

Силина Екатерина Владимировна

д-р мед. наук, профессор
ГБОУ ВПО «Первый Московский государственный
медицинский университет им. И.М. Сеченова»
Минздрава России
г. Москва

Богданов Евгений Анатольевич

научный сотрудник
ФГАОУ ВПО «Балтийский федеральный
университет им. И. Канта»
г. Калининград, Калининградская область

Шушарина Наталья Николаевна

канд. пед. наук, заместитель директора
Химико-биологический институт
ФГАОУ ВПО «Балтийский федеральный
университет им. И. Канта»
г. Калининград, Калининградская область

Патрушев Максим Владимирович

канд. биол. наук, директор
Химико-биологический институт
ФГАОУ ВПО «Балтийский федеральный
университет им. И. Канта»
г. Калининград, Калининградская область

Ступин Виктор Александрович

д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой
ГБОУ ВПО «Российский национальный исследовательский
медицинский университет им. Н.И. Пирогова»
Минздрава России
г. Москва

СОЗДАНИЕ НЕЙРОУСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ И КОМПЕНСАЦИИ ДВИГАТЕЛЬНОЙ ФУНКЦИИ

Аннотация: разработано многофункциональное нейророботизированное устройство с биологической обратной связью на основе биометрических сигналов управления электромиографии (ЭМГ), электроэнцефалографии (ЭЭГ), электроокулографии, фотоплетизмографии, термометрии и двигательной активности. Проведены эксперименты каждого метода. Авторами исследована гибридизация ЭЭГ и ЭМГ сигналов, показавшее преимущество над одномодальными системами, что позволяет подключать нейророботизированное устройство к экзоскелетам для компенсации утраченной двигательной функции.

Ключевые слова: нейророботизированное устройство, экзоскелет, электромиография, электроэнцефалография, электроокулография, фотоплетизмография, термометрия.

Введение. Более миллиарда человек в мире имеют ограниченные возможности, 15% из которых имеют тяжелую двигательную инвалидизацию [1; 2]. Поэтому одной из самых сложных медико-социальных проблем современности является скорейшая и максимально возможная реабилитация больных, что особенно актуально в условиях увеличения средней продолжительности жизни и прогрессирующего роста патологии сердечно-сосудистой системы, в т. ч. инсульта, и, связанного с этим, ростом инвалидизации, наносящей огромный и невосполнимый ущерб экономике. Наиболее остро эта проблема стоит в развивающихся странах со средним и низким уровнем достатка [3]. К сожалению, даже при адекватной комплексной мультидисциплинарной реабилитации, этапно оказываемой в течении длительного времени [4], не удастся добиться полного восстановления пациентов. В данной связи целесообразным является развитие средств и методов реабилитации, направленных на компенсацию утраченных двигательных функций. В настоящее время на рынке представлены различные роботизированные комплексы, экзоскелетные конструкции, однако пока они

имеют ограниченный функционал и не способны точно замещать утраченные двигательные возможности.

В данной связи активно развиваются перспективные методы, базирующиеся на физиологии центральной нервной системы, названные мозг-компьютерным интерфейсом, которые способны отслеживать мозговую активность и преобразовывать намерения человека в команды внешним устройствам, нейропротезам [5; 6]. Перспективность и эффективность использования подобного рода устройств была продемонстрирована у инвалида с тетраплегией с относительно сохранной сенсорной, эмоциональной и когнитивной сферой [7], при этом контроль осуществлялся с помощью электроэнцефалографии (ЭЭГ) и электромиографии (ЭМГ). Предложен подход для создания декодеров на основе ЭЭГ, которые могут реконструировать углы в суставах пальцев, при таком движении как дотягивание с захватом, точность ЭЭГ сигнала при этом составила 76% [8]. Пр продемонстрирована возможность с помощью анализа ЭЭГ определить с точностью 65–71% одно из пяти выполняемых или представляемых движений запястья и пальцев рук [9]. Вопреки устойчивому мнению о необходимости использования большого числа каналов ЭЭГ для точной диагностики ученые выбрали 6 из 32 каналов и представили модернизированную классификацию сигналов ЭЭГ для искусственной нейронной сети и управления роботизированным устройством, при этом точность классификации при выполнении определенных двигательных задач достигла 86% [10]. По мере развития нейротехнологий для управления роботизированными протезами были предложены разнообразные интерфейсы, однако устойчивость биосигналов все еще неидеальна. Для преодоления проблемы шумов, артефактов и точности можно использовать комбинирование различных физиологических сигналов.

В данной связи проведена работа, *целью* которой стало создание многофункционального нейроустройства и изучение возможностей длительного мониторинга электроэнцефалографии (ЭЭГ), электромиографии (ЭМГ), электроэнцефалографии (ЭОГ), пульса, насыщения тканей кислородом, температуры тела и двигательной активности с передачей данных на экзоскелетные конструкции.

Основанием для проведения прикладных научных исследований, выполняемых в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» является Соглашение о предоставлении субсидии от «27» октября 2015 г. №14.578.21.0140.

Методы. Разрабатывается нейроустройство, которое способно одновременно распознавать различные электрофизиологические сигналы (ЭЭГ, ЭМГ, ЭОГ с подключением модулей фотоплетизмограммы, SpO2 и температуры), обеспечивать технологию биологической обратной связи и передавать обработанную информацию на экзоскелетные и роботизированные конструкции в режиме реального времени. К настоящему времени создан макет нейроустройства и проведено не менее 100 испытаний каждого метода. Методом ЭЭГ была измерена электрическая активность головного мозга, ЭМГ – биоэлектрические потенциалы скелетных мышц (с бедренной мышцы), ЭОГ – биопотенциалы движения глазного яблока, термометрии – определение температуры испытуемого, методом фотоплетизмографии (ФПГ) был проведен подсчет пульса. Наряду с этим оценивали двигательную активность по изменению углов Эйлера при выполнении физических упражнений (наклон и поворот головы влево, вправо, вперед, назад). Полученные данные регистрировались в графическом виде и цифровом виде.

С целью проведения объективного анализа работоспособности разрабатываемого устройства были использованы референсные, хорошо зарекомендовавшие себя на медицинском и нейрофизиологической рынке, приборы. Так, результаты регистрации ЭЭГ, ЭМГ и ЭОГ сигналов сравнивали с результатами прибора KARDi3 (Медицинские компьютерные системы, Россия). Для сравнения точности измерений температуры тела использован мультиметр Fluke 17b с подключаемым термистором (Fluke Corporation, США). Для регистрации данных ЭЭГ, ЭМГ и ЭОГ с разрабатываемого макета нейроустройства было создано собственное программное обеспечение, для регистрации данных с прибора KARDi3 была использована программа «Неокортекс» (Россия). При проведении исследования

пульса для регистрации данных с KARDi3 была использована программа «Неокортекс», для макета нейроустройства – «Heart Rate Monitor Demo» (США).

На втором этапе проведено исследование возможностей совместной регистрации ЭЭГ и ЭМГ сигналов, снятых с нейроустройства для обеспечения последующей совместной работы в комплексе с экзоскелетами. В этом исследовании приняли участие 10 здоровых мужчин (правши) в возрасте 22–29 лет. Испытуемые должны были визуализировать движения левой ноги, а затем выполнять сгибание и разгибание бедра. Для оценки точности классификации использовались вначале только сигналы ЭМГ, затем ЭМГ+ЭЭГ. Каждый участник эксперимента выполнил по 10 сессий для каждого варианта визуализации движения и выполнения движения.

Результаты. Данные ЭЭГ, полученные с помощью макета нейроустройства, обладали аналогичными единичными артефактами, что и данные ЭЭГ, полученные с прибора KARDi3, число артефактов было сопоставимым. Это свидетельствует о конкурентоспособности разрабатываемого нейроустройства в данном направлении. Артефакты мышечной активности связаны с утомлением испытуемого и, как следствие, небольшим движением шеи и головы. В ходе проведения работы мышечные (двигательные) артефакты ЭЭГ, ЭОГ сигнала устранены дополнительными режекторными фильтрами и программно с аппаратной автокалибровкой положения электродов относительно тела человека.

В ходе эксперимента по оценке качества сигнала ЭМГ было установлено, что данные ЭМГ, полученные с помощью макета нейроустройства, обладают такой же информативностью, что и данные ЭМГ, полученные с прибора KARDi3. Это также свидетельствует о достоверности полученных результатов, их точности и качестве. Артефактов не было.

Данные ЭОГ макета нейроустройства были не только сопоставимы по информативности с полученными результатами аппарата KARDi3, при этом число артефактов было меньше при снятии ЭОГ посредством разработанного нами макета. Это свидетельствует о достоверности полученных результатов, их точности и высоком качестве сборки макета нейроустройства. Самым частым артефактом

было моргание, проявляющееся в виде резкого возрастания амплитуды ЭОГ, а также регистрировались артефакты мимической мускулатуры, возникающие при утомлении испытуемого.

Полученные результаты исследовательских испытаний по определению температуры свидетельствовали о том, что термодатчик макета нейроробота обладает высокой стабильностью и точностью получаемых измерений. Результаты проведенных измерений были сопоставимы с референтным прибором Fluke 17b.

Регистрируемый пульсовой сигнал был также получен двумя способами. Данные R-R интервальной оценки с помощью прибора KARDi3, характеризовались теми же значениями пульса, что и значения пульса, измеренные с помощью модуля фотоплетизмографии разработанного нейроробота. В среднем (медиана) показатель ЧСС составил 77 ударов/мин. на KARDi3 и нейророботе. Артефактов, влияющих на результат, не было.

В ходе исследования двигательной активности при выполнении серии упражнений по наклону и повороту головы были получены результаты, свидетельствующие о высокой точности и четкости получаемых данных с помощью датчика движения макета нейроробота. При некоторых измерениях наблюдалось плавание гироскопа, связанное с изменением магнитного поля от аккумуляторной батареи. Это обусловлено относительно мягким креплением аккумулятора к макету, при жесткой фиксации аккумулятора к нейророботу данный аспект был устранен. При изготовлении экспериментального образца нейроробота это учтено и будет использована программно-аппаратная автокалибровка положения относительно пациента. В экспериментальном образце основными измеряемыми параметрами двигательной активности будут являться линейное ускорение акселерометра, угловое ускорение гироскопа и вектор магнитного поля магнитометра.

В ходе исследования эффективности гибридизации сигнала ЭЭГ и ЭМГ были получены результаты, свидетельствующие в пользу слияния нескольких

электрофизиологических сигналов. Эксперимент показал, что точность ЭМГ составила в среднем 74,3%, а гибридизация ЭМГ и ЭЭГ позволила увеличить у всех испытуемых точность классификации в среднем на 12,5%, достигая уровня 86,8% (от 75% до 97%).

Заключение.

Полученные данные позволили сделать заключение о высоком качестве разработанного макета нейроустройства, его перспективности и вероятной конкурентоспособности на мировом рынке. Результаты эксперимента гибридизации ЭЭГ и ЭМГ сигналов продемонстрировали существенное преимущество гибридных систем над одномодалными. Не зависящие от мышечной работы сигналы ЭЭГ являются дополнительным идентификатором, что можно использовать в роботизированной технике. Предполагается, что доработка системы и одновременное использование разных физиологических исследований позволит увеличить точность диагностики до 100%. Дальнейшие исследования позволят перейти к формулированию оптимальности различных технических решений для отдельных модулей и интерфейсов разрабатываемой платформы, что в результате станет основой создания высокоточного и безопасного многофункционального нейроустройства, способного полноценно компенсировать утраченные двигательные функции инвалидов и обеспечить активное долголетие населения.

Благодарности: Работа проводится при финансовой поддержке Министерства образования и науки России (ФЦПР: RFMEFI57815X0140).

Список литературы

1. Darzi A., Officer A., Abualghaib O., Ak E. Stakeholders' perceptions of rehabilitation services for individuals living with disability: a survey study // Health Qual Life Outcomes. – 2016. – 14: 2.
2. Officer A., Shakespeare T. The world report on disability and people with intellectual disabilities (vol. 10, pg. 86, 2013) // J Policy Pract Intel. – 2013. –10 (3): 268–269.
3. Hosseinpour A.R., Williams J.A.S., Gautam J., Posarac A., Officer A., Verdes E., et al. Socioeconomic inequality in disability among adults: a multicountry

study using the world health survey // Am J Public Health. – 2013. – 103 (7): 1278–1286.

4. Von Groote P.M., Bickenbach J.E., Gutenbrunner C. The World Report on Disability-implications, perspectives and opportunities for physical and rehabilitation medicine (PRM) // J Rehabil Med. – 2011. – 43 (10): 869–875.

5. Weeks M. Digital Signal Processing Using MATLAB and Wavelets // Infinity Science Press. – 2007. – 452 p.

6. Tonet O., Marinelli M., Citi L., Rossini P., Megali G., Dario P. Defining brain-machine interface applications by matching interface performance with device requirements // Journal of neuroscience methods. – 2008. – 167 (1): 91–104.

7. Collinger J.L., Wodlinger B., Downey J.E., Wang W., Tyler-Kabara E.C., Weber D.J. et al. High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia // Lancet. – 2013. – 381 (9866): 557–564.

8. Agashe H., Contreras-Vidal J.L. Reconstructing hand kinematics during reach to grasp movements from electroencephalographic signals // Engineering in Medicine and Biology Society. – EMBC, 2011. – Annual International Conference of the IEEE. – 2011: 5444–5447.

9. Mohamed A.K., Marwala T., John L.R. Single-trial EEG discrimination between wrist and finger movement imagery and execution in a sensorimotor BCI // Engineering in Medicine and Biology Society. – EMBC, 2011. – Annual International Conference of the IEEE. – 2011: 6289–6293.

10. Yang J. Singh H, Hinesc E, Schlagheckend F, Iliescuc DD., Leesonc MS et al. Channel selection and classification of electroencephalogram signals: An artificial neural network and genetic algorithm-based approach // Artificial intelligence in medicine. – 2012. – 55 (2): 117–126.