. 2. Фиксаторы кисти человека

Фиксация позволяет гарантировать правильное положение пальцев рук, а также правильность выполнения упражнения. Также нейротренажер оснащен дополнительным приводом для позиционирования большого пальца во фронтальной плоскости; это позволяет улучшить эргономичность крепления и адаптировать устройство к индивидуальным особенностям испытуемого. Для обеспечения более надежной фиксации всей руки используются локтевые фиксаторы (рис. 1). Они представляют собой более широкие липкие ленты, закрепленные на подлокотнике. Устройство имеет выдвижной упор, который позволяет точнее установить точку опоры локтевого сустава с учетом длины рук испытуемого.

Пассивные (свободные) шарниры предназначены для обеспечения полного набора естественных движений человека во время прохождения эксперимента. В локтевом шарнире дополнительно установлен «гравитационный компенсатор», который позволяет компенсировать вес всей руки для разгрузки плечевых мышц человека. Это дает возможность испытуемому более комфортно переносить длительные исследования. Каждый пассивный шарнир обладает возможностью блокировки в определенном положении с помощью фиксаторов, изображенных на рис. 3. Эта возможность позволяет учесть специфику каждого отдельного эксперимента, например, если отдельно задействована только кисть руки.



Рис. 3. Расположение основных фиксаторов нейротренажера для блокировки пассивных степеней свободы

Одним из естественных движений человека является вращение кисти руки в сагиттальной плоскости. Для обеспечения данного вращения в нейротренажере установлен сагиттальный шарнир, представленный на рис. 3. Он также имеет фиксатор для блокировки необходимого положения и может быть использован для более удобного позиционирования кисти руки.

Обе руки можно задействовать как совместно, так и отдельно, предварительно установив необходимое программное обеспечение на рабочую станцию. В качестве рабочей станции может выступать обычный персональный компьютер с установленной операционной системой Windows. Одним из основных требований к рабочей станции является наличие необходимого количества USB Type A портов для подключения всех внешних модулей для управления устройством. В расширенной версии устройства могут потребоваться дополнительные порты ввода/вывода.

Для управления каждой отдельно взятой рукой нейротренажера используется кастомный модуль беспроводной связи. Данный модуль позволяет в реальном времени и на большом расстоянии отправлять и получать управляющие команды с устройства. Для работы с данным модулем необходимо установить дополнительные драйверы.

Для повышения мобильности нейротренажер оснащен внешним аккумуляторным блоком. Данный блок позволяет устройству работать в непрерывном режиме более 4 ч.

Аккумуляторные блоки полностью совместимы и подходят как для правой, так и для левой руки, что позволяет проводить длинные эксперименты, не прерываясь на подзарядку.

3. Система автоматического управления в реальном времени

Для управления роботизированными руками нейротренажера в реальном времени был разработан программный модуль, позволяющий контролировать положение каждого привода системы. Общая функциональная схема работы экспериментальной установки, а также методы взаимодействия между различными блоками и сопрограммами системы изображены на рис. 4.

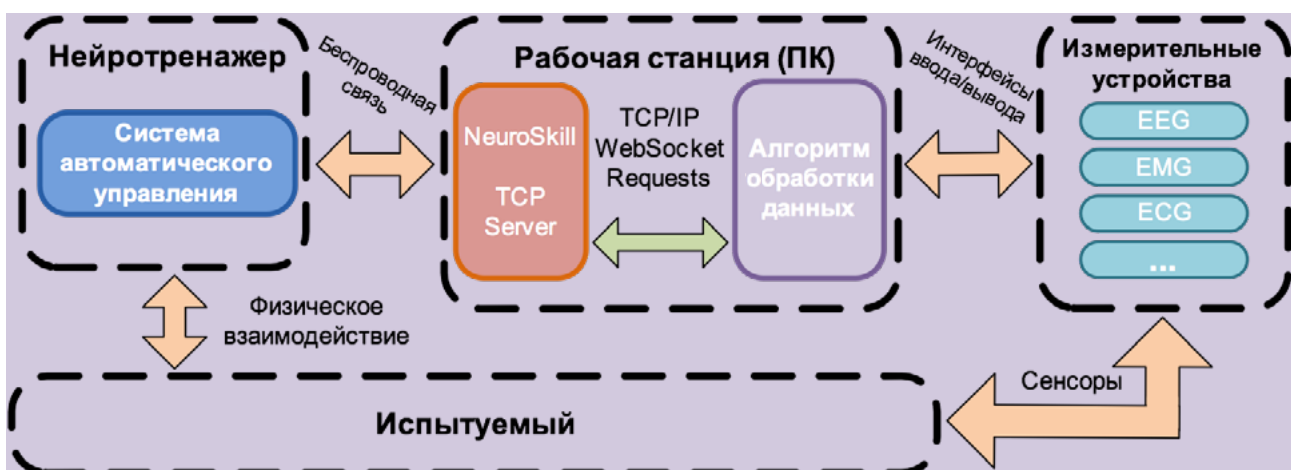


Рис. 4. Функциональная схема работы экспериментальной установки, взаимодействие и способы передачи данных между различными блоками системы

Управление сервоприводами на низком уровне осуществляется с помощью САУ, установленной на контроллерах каждой роботизированной руки. Контроллеры,

в свою очередь, подключаются посредством беспроводной связи к рабочей станции с помощью специальных модулей. Основной функционал по работе с сетевыми интерфейсами обеспечивает программное обеспечение NeuroSkill. Данная программа развертывает поверх TCP/IP стека веб-сервер в локальной сети. Для доступа к серверу предоставляется API, основанное на WebSocket (http) запросах. Для работы с данным API был разработан программный модуль – ВрAPPER на языке Python.

Данный модуль представляет собой класс, предоставляющий программный интерфейс для работы с каждым активным приводом нейротренажера. Набор методов позволяет гибко управлять скоростью, силой сжатия/разжатия и положением каждой конечности кисти руки. Для детектирования правильности выполнения команд программа позволяет в режиме реального времени получать текущее состояние различных параметров системы. Для этого отправляется специальный GET-запрос на сервер, после чего в ответ приходит JSON-структура, которая описывает запрашиваемые состояния. Парсинг данной структуры и чтение каждого ее поля позволяют получить нужный параметр и скорректировать выполнение основной программы.

Для обеспечения работы в реальном времени ВрAPPER запускается в отдельном потоке, что позволяет поддерживать высокую скорость работы и низкую латентность системы. Это обусловлено высокой нагрузкой на основной модуль программы, занимающийся обработкой и анализом данных с ЭЭГ. Для измерения ЭЭГ-сигналов используется электроэнцефалограф ActiChamp, который позволяет считывать 64 канала сенсорной информации на частоте выше 1000 Гц. Сенсоры закрепляются на голове пациента с помощью индивидуально подобранной шапки acti-Cap. Кроме того, на каждой руке можно установить по 3 сенсора ЭМГ, запись с которых производится с помощью модуля «Энцефалан-ЭЭГР-19/27» с частотой дискретизации 250 Гц.

Исходя из этого, разработанную функциональную схему экспериментальной установки можно описать следующим образом: на испытуемого закрепляются различные сенсоры, записывающие биоэлектрические сигналы; сенсоры подключаются к измерительному устройству (усилителю), которое проводит первичную фильтрацию и буферизацию измеренной информации. Затем измерительные устройства подключаются к рабочей станции (например, персональный компьютер, одноплатный компьютер и т. п.) и передают измеренные данные в рабочую программу BrainVision (или аналогичную), которая ретранслирует данные в модуль Алгоритма обработки данных. Алгоритм реализует методы выделения паттернов, ассоциированных с воображаемыми движениями верхними конечностями.

Далее посредством WebSocket запросов управляющие воздействия передаются на программное обеспечение NeuroSkill, которое преобразует и ретранслирует необходимые данные через беспроводной модуль связи в САУ нейротренажера. После этого устройство начинает выполнять упражнение и активировать руки испытуемого путем сгибательно-разгибательных движений, замыкая тем самым контур биологической обратной связи, что позволяет повысить эффективность процесса реабилитации моторной деятельности верхних конечностей человека с использованием активного экзоскелета.

4. Стимуляционная среда

Процесс проведения сложных нейрофизиологических экспериментов требует наличия специальных программных инструментов, позволяющих выполнять различные нетривиальные задачи и реализовывать таким образом сценарий экспери-

мента, что становится особенно важным при решении задач нейрореабилитации. Следует отметить, что каждый отдельно взятый эксперимент требует точного соблюдения временных интервалов, своевременного ведения лога данных, а также иметь возможность синхронизации с различными внешними устройствами. Для решения поставленных задач нами было разработано программное обеспечение Neuro-Physiological Experiments Studio (далее – NPESstudio). Данная программа позволяет в режиме реального времени предъявлять испытуемому различные стимулы, контролировать течение эксперимента, синхронизироваться с внешними измерительными устройствами, обрабатывать внешние триггеры с портов ввода/вывода, а также обеспечивает возможность получения обратной связи через сенсорные дисплеи и устройства ввода информации. Внешний вид основного окна описанной программы представлен на рис. 5.

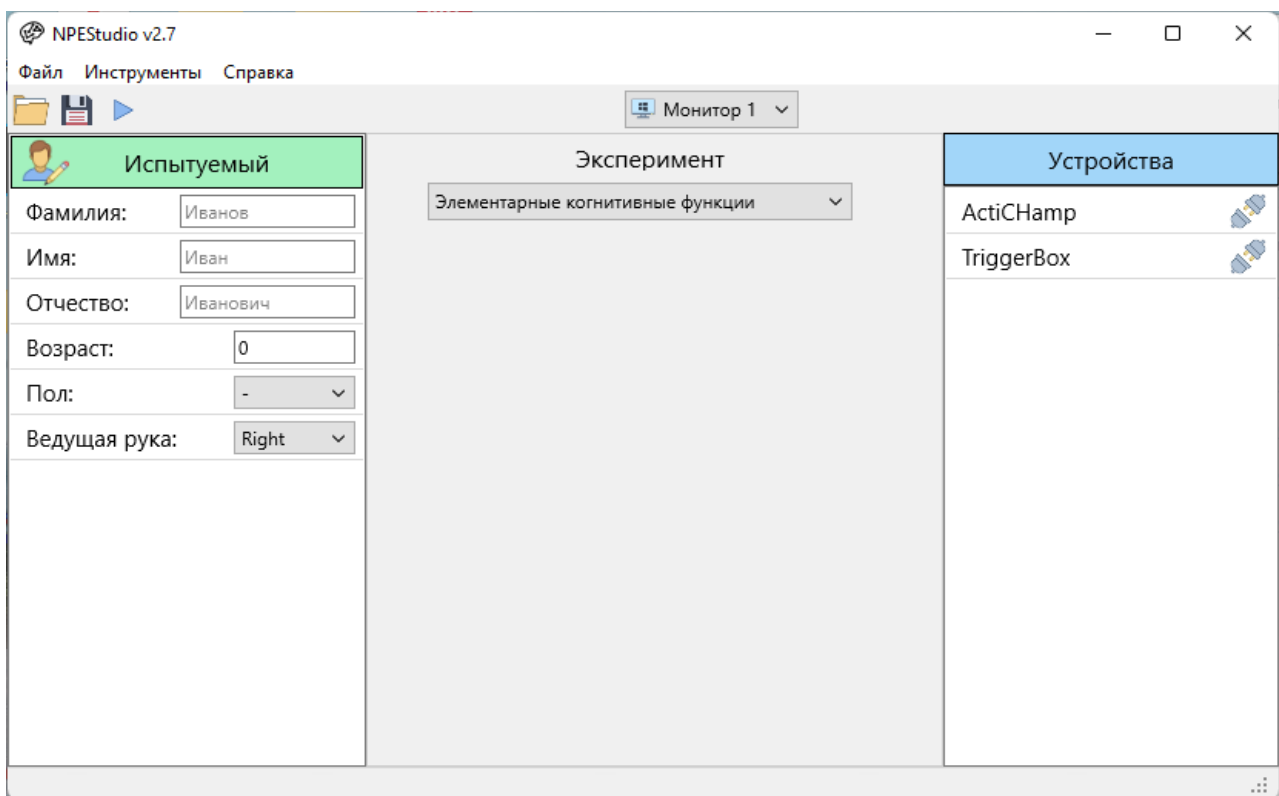


Рис. 5. Главное окно программы NPESstudio, где: «Испытуемый» – поля ввода основной информации о человеке, проходящем эксперимент; «Эксперимент» – элемент управления, позволяющий выбирать экспериментальную программу; «Устройства» – панель статуса подключения внешних устройств

Программа разработана на кроссплатформенном фреймворке FireMonkey в программной среде Embarcadero RAD Studio на языке программирования C++. Данный фреймворк позволяет запускать разработанную программу на таких операционных системах, как Windows, Linux, Android, MacOS, IOS. Ключевой особенностью FireMonkey является использование единой базы исходного кода, который легко компилируется на различные платформы.

Основное ядро разработанного приложения занимает модуль (класс) когнитивных задач, или Cognitive Test Stack. Данный модуль представляет собой масштабируемый контейнер когнитивных тестов, где каждый тест имеет обособленный модуль настроек с возможностью подключения к внешним измеряемым устройствам через управляющие потоки ввода/вывода. Для сохранения и стриминга данных

в программе реализована поддержка LSL протокола. Lab Streaming Layer (далее – LSL) – это система для унифицированного сбора временных рядов измерений в исследовательских экспериментах, синхронизации и доступа в реальном времени, а также для централизованного сбора, просмотра и записи данных на диск. Для удобного хранения и обработки данных в программе реализована поддержка формата mat.

Основные модули программы встраиваются в иерархичную структуру наследования классов, что позволяет легко наследовать и масштабировать отдельные модули для специфичных задач. Каждая задача (эксперимент), унаследованная от базового класса BaseTask, может легко встраиваться в общий стек задач. Это позволяет без особых усилий проектировать новые нейрофизиологические эксперименты. Также данный класс отвечает за отрисовку и визуализацию стимулов. Подобным образом реализованы все основные модули программы, например, триалы (совокупности повторяющихся стимулов).

5. Результаты

В ходе выполнения работ были разработан метод управления активным экзоскелетом для реабилитации моторной деятельности верхних конечностей человека, а также кроссплатформенное программное обеспечение, позволяющее быстро реализовывать различные мультимодальные алгоритмы стимуляции испытуемого в процессе проведения различных нейрофизиологических экспериментов.

6. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Балтийского федерального университета имени И. Канта в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

7. Список литературы

1. He, B. Noninvasive brain-computer interfaces based on sensorimotor rhythms / B. He, B. Baxter, B. J. Edelman [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2015. – Vol. 103, No. 6. – P. 907–925. – DOI 10.1109/JPROC. 2015.2407272.
2. Ang, K. K. Brain-computer interface for neurorehabilitation of upper limb after stroke / K. K. Ang, C. Guan // Proceedings of the IEEE. – 2015. – Vol. 103, No. 6. – P. 944–953. – DOI 10.1109/JPROC. 2015.2415800.
3. Müller-Putz, G. R. Moregrasp: Restoration of upper limb function in individuals with high spinal cord injury by multimodal neuroprostheses for interaction in daily activities / G. R. Müller-Putz, P. Ofner, A. Schwarz [et al.] // 7th Graz Brain-Computer Interface Conference. – 2017. – Vol. 7. – P. 338–343. – DOI 10.3217/978-3-85125-533-1-62.
4. Murphy, D. P. Electroencephalogram-based brain-computer interface and lower-limb prosthesis control: A case study / D. P. Murphy, O. Bai, A. S. Gorgey [et al.] // Front. Neurol. – 2017. – Vol. 8. – P. 696. – DOI 10.3389/fneur.2017.00696.
5. Bowsher, K. Brain-computer interface devices for patients with paralysis and amputation: a meeting report / K. Bowsher, E. F. Civillico, J. Coburn [et al.] // J. Neural Eng. – 2016. – Vol. 13, No. 2. – P. 23001. – DOI 10.1088/1741-2560/13/2/023001.

Сведения об авторах:

Антипов Владимир Михайлович, аспирант, радиофизический факультет, Нижегородский государственный университет им. Лобачевского, г. Н. Новгород, Россия. Эл. почта: vantipovm@gmail.com.

Бадарин Артем Александрович, к. ф.-м. н., старший научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, ул. А. Невского, 14, г. Калининград, 236041, Россия, старший научный сотрудник НИИ Нейронаук, Самарский государственный медицинский университет, 443079, г. Самара, ул. Гагарина, 18, Россия. Эл. почта: badarin.a.a@mail.ru

Андреев Андрей Викторович, к. ф.-м. н., старший научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, ул. А. Невского, 14, г. Калининград, 236041, Россия. Эл. почта: andreevandreii1993@gmail.com

Грубов Вадим Валерьевич, к. ф.-м. н., старший научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, ул. А. Невского, 14, г. Калининград, 236041, Россия, старший научный сотрудник НИИ Нейронаук, Самарский государственный медицинский университет, 443079, г. Самара, ул. Гагарина, 18, Россия. Эл. почта: vvgrubov@gmail.com

Пицик Елена Николаевна, младший научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, ул. А. Невского, 14, г. Калининград, 236041, Россия, младший научный сотрудник НИИ Нейронаук, Самарский государственный медицинский университет, 443079, г. Самара, ул. Гагарина, 18, Россия. Эл. почта: pitsikelena@gmail.com

Лобой Сергей Анатольевич, д. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, ул. А. Невского, 14, г. Калининград, 236041, Россия. Эл. почта: lobov@neuro.nnov.ru

Максименко Владимир Александрович, д. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, ул. А. Невского, 14, г. Калининград, 236041, Россия. Эл. почта: maximenkovl@gmail.com

Казанцев Виктор Борисович, д. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, ул. А. Невского, 14, г. Калининград, 236041, Россия, руководитель лаборатории НИИ Нейронаук, Самарский государственный медицинский университет, 443079, г. Самара, ул. Гагарина, 18, Россия. Эл. почта: kazantsev@neuro.nnov.ru

Храмов Александр Евгеньевич, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, ул. А. Невского, 14, г. Калининград, 236041, Россия, руководитель лаборатории НИИ Нейронаук, Самарский государственный медицинский университет, 443079, г. Самара, ул. Гагарина, 18, Россия. Эл. почта: a.hramov@innopolis.ru.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CONTROLLING AN ACTIVE EXOSKELETON FOR THE REHABILITATION OF MOTOR ACTIVITY OF THE HUMAN UPPER LIMBS

V. M. Antipov, A. A. Badarin, A. V. Andreev, V. V. Grubov, E. N. Pitsik, S. A. Lobov,
V. A. Maksimenko, V. B. Kazantsev, A. E. Hramov

*Neuroscience and Cognitive Technology Laboratory, Center for Technologies in Robotics
and Mechatronics Components, Innopolis University, Innopolis, Russia*

We present the results of the development of methods for controlling an active exoskeleton for the rehabilitation of motor activity of the human upper limbs. We describe an experimental setup, a software implementation of a real-time control system, and a developed software environment for stimulating a subject during a neurophysiological experiment. The object of study of the described system is the processes of activation of human brain regions from the point of view of the analysis of recorded bioelectrical electroencephalographic signals during motor activity, suitable for use in the tasks of rehabilitation of motor activity. The purpose of the work is to develop the software and hardware part of the experiment to study real-time algorithms for controlling the exoskeleton of the upper limbs for rehabilitation and training tasks using brain-computer interfaces.

Key words: exoskeleton; actuators; brain-computer interface; motor activity training.

References

1. He, B. Noninvasive brain-computer interfaces based on sensorimotor rhythms / B. He, B. Baxter, B. J. Edelman [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2015. – Vol. 103, No. 6. – P. 907–925. – DOI 10.1109/JPROC. 2015.2407272.
2. Ang, K. K. Brain-computer interface for neurorehabilitation of upper limb after stroke / K. K. Ang, C. Guan // Proceedings of the IEEE. – 2015. – Vol. 103, No. 6. – P. 944–953. – DOI 10.1109/JPROC. 2015.2415800.
3. Müller-Putz, G. R. Moregrasp: Restoration of upper limb function in individuals with high spinal cord injury by multimodal neuroprostheses for interaction in daily activities / G. R. Müller-Putz, P. Ofner, A. Schwarz [et al.] // 7th Graz Brain-Computer Interface Conference. – 2017. – Vol. 7. – P. 338–343. – DOI 10.3217/978-3-85125-533-1-62.
4. Murphy, D. P. Electroencephalogram-based brain-computer interface and lower-limb prosthesis control: A case study / D. P. Murphy, O. Bai, A. S. Gorgey [et al.] // Front. Neurol. – 2017. – Vol. 8. – P. 696. – DOI 10.3389/fneur.2017.00696.
5. Bowsher, K. Brain-computer interface devices for patients with paralysis and amputation: a meeting report / K. Bowsher, E. F. Civillico, J. Coburn [et al.] // J. Neural Eng. – 2016. – Vol. 13, No. 2. – P. 23001. – DOI 10.1088/1741-2560/13/2/023001.