

УДК 57.087

АНАЛИЗ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ

ПИЦИК ЕЛЕНА НИКОЛАЕВНА,
АНТИПОВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ,

Младшие научные сотрудники

ХОРЕВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник

АНО ВО «Университет Иннополис»,

Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники

Аннотация: в данной работе предложен подход к разработке системы нейрореабилитации пациентов с двигательными нарушениями на основе биологической обратной связи. Был описан этап формирования массива экспериментальных данных для дальнейшего анализа и обучения алгоритма детектирования и классификации электроэнцефалограмм, соответствующих выполнению движений, с целью формирования команд для нейротренажёра.

Ключевые слова: нейрореабилитация, экзоскелет, ЭЭГ, интерфейс мозг-компьютер, инсульт.

ANALYSIS OF MOTOR ACTIVITY IN AN EXPERIMENT WITH A ROBOTIC SYSTEM FOR NEUROREHABILITATION

Pitsik Elena,
Antipov Vladimir,
Khorev Vladimir

Abstract: in the present paper, we propose an approach to the development of a neurorehabilitation system for patients with movement disorders based on biological feedback. We describe the stage of forming an array of experimental data, which was used for further analysis and training of the algorithm for detecting and classifying electroencephalogram signals corresponding to the execution of movements in order to form commands for the neurostimulator.

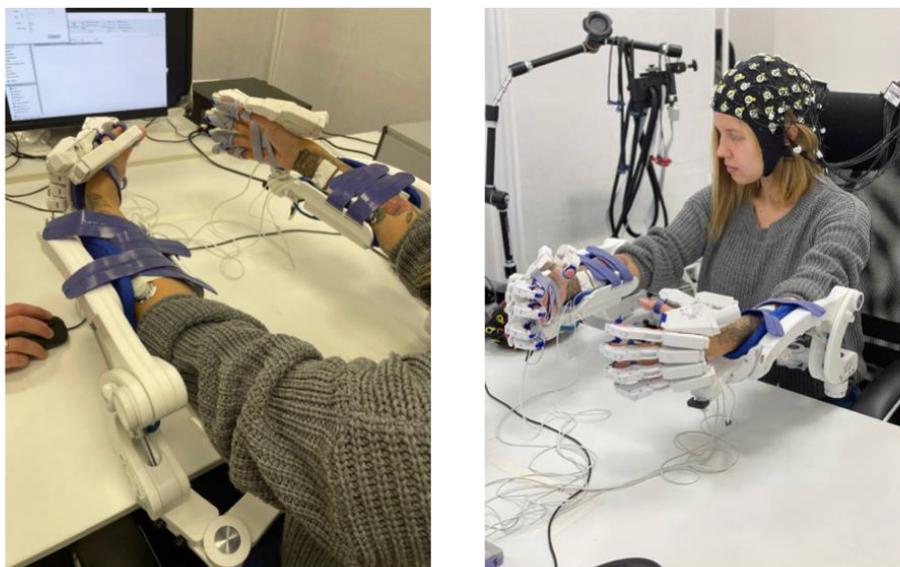
Key words: neurorehabilitation, exoskeleton, EEG, brain-computer interface, stroke.

Реабилитация пациентов с двигательными нарушениями является задачей высокой социальной значимости. На сегодняшний день одним из самых перспективных направлений исследований, проводимых в области нейрофизиологии, является разработка систем нейрореабилитации с биологической обратной связью [1, с. 8]. Существуют многочисленные свидетельства того, что использование паттернов электрической активности мозга, соответствующих движениям, для контроля экзоскелета вносит значительный вклад в положительную динамику восстановления функций верхних конечностей у постинсультных пациентов [2, с. 1135, 3, с. 1194]. В данном исследовании мы предлагаем разработку си-

стемы детектирования и классификации электрической активности мозга во время выполнения человеком квази-движений для формирования обратной связи.

Основной идеей разработанного нами подхода является использование частей экзоскелета верхних конечностей для ассистирования движению рукой пациентов с парезами в период реабилитации. Для достижения поставленной цели была проведена серия экспериментов, направленных на запись сигналов электроэнцефалограмм (ЭЭГ) и электромиограмм (ЭМГ) во время совершения человеком движений руками для обучения алгоритма классификации. В экспериментах приняли участие 7 человек из числа сотрудников и студентов АНО ВО «Университет Иннополис» (19–47 лет, 1 ж, 6 м). Отобранные участники эксперимента не имели медицинской истории черепно-мозговых травм, инсультов или неврологических заболеваний. Все участники подписали информированное согласие на проведение эксперимента. Дизайн эксперимента был одобрен этической комиссией Университета Иннополис, эксперимент проведён в соответствии с Хельсинской Декларацией [4, с. 2191].

А



Б

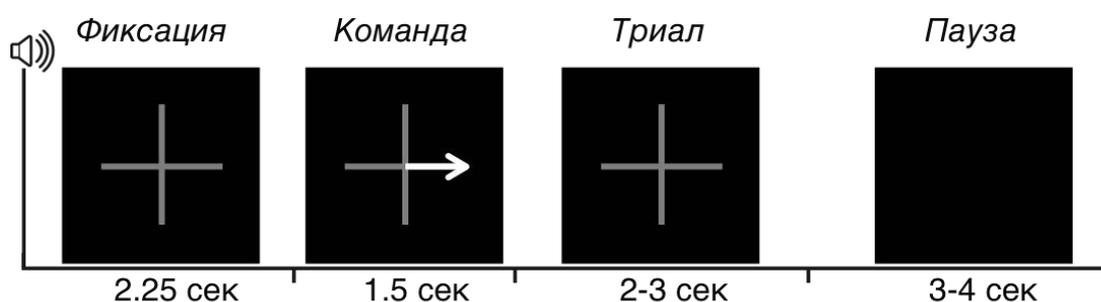


Рис. 1. А — изображение экспериментальной установки.

Б — схема одного двигательного задания согласно «стрелочной» парадигме

Во время эксперимента испытуемые располагались в удобном кресле, позволяющим разместить руки в нейротренажёре верхних конечностей. Нейротренажёр представляет собой экзоскелет для кисти и пальцев рук открытой конструкции с шестью степенями подвижности пальцев (Neurobotics, г. Москва) [5]. Электрическая активность мозга была записана с помощью электроэнцефалографа ActiChamp Plus (Brain Products, Германия), осуществляющего непрерывную запись ЭЭГ с 64 сенсоров с частотой дискретизации 1000 Гц [6]. Электроды располагались на голове при помощи шапки actiCap (Brain Products,

Германия), размер которой подбирался индивидуально для каждого испытуемого. Кроме того, на каждой руке были установлены по три сенсора ЭМГ, запись которой производилась с помощью модуля «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» (Медиком, г. Таганрог) с частотой дискретизации 250 Гц [7]. Экспериментальная установка изображена на рис. 1А.

Эксперимент состоял из двух фаз. Во время первой фазы испытуемые выполняли двигательные задачи по сигналу. Экспериментальное задание для испытуемого заключалось в совершении движений рукой по визуальному стимулу согласно «стрелочной» парадигме [8, с. 352], широко используемой при проведении экспериментов с интерфейсом мозг-компьютер [9, с. 3, 10, с. 58]. Визуализация одного этапа эксперимента, соответствующего выполнению одного движения рукой, представлена на рис. 1Б. Каждое задание начиналось с предъявления фиксационного креста в центре монитора с одновременным воспроизведением звукового сигнала. Через 2.25 секунды на кресте появлялась белая стрелка, указывающая влево или вправо, которая являлась стимулом для совершения движения соответствующей рукой. Испытуемые были проинструктированы начать совершение движения исчезновения стрелки (через 1.5 секунды). Через интервал времени, случайно выбранный в пределах 2–3 секунд, фиксационный крест пропадал с экрана, что соответствовало началу периода отдыха перед следующим сигналом. Таким образом, каждый испытуемый совершил по 30 движений каждой рукой.

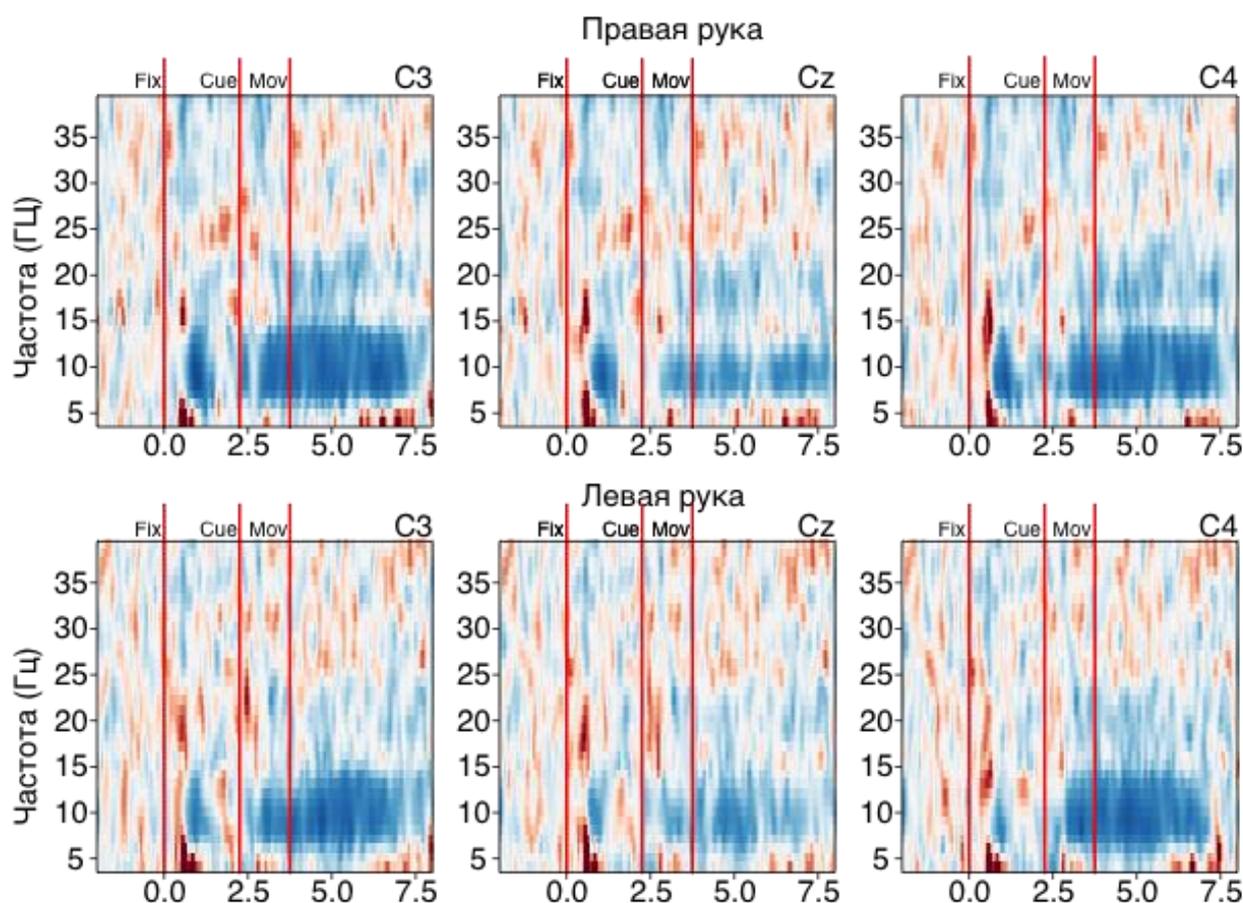


Рис. 2. Вейвлетные поверхности сигналов ЭЭГ, соответствующих движению левой и правой рукой, на каналах C3, C4 и Cz. Поверхности посчитаны для одного испытуемого и усреднены по триалам

Во время второй фазы эксперимента испытуемые совершали произвольные движения рукой. При этом экран монитора оставался чёрным, а количество движений считалось экспериментатором, отслеживавшим движения по сигналу ЭМГ в режиме реального времени. Каждый испытуемый совершил не менее 30 произвольных движений каждой рукой.

Само двигательное задание заключалось в совершении попыток сжать руку в кулак, или так называемых квази-движений, минимизированных при помощи фиксации руки в нейротренажёре.

В начале и в конце эксперимента, а также между двумя фазами эксперимента, производилась 60-секундная запись фоновой активности мозга с открытыми глазами, во время которой испытуемые были проинструктированы расслабиться и не фокусироваться на каких-либо конкретных мыслях.

Разметка сигналов ЭЭГ, соответствующих произвольным движениям, производилась при помощи меток, поставленных экспериментатором вручную, а также записанным сигналам ЭМГ.

Полученный набор данных ЭЭГ был отфильтрован в диапазоне 1–100 Гц при помощи фильтра Баттерворта 5-го порядка. Был применён режекторный фильтр с частотой отсечки 50 Гц для удаления помех, вызванных влиянием сети переменного тока.

На рис. 2 представлен результат частотно-временного анализа электрической активности мозга одного из испытуемых. В качестве метода анализа было выбрано непрерывное вейвлетное преобразование с вейвлетом Морле и количеством циклов, равным половине от рассматриваемого частотного диапазона. На рисунке представлены вейвлетные спектры сигналов ЭЭГ сенсомоторной коры мозга (каналы C3, C4, Cz), соответствующие выполнению движений правой и левой рукой. Видно, что моменту совершения движения (после исчезновения подсказки) значительно снижается спектральная энергия в районе частотного диапазона мю-ритма (8–14 Гц). Данный эффект называется десинхронизацией, связанной с событием (event-related desynchronization) и является одним из наиболее узнаваемых паттернов нейронной активности человека во время совершения движений [11, с. 154, 12, с. 501]. Кроме того, отчётливо видно более раннее возникновение нейронной активности в полушариях, контралатеральных выполняемому движению.

Полученный массив данных будет использован для тренировки алгоритма на основе рекуррентного анализа для детектирования и классификации двигательной активности пациентов с неврологическими нарушениями в период реабилитации. Разрабатываемый метод будет осуществлять связь между активностью мозга и нейротренажёром, подавая последнему команды для обратной связи.

Работа выполнена при поддержке

Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники Университета Иннополис.

Список источников

1. Hramov A. E., Maksimenko V. A., Pisarchik A. N. Physical principles of brain-computer interfaces and their applications for rehabilitation, robotics and control of human brain states // *Physics Reports*. – 2021.
2. Frolov A. A. et al. Electrical, hemodynamic, and motor activity in BCI post-stroke rehabilitation: clinical case study // *Frontiers in neurology*. – 2018. – Т. 9. – С. 1135.
3. Greenberg, A., Cohen, A., Grewal, M. Patent landscape of brain-machine interface technology // *Nature Biotechnology*. – 2021. – Т. 39, – С. 1194–1199.
4. World Medical Association Declaration of Helsinki: ethical principles for medical research involving human subjects // *JAMA*. – 2013. Т. 310, – С. 2191.
5. Нейротренажер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://neurobotics.ru/catalog/biomexanika/nejrotrenazher.html> (19.11.2021)
6. Ahn, M., et al. Gamma band activity associated with BCI performance: simultaneous MEG/EEG study // *Frontiers in Human Neuroscience*. – 2013. – Т. 7. – С. 1–10.
7. Cantillo-Negrete, J., et al. An approach to improve the performance of subject-independent BCIs based on motor imagery allocating subjects by gender // *BioMedical Engineering OnLine*. – 2014. – Т. 13, – Вып. 1, – С. 158.
8. Actichamp-Plus [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://brainvision.com/products/actichamp-plus/> (19.11.2021)

9. Электроэнцефалограф-регистратор «Энцефалан-ЭЭГР-19/26». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://medicom-mtd.com/htm/Products/eegr-main.html> (19.11.2021)
10. Choi K. Electroencephalography (EEG)-based neurofeedback training for brain–computer interface (BCI) // *Experimental brain research*. – 2013. – Т. 231. – №. 3. – С. 351-365.
11. Pfurtscheller G. et al. Mu rhythm (de) synchronization and EEG single-trial classification of different motor imagery tasks // *NeuroImage*. – 2006. – Т. 31. – №. 1. – С. 153-159.
12. Ince N. F., Tewfik A. H., Arica S. Extraction subject-specific motor imagery time–frequency patterns for single trial EEG classification // *Computers in biology and medicine*. – 2007. – Т. 37. – №. 4. – С. 499-508.

© Е.Н. Пицик, В.М. Антипов, В.С. Хорев, 2021