

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2026-16-2-54-75>



УДК 004.42, 004.75

Биотехническая система управления реабилитацией верхних конечностей на основе мониторинга косвенного критерия биотехнического резонанса

Е. В. Петрунина¹, Д. А. Ермаков², М. К. Скворцов²,
В. Э. Дрейзин², С. А. Филист², О. В. Шаталова²✉

¹ Московский политехнический университет
ул. Большая Семёновская, д. 38, г. Москва 107023, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: Shatolg@mail.ru

Резюме

Целью исследования является повышение эффективности реабилитации двигательных функций верхних конечностей посредством синхронизации реальной и воображаемой двигательной активности и сервоприводов узлов и механизмов, осуществляющих техническую поддержку реабилитационного процесса.

Методы. Разработан прототип биотехнической системы для управления реабилитацией нарушений двигательных функций верхних конечностей, отличающийся включением в прямую цепь контура управления модулей анализа электроэнцефалограммы, электромиограммы и показаний динамометра, а в цепь биологической обратной связи – модуля управления виртуальной реальностью, позволяющий адаптировать локальные параметры процедуры реабилитации под текущее функциональное состояние пациента. Разработан алгоритм управления процедурой реабилитации верхних конечностей, отличающийся мониторингом косвенного критерия биотехнического резонанса посредством анализа расстояний в кластерном пространстве, построенном в координатах показаний динамометра и мышечной усталости, позволяющий управлять глобальными параметрами процедуры реабилитации с дискретностью равной одному пачу.

Результаты. Проведены экспериментальные исследования биотехнической системы при мониторинге косвенного критерия биотехнического резонанса, которые показали, что полученные при мониторинге биотехнического резонанса результаты превосходят результаты реабилитации известным методом: на шкале MBI – на 6%, на шкале MFT – на 20%, на шкале мышечной силы – на 13%, на шкале ARAT – на 23%, на шкале FMA – на 12% и на шкале Эшворта – на 13%.

Заключение. В данной статье представлено решение задачи синхронизации двигательной активности верхних конечностей человека и ассистирующих робототехнических устройств. Результаты исследования могут быть использованы для построения биотехнических систем реабилитации нарушений двигательной активности с управлением процедурой реабилитации посредством мониторинга биотехнического резонанса.

Ключевые слова: биотехническая система; реабилитация постинсультных больных; электроэнцефалограмма; электромиограмма; воображаемые движения; алгоритм; косвенный критерий биотехнического резонанса.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Конфликт интересов: Филист А. Б. является членом редакционной коллегии журнала «Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» с 2015 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Шаталова О. В. является членом редакционной коллегии журнала «Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» с 2022 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляют.

Для цитирования: Биотехническая система управления реабилитацией верхних конечностей на основе мониторинга косвенного критерия биотехнического резонанса / Е. В. Петрунина, Д. А. Ермаков, М. К. Скворцов, В. Э. Дрейзин, С. А. Филист, О. В. Шаталова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2026. Т. 16, № 2. С. 54–75. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-54-75>.

Поступила в редакцию 07.04.2026

Подписана в печать 06.05.2026

Опубликована 30.06.2026

Biotechnical system for managing upper limb rehabilitation based on monitoring an indirect criterion of biotechnical resonance

Elena V. Petrunina¹, Dmitriy A. Ermakov², Mihail K. Skvortsov²,
Valery E. Drejzin², Sergey A. Filist², Olga V. Shatalova²✉

¹ Moscow Polytechnic University
38 Bolshaya Semenovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: Shatolg@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to improve the effectiveness of upper limb motor function rehabilitation by synchronizing real and imagined motor activity with the servo drives of the units and mechanisms that provide technical support for the rehabilitation process.

Methods. A prototype biotechnical system for managing the rehabilitation of upper limb motor function disorders was developed. This system incorporates EEG, EMG, and dynamometer analysis modules into the control loop's forward loop, and a virtual reality control module into the biofeedback loop, enabling adaptation of local rehabilitation procedure parameters to the patient's current functional state. An algorithm for controlling upper limb rehabilitation was developed, featuring monitoring of an indirect biotechnical resonance criterion through distance analysis in a cluster space constructed using dynamometer readings and muscle fatigue coordinates, enabling global rehabilitation procedure parameters to be controlled with a granularity of one patch.

Results. Experimental studies of a biotechnical system monitoring the indirect criterion of biotechnical resonance were conducted. These studies demonstrated that the results obtained through biotechnical resonance monitoring exceed those of the established rehabilitation method by 6% on the MBI scale, 20% on the MFT scale, 13% on the muscle strength scale, 23% on the ARAT scale, 12% on the FMA scale, and 13% on the Ashworth scale.

Conclusion. This article presents a solution to the problem of synchronizing the motor activity of human upper limbs and assistive robotic devices. The results of the study can be used to develop biotechnical rehabilitation systems for motor disorders with rehabilitation procedure control through biotechnical resonance monitoring.

Keywords: biotechnical system; rehabilitation of post-stroke patients; electroencephalogram; electromyogram; motor imagery; algorithm; indirect biotechnical resonance criterion.

Funding: The work was carried out within the framework of the development program of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Southwest State University" of the strategic academic leadership program "Priority – 2030."

Conflict of interest: Filist A. B. is a member of the editorial board of the journal "Series: Management, computing, computer science. Medical instrumentation" since 2015, but has nothing to do with the decision to publish this article. Shatalova O. V. is a member of the editorial board of the journal "Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical device-structure" since 2022, but has nothing to do with the decision to publish this article. The article passed the peer review procedure adopted in the journal. The authors are not for other conflicts of interest.

For citation: Petrunina E.V., Ermakov D.A., Skvortsov M.K., Drejzin V.E., Filist S.A., Shatalova O.V. Biotechnical system for managing upper limb rehabilitation based on monitoring an indirect criterion of biotechnical resonance. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika.*

Введение

Нейромышечная связь — это способность мозга эффективно посылать сигналы мышцам, чтобы они сокращались нужным образом. Она позволяет человеку управлять движениями, чувствовать тело и выполнять даже самые сложные действия. Это постоянный «диалог»: мозг управляет телом, а тело в ответ сообщает, как выполняется команда. Развивая эту связь, можно точнее включать нужные мышцы, получать более высокие результаты и снижать риск травм.

При реабилитации постинсультных больных с нарушениями двигательной активности (ДА) требуется восстановить нейромышечные связи. С этой целью во многих медицинских системах реабилитации используют виртуальную реальность (VR). Но для VR, кроме биотехнических обратных связей (БТОС), необходима биологическая обратная связь (БОС), которая позволяет пациенту контролировать свой результат выполнения задания. С учётом того, что при необходимости возможна помощь при выполнении задания со стороны, например, экзоскелета, на термине БОС возможны завышенные результаты, которые играют роль дополнительной стимуляции достижения биотехнического резонанса.

На сегодняшний день опубликовано значительное количество клинических исследований, подтверждающих эффективность использования интерфейса мозг-компьютер (ИМК) для вос-

становления двигательной функции верхней конечности у пациентов с инсультом. Например, метаанализ 21 рандомизированного контролируемого исследования (общее число участников 650 человек) был проведен Chen и Yun [1]. Авторы исследования провели всесторонний поиск в 6 электронных базах данных с момента их создания до 16 октября 2025 г., включая PubMed (через Национальную медицинскую библиотеку), Embase (через Ovid), Центральный регистр контролируемых исследований Кокрейна (через Wiley), Scopus (через Elsevier), Web of Science Core Collection (через Clarivate Analytics) и Wanfang Data. Эти платформы были выбраны для обеспечения широкого охвата международной литературы. Поиск во всех базах данных проводился индивидуально; поиск по нескольким базам данных на одной платформе не выполнялся.

Критерии включения исследования в метаанализ были следующими:

- 1) популяция: взрослые (>18 лет) с диагнозом хронического инсульта (>6 месяцев после инсульта), демонстрирующие стабильные жизненные показатели и бодрствующее сознание;
- 2) вмешательство: получение любой формы тренировки на основе ИМК;
- 3) контрольная группа: получение либо плацебо-интервенции с использованием ИМК, либо традиционной реабилитационной терапии (например, физиотерапия, трудотерапия и тренировка на беговой дорожке);

4) результаты: оценка с использованием шкалы Фугл-Мейера для оценки состояния верхних конечностей (FMA-UE), теста Action Research Arm Test (ARAT), модифицированной шкалы Эшворта (MAS), модифицированного индекса Бартеля (MBI) и журнала двигательной активности (MAL);

5) дизайн исследования: рандомизированные контролируемые исследования (РКИ).

Метаанализ показал следующие результаты:

- улучшение моторной функции (по шкале FMA-UE): средняя разница составила 2,50 балла по сравнению с контрольными группами, при использовании подтипа ИМК с функциональной электростимуляцией (ФЭС) улучшение достигало 5 баллов;

- улучшение активности в повседневной жизни (по шкале MBI): средняя разница 8,38 балла.

Анализ подгрупп показал, что ФЭС в сочетании с ИМК привела к наибольшему улучшению восстановления двигательных функций (по шкале FMA-UE: средняя разница 5).

Эффект на мышечный тонус и мелкую моторику (по шкале ARAT) не достиг статистической значимости.

Согласно данному метаанализу, оптимальный протокол тренировки составил 30-минутные сессии 4-5 раз в неделю в течение 2 недель (всего 10-12 занятий).

В исследовании Sieghartsleitner и соавторов [2] с участием 19 пациентов с хроническим инсультом было показано улучшение по шкале FMA-UE в среднем на 4,2 балла после 25 сессий ИМК-тренинга.

Пациенты проходили тренировку с использованием системы ИМК на основе мысленного представления информации (MI), реалистичного 3D-аватара для визуальной обратной связи и ФЭС (рис. 1). Во время терапии пациенты носили беспроводные ЭЭГ-шапочки, соответствующие размеру их головы, с 16 активными электродами, охватывающими сенсомоторную кору. Референтный электрод был установлен на правой мочке уха, а заземляющий электрод – в зоне AFz.

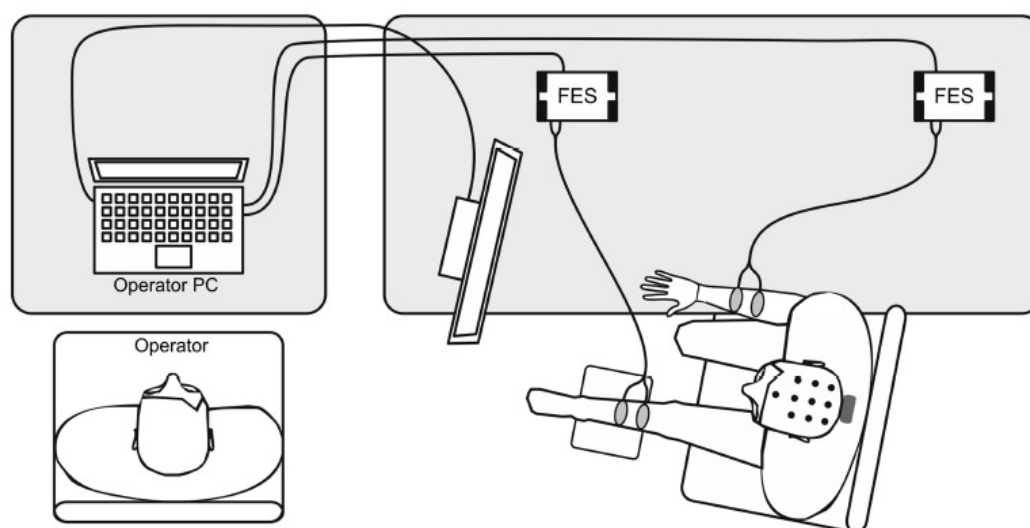


Рис. 1. Схема системы интерфейса мозг-компьютер, используемой для лечения конечностей, включая оператора и пациента, используемая в исследовании [2]

Fig. 1. Schematic diagram of the brain-computer interface system used for limb treatment, including operator and patient, used in the study [2]

Во время терапии верхних конечностей пациенты сидели на стуле перед экраном компьютера, опираясь обеими предплечьями на стол, а пары поверхностных электродов ФЭС были прикреплены к разгибателям левого и правого запястья.

Другой метаанализ был проведен Ali и соавторами [3]. В это исследование было включено 17 работ, оценивающих эффективность реабилитации на основе ИМК в отношении восстановления двигательных функций верхних конечностей, измеренных с помощью шкалы оценки верхних конечностей FMA-UE. Метаанализ с использованием модели случайных эффектов показал объединенную среднюю разницу в 3,26 балла, что указывает на статистически значимое улучшение двигательной функции у пациентов, получающих вмешательства на основе ИМК, по сравнению с контрольной группой. Тест на общий эффект подтвердил надежность этого результата. Эти результаты показывают, что вмешательства с использованием ИМК приводят к клинически значимым улучшениям в восстановлении двигательных функций, с размерами эффекта, превышающими минимально клинически значимую разницу для FMA-UE в реабилитации после инсульта. В этом исследовании как рандомизированные контролируемые исследования, так и исследования осуществимости на отдельных субъектах внесли свой вклад в объединенную оценку, подчеркивая надежность систем ИМК в гетерогенных популяциях, включая ишемический инсульт, хронический гемипарез и травму спинного мозга.

Следующее рассматриваемое исследование – это работа ReHand-BCI [4]. Система ReHand-BCI состояла из этапов сбора данных, обработки дан-

ных, обратной связи и компьютерного монитора для предоставления инструкций пациенту. На этапе сбора данных 16 активных электродов, расположенных в позициях F3, FC3, C5, C3, C1, CP3, P3, FCz, Cz, F4, FC4, C6, C4, C2, CP4 и P4 системы 10–10, были закреплены на шапочке для записи ЭЭГ. Референтный электрод был размещен в правой мочке уха, а заземляющий электрод – в позиции AFz. Усилитель регистрировал ЭЭГ с частотой 256 Гц и 24-битным разрешением АЦП. Этап обработки данных работал в двух режимах: калибровочном (офлайн) и терапевтическом (онлайн). В режиме калибровки использовались предварительно записанные данные ЭЭГ с предыдущего сеанса терапии, за исключением первого сеанса терапии, для которого использовалась запись базового уровня ЭЭГ.

Предварительно записанные данные ЭЭГ были отфильтрованы полосовым фильтром с помощью банка фильтров и режекторным фильтром на частоте 60 Гц с использованием КИХ-фильтров 30-го порядка. Затем были извлечены признаки логарифмической дисперсии с помощью алгоритма Common Spatial Patterns (CSP) с использованием 1-секундных окон из каждого канала. После этого соответствующие извлеченные признаки CSP были выбраны с помощью оптимизации роя частиц (PSO) и использованы для обучения классификатора линейного дискриминантного анализа (LDA). С помощью выбранных для каждого пациента частотных диапазонов, вычисленных пространственных фильтров и коэффициентов LDA, полученных в режиме калибровки, режим терапии мог классифицировать 1-секундные окна, полученные в режиме онлайн, как двигательную активность руки либо период покоя с открытыми глазами (покой).

Этап обработки был реализован на рабочей станции Precision 5820 через графический пользовательский интерфейс, запрограммированный на MATLAB. Этап обратной связи включал в себя роботизированный ортез для руки, подключенный через Bluetooth к этапу обработки, который обеспечивал пассивное сгибание или разгибание пальцев парализованной руки пациентов. Ортез активировался двигательной активностью руки пациентов в экспериментальной группе и случайным образом активировался для пациентов в контрольной группе. Предварительная версия ReHand-BCI была оценена в пилотном исследовании с участием пациентов, перенесших инсульт, а этап обратной связи системы был протестирован на здоровой популяции перед использованием в исследовании.

Каждый пациент прошел 30 запланированных сеансов терапии с использованием ИМК или плацебо-ИМК в зависимости от назначенной группы. Пять сеансов проводились в неделю в течение 6 недель. В каждом сеансе терапии пациенты выполняли 80 попыток, разделенных на 4 серии по 20 попыток в каждой. Пациентам разрешалось отдыхать не менее 1 минуты между сериями. Сеансы терапии с использованием ИМК и плацебо-ИМК проводились в одной и той же звукоизолированной комнате и одной и той же группой исследователей для каждого пациента. Во время терапии пациенты сидели в удобном кресле. Система ReHand-BCI была настроена таким образом, что роботизированный ортез был закреплен на парализованной руке пациента, а шапочка для ЭЭГ была надета на голову пациента. Компьютерный монитор ReHand-BCI располагался перед пациентами на расстоянии примерно 1,5 м, а бейсбольный мяч находился под парализованной

рукой пациента, закрепленный на одном из подлокотников кресла. На каждом сеансе пациентам предлагалось выполнить ряд заданий, составляющих пробный этап, в соответствии с визуальными и звуковыми подсказками, отображаемыми на мониторе. Сначала на мониторе появлялся белый крест, который отображался в течение 4 секунд; в это время пациентам было предписано наблюдать за белым крестом, не выполняя никакой другой физической или умственной деятельности, включая период отдыха. Через три секунды после начала проб из динамиков монитора раздавался звуковой сигнал, предупреждающий пациента о предстоящем задании на МИ. Через четыре секунды после начала пробы на мониторе появлялась белая стрелка, указывающая на парализованную руку пациента, что означало начало МИ парализованной руки. Стрелка отображалась на мониторе в течение 1,5 секунды, а затем исчезала, оставляя черный экран еще на 3,5 секунды.

Пациентам было предложено попытаться удерживать бейсбольный мяч под парализованной рукой в течение 1,5 секунды появления стрелки и 3,5 секунды черного экрана, что соответствовало периоду минимального индуцированного движения (МИ). В экспериментальной группе в течение периода МИ ортез обеспечивал пассивное сгибание пальцев на 25% от их максимального смещения (приблизительно 1,38 см) всякий раз, когда система классифицировала как МИ в одном из четырех 1-секундных окон, составляющих первые 4 секунды периода МИ. Таким образом, за одно испытание можно было вызвать максимум четыре сгибания. В контрольной группе движение ортеза не зависело от распознавания системой МИ руки и обеспечивалось случайным образом в соответствии со случайным распределе-

нием, которое варьировалось от 55 до 85% вероятности активации ортеза в период МИ, причем эта вероятность менялась в каждом сеансе. Эта вероятность была рассчитана на основе диапазона наблюдаемых показателей работы ИМК, достигнутых в ходе предварительного исследования у участников, перенесших инсульт. После периода МИ монитор становился серым, и если участник выполнял сгибание пальцев в течение этого периода, ортез выполнял движение разгибания пальцев, при этом пациентам предлагалось попытаться открыть и расслабить парализованные руки. Этот

период длился с 9-й по 14-ю секунду испытания. Наконец, через 14 секунд после начала испытания монитор становился синим, и пациентам разрешалось двигаться, моргать и расслабляться [5]. Синий экран на мониторе случайным образом появлялся на 4-6 секунде, чтобы предотвратить привыкание. В конце каждого сеанса пациенту показывалось лицо разных цветов и с улыбающимися выражениями, указывающее на степень успеха в управлении ортезом во время сеанса [6]. На рисунке 2 показана временная структура испытаний, полученных в ходе терапии.

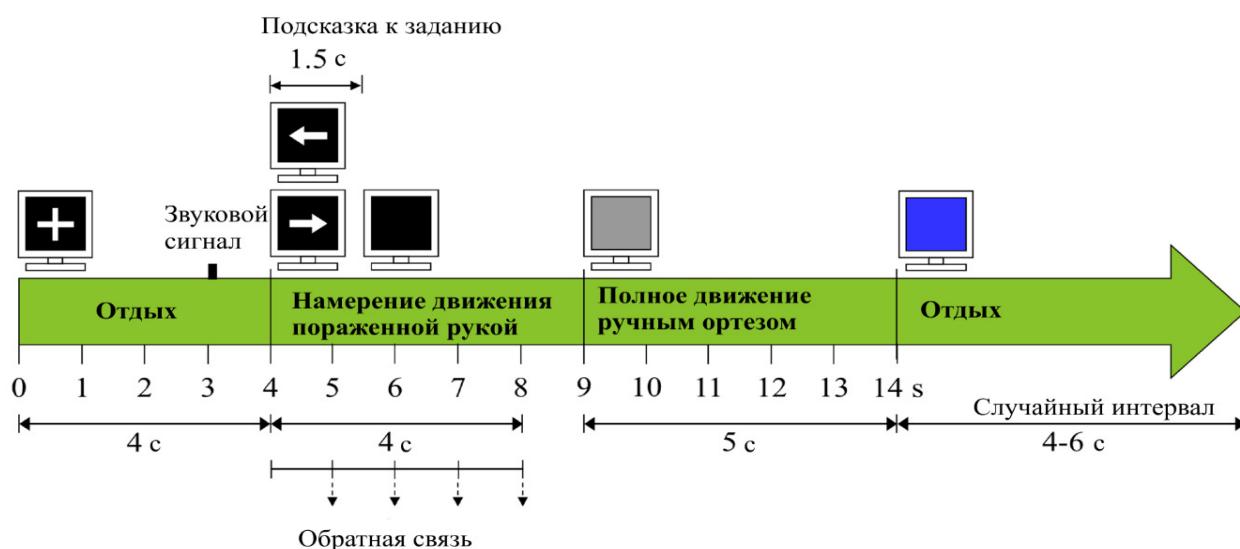


Рис. 2. Структура исследования для вмешательства с использованием ИМК и плацебо-ИМК в исследовании [6]

Fig. 2. Study design for the BCI and placebo-BCI intervention in the study [6]

В итоге экспериментальная группа (ИМК + роботизированный ортез) показала статистически значимое улучшение по шкале ARAT (медиана с 8,5 до 20 баллов), в то время как в контрольной группе (имитация ИМК) достоверных изменений по данной шкале не наблюдалось.

Учитывая вышесказанное, необходим критерий, обеспечивающий оценку нейромышечной связи. В качестве такого критерия используем показатель

биотехнического резонанса (БТР), который показывает, как изменяется нейромышечная связь в результате эндогенных и экзогенных воздействий на пациента, осуществляемых во время сеанса реабилитации. Основная задача БТР – обеспечить объективный критерий повышения качества нейромышечной связи. В качестве такого критерия будем использовать два показателя: прямой и косвенный показатели БТР. Для их обоснования рассмотрим меха-

низм использования VR в ходе реабилитационной процедуры.

Рассмотрим схему процесса реабилитации (рис. 3). Вначале определяем базовый уровень пациента. Пациент прикладывает максимальное усилие к динамометру, при этом фиксируется пиковое показание динамометра и од-

новременно записываются ЭЭГ и ЭМГ. По результатам показаний, полученных в этом режиме, составляется план процедуры реабилитации, которая состоит из выполнения движений, выводимых на терминал VR в виде клипов, и периода отдыха, который также представлен в сцене VR.



Рис. 3. Схема процедуры реабилитации

Fig. 3. Rehabilitation procedure diagram

По анализу показаний в базовом уровне задается цель. Цель – это показания динамометра в конце процедуры. В начале процедуры считается начальное показание динамометра, по показанию электромиограммы оценивается тонус мышц-сгибателей, задаются показания динамометра в конце процедуры или на определенном этапе, а также соответствующий темп сжимания кисти с соответствующими периодами отдыха. Цель высвечивается на терминале VR. На терминале VR также высвечивается текущее достижение пациента. Причем это достижение может не соответствовать действительности. Снижение или повышение текущего результата по сравнению с реальным можно использовать в качестве дополнительного стимула достижения цели.

Таким образом, косвенным критерием БТР является увеличение показаний динамометра по сравнению с исходными показаниями, а также стабилизация результата при снижении асси-

стирующего момента на серводвигателях экзоскелета. Прямой критерий БТР в данной работе не рассматривается.

Материалы и методы

В процессе исследования создан прототип БТС со стимулами, возбуждаемыми посредством программируемой VR¹. Структурная схема БТС представлена ниже (рис. 4). Стимулирующая VR

¹ Патент 2766764 Российская Федерация, МПК А 61 В 5/313 (2021.01), А 61 В 5/389 (2021.01), А 61 F 4/00 (2006.01). Способ оценки мышечной усталости на основе контроля паттернов синергии и устройство для его осуществления / Филист С. А., Трифонов А. А., Кузьмин А. А., Сафронов Р. И. Петрунина Е. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2021105609; заявл. 04.03.21; опубл. 15.03.22, Бюл. № 8. 17 с. : ил.

возбуждает моторные нейроны, которые, в свою очередь, стимулируют потенциалы двигательных единиц (ДЕ) мышц, адаптируемых к данной VR [7]. В структуре БТС выделим блок формирования VR, каналы формирования ЭЭГ, ЭМГ и динамометра, которые дешифрируются в блоке управления (контроллере)¹.

При обеспечении БТР в процессе реабилитации ДФ верхних конечностей полагаем, что имеем возможность контролировать ЭЭГ, ЭМГ и показания динамометра. Для оценки косвенного критерия БТР будем использовать соотношение между показателем усталости мышц-сгибателей и достижения цели, т. е. показаний динамометра, выводимых на терминал VR в качестве цели. Полагаем, что процесс реабилитации реализуется в виде пачей (см. рис. 3). Для определения мышечной усталости (МУ) используют ЭМС. Дискретизированный ЭМС сегментируют на основе пороговой обработки и формируют временную последовательность сегментов ЭМС².

¹ Патент 2830938 Российская Федерация, МПК G 16 H 20/00 (2018.01), A 61 B 5/05 (2006.01), G 06 T 15/00 (2011.01). Способ реабилитации пациентов с нарушением двигательной активности с использованием персонализированного контента клипов виртуальной реальности / Филист С. А., Пшеничный А. Е., Шаталова О. В., Сафронов Р. И., Петрунина Е. В., Ермаков Д. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет». № 2024105789; заявл. 06.03.24; опубл. 26.11.14, Бюл. № 33. 14 с.: ил.

² Патент 2766764 Российская Федерация, МПК A 61 B 5/313 (2021.01), A 61 B 5/389 (2021.01), A 61 F 4/00 (2006.01). Способ оценки мышечной усталости на основе контроля

Так как у постинсультных больных ЭМС достаточно мал, то вместо него используем сигнал RMS , определяемый по формуле

$$RMS_m = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=m-n}^m \text{ЭМС}_k^2}, \quad (1)$$

где n – число дискретных отсчетов ЭМС_k , которые накапливаются в памяти персонального компьютера до текущего отсчета m .

В процессе мониторинга МУ последовательно, в порядке поступления, определяют вейвлет-преобразование каждого сегмента для последующего исследования их энергетической эволюции и построения дескрипторов для классификатора МУ [8]. На основе ее анализа формируют два вектора дескрипторов³, первый из которых определяется путем вычисления общей энтропии вейвлетов в строках (масштабах) вейвлет-плоскости, а второй определяется путем вычисления общей энтропии вейвлетов в столбцах вейвлет-плоскости, при этом во вто-

паттернов синергии и устройство для его осуществления / Филист С. А., Трифонов А. А., Кузьмин А. А., Сафронов Р. И., Петрунина Е. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2021105609; заявл. 04.03.21; опубл. 15.03.22, Бюл. № 8. 17 с.: ил.

³ Патент 2839398 Российская Федерация, МПК A 61 B 5/00 (2006.01). Способ классификации мышечной усталости на основе анализа вейвлет-преобразования сегментов двигательной активности электромиосигнала / Филист С. А., Пшеничный А. Е., Петрунина Е. В., Кузьмин А. А., Ермаков Д. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2024131858; заявл. 23.10.24; опубл. 30.04.25, Бюл. № 13. 27 с.: ил.

рой вектор дескрипторов включают только компоненты, которые превышают пороговое значение. Пороговое значение установлено таким образом, что-

бы оно принимало максимальное значение порога, не приводящее к пропуску индексов внутри оставшейся последовательности компонентов вектора [8].

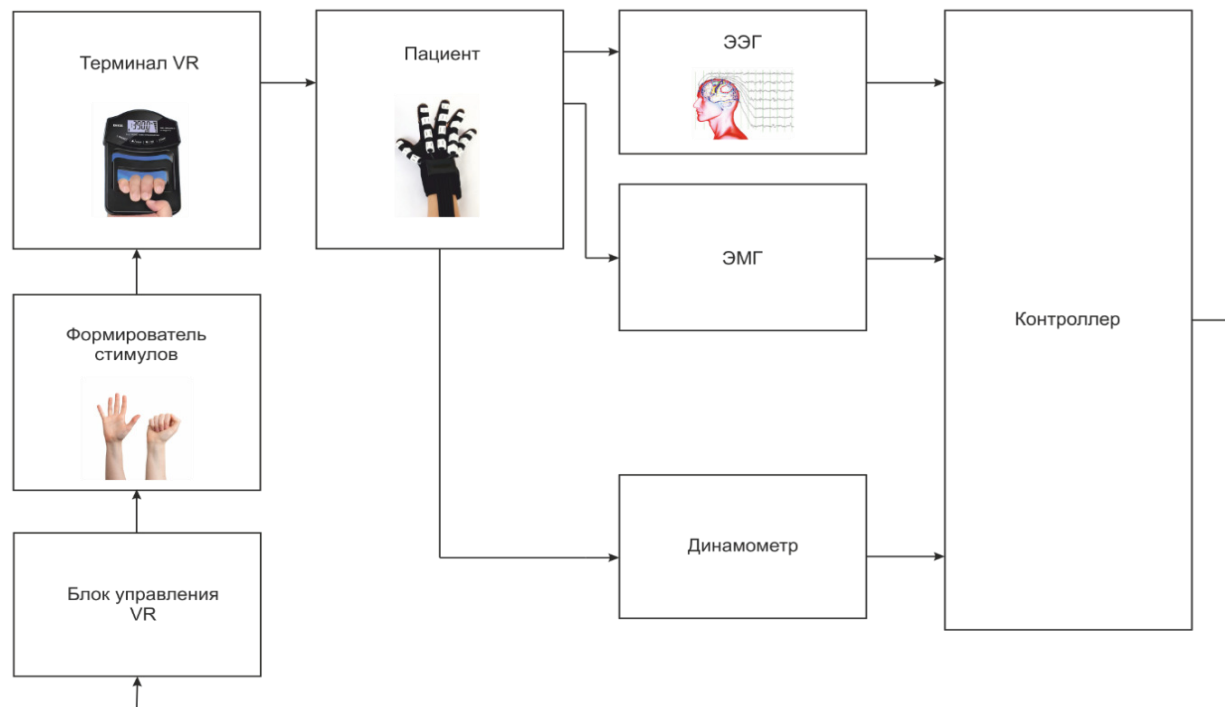


Рис. 4. Структурная схема прототипа биотехнической системы

Fig. 4. Structural diagram of the prototype biotechnical system

Для определения косвенного критерия синхронизации построим кластерное пространство в координатах показаний динамометра F и МУ. МУ измеряется в процентах, т. е. её шкалу можно привести к диапазону $(0, 1)$. Шкалу динамометра можем также привести к диапазону $(0, 1)$, нормируя его показания на целевое показание $F_{ц}$. В таком случае получаем двумерное кластерное пространство в квадранте с координатами диагонали $(0,0); (1,1)$ (рис. 5).

Учитывая, что координаты цели при реабилитации пациента должны стремиться от точки $(1,0)$ к точке $(0,1)$, эффективность реабилитации в контрольной точке (КТ) можно оценить по изменению текущего состояния пациен-

та до точек с координатами $(0,1)$ и с координатами $(1,0)$. Таким образом, условие биотехнического резонанса, согласно косвенному критерию, примет вид

$$K_K = \sum_{k=1}^K \text{sign}(K_k) > 0, \quad (2)$$

где K – число КТ в паче.

$$K_k = \sqrt{(1 - y_{2k})^2 + y_{1k}^2} - \sqrt{(y_{2k}^2 + (1 - y_{1k})^2)}. \quad (3)$$

Если не взвешивать параметры y_1 и y_2 , то эффективность реабилитации оценивают по координате пациента в пространстве этих признаков. На рисунке 5 в качестве примера представлены образы функционального состояния (ФС) одного и того же пациента в этом кластерном пространстве в КТ $k-1$ и k .

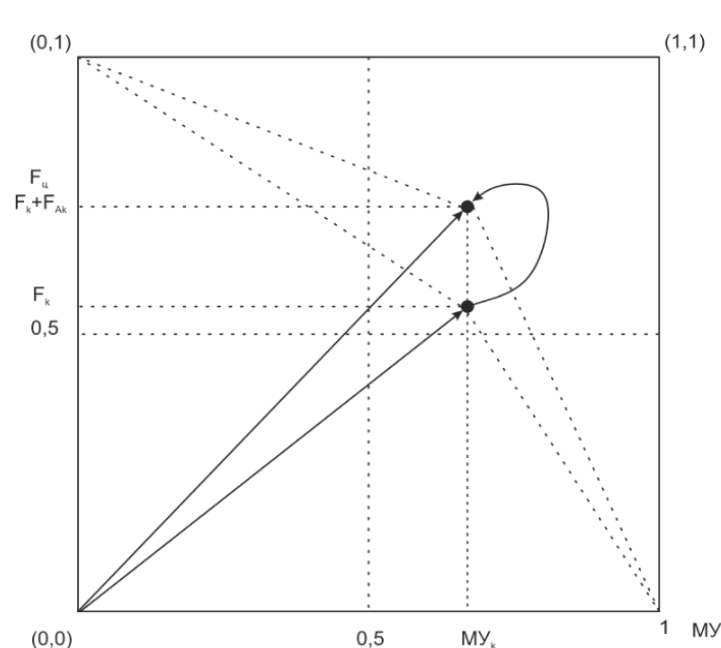


Рис. 5. Двумерное кластерное пространство для оценки динамики реабилитации пациента по косвенному критерию биотехнического резонанса

Fig. 5. Two-dimensional cluster space for assessing the dynamics of patient rehabilitation using the indirect criterion of biotechnical resonance

Многократное определение расстояния диагностируемой точки от точек, соответствующих центрам кластеров, используем для оценки эффективности проводимой реабилитации. Движение точки в сторону точки (0,1) говорит об эффективности реабилитации, и наоборот. Различным глобальным параметрам реабилитации будут соответствовать и различные скорости движения точки к цели. Задавшись КТ, вычисляем «траекторию» ФС пациента в кластерном пространстве по отношению к процессу восстановления двигательных функций паретичных конечностей [9]. Из (2) следует, что для поддержки БТР согласно косвенному критерию необходимо удерживать текущую координату КТ выше диагонали с координатами (0,0); (1,1). Так как в течение процедуры реабилитации МУ растет, сила сжатия пружины динамометра снижается, т. е. точка (y_1, y_2) движется в сторону кластера (1,0), необходимы средства для воз-

вращение её в область БТР. В БТС имеется две такие возможности. Первая возможность – включение ассистирующей поддержки от экзоскелета при его наличии. Эта поддержка приведет не только к изменению ординаты КТ, но и уменьшит её абсциссу. Вторая возможность поддержки БТР заключается в изменении глобальных параметров VR.

Рассмотрим схему алгоритма, обеспечивающего БТР на основе косвенного критерия (рис. 6).

Для запуска процесса реабилитации необходимо задать глобальные параметры, к которым отнесем целевой показатель силы сжатия кисти $F_{ц}$, число КТ в паче K (блок 1) и число пачей N в процедуре реабилитации. В блоке 2 устанавливается счётчик пачей. В блоке 3 задаются глобальные параметры VR. Часть этих параметров относятся к формирователю стимулов: время сжатия кулака T_1 , время релаксации T_2 , число тестовых движений K в паче.

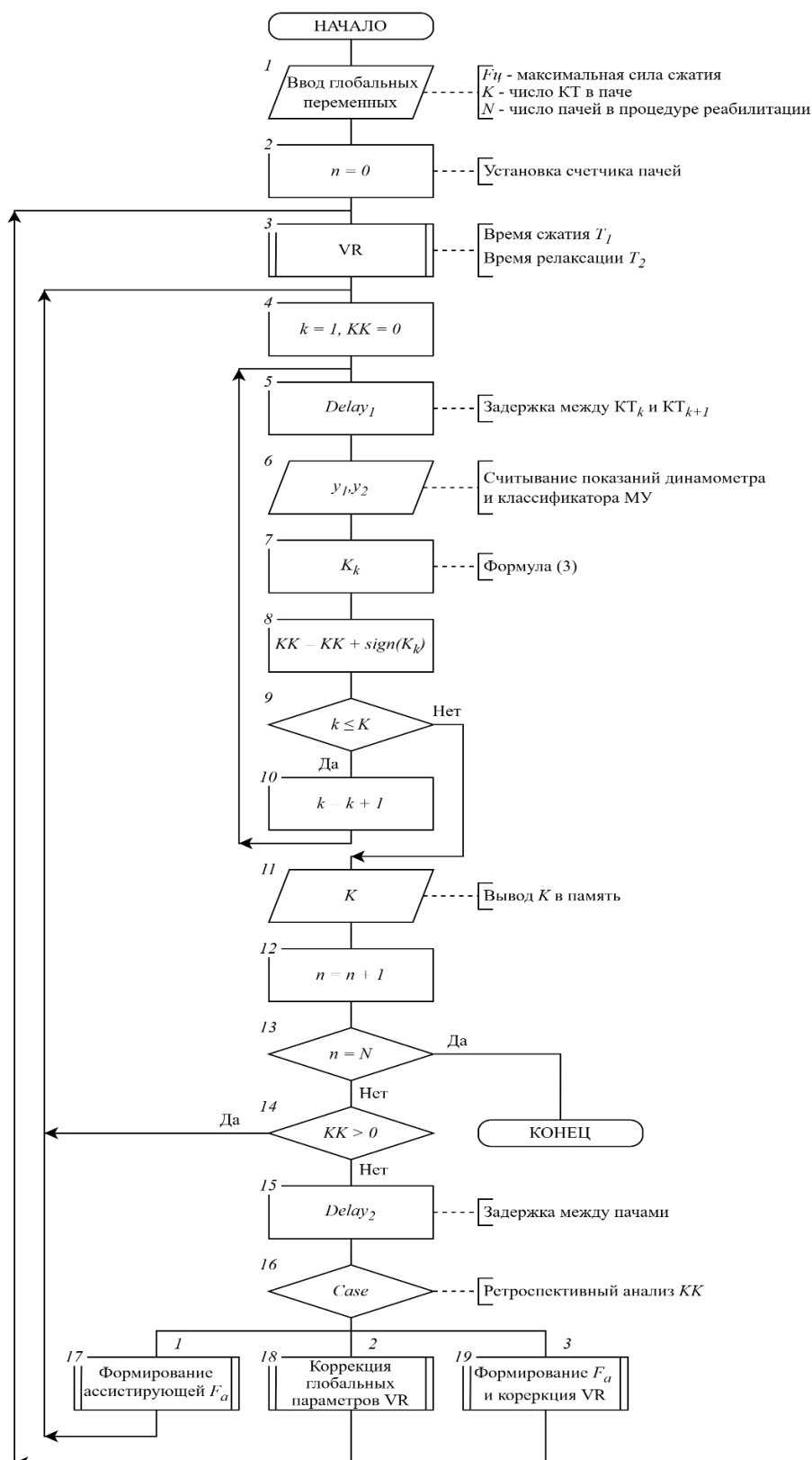


Рис. 6. Схема алгоритма управления реабилитацией посредством косвенного критерия биотехнического резонанса

Fig. 6. Diagram of the algorithm for managing rehabilitation using an indirect criterion of biotechnical resonance

Цикл, организованный посредством блоков 4–10, осуществляет вычисление косвенного критерия БТР согласно (2). В блоке 4 задаются исходные параметры цикла, в блоке 5 реализуется задержка между снятиями показателей в двух смежных КТ. В блоке 7 снимаются показания ЭМГ, по которым вычисляется МУ (y_1) и y_2 – показания динамометра, и вычисляется показатель [формула (3)], указывающий, лежит ли текущая координата КТ выше или ниже диагонали, разделяющей кластеры ФС. В блоке 8 вычисляется косвенный критерий БТР в КТ. В блоке 9 проверяется условие прохода всех КТ в паче.

В блоке 10 осуществляем переход на следующую КТ. По завершении цикла значение косвенного критерия БТР в паче заносится в память компьютера в блоке 11. В блоке 12 инкриминируется счетчик пачей. В блоке 13 проверяется условие завершения сеанса реабилитации. Если сеанс реабилитации не завершён, т. е. остались еще пачи, то в блоке 14 проверяется условие БТР по косвенному критерию в случае, если все КТ были пройдены (проверка в блоке 9).

Если условие БТР не выполнено, то осуществляется переход на блок 15, в котором имеются три варианта достижения БТР, в зависимости от того, какова была попытка его достичь в предшествующем паче. Если в предшествующем паче условие БТР было выполнено, то для достижения БТР в блоке 17 формируется ассистирующая поддержка посредством серводвигателей экзоскелета и осуществляется переход к следующему пачу. Ассистирующая поддержка F_A в k -й КТ вычисляется как

$$F_{Ak} = (MU_k - F_k) \cdot \varepsilon, \quad (4)$$

где $\varepsilon = 1 \dots 1,2$ – эмпирический коэффициент, предусматривающий учет снижения величины косвенного критерия БТР в следующем паче.

Если в предшествующей КТ ассистирующий фактор был уже использован, то переход осуществляется по ветви 2 на блок 18, который предусматривает коррекцию глобальных параметров VR, выражающихся в снижении частоты кадров клипа, иллюстрирующего процесс сжатия кисти. Если в предшествующей КТ параметры VR уже корректировались, то блок 15 осуществляет переход на блок 19, в котором предусмотрено как увеличение ассистирующей силы, так и снижение частоты кадров VR.

Результаты и их обсуждение

Объектом данного исследования стала экспериментальная группа в составе 42 пациентов с парезом верхней конечности и давностью заболевания от 3-х недель до 6 месяцев. Предмет исследования – двигательная функция верхней конечности пациентов, перенесших инсульт на фоне применения технологий VR с системой мониторинга косвенного критерия БТР.

Экспериментальные исследования проводились на базе клинического научно-медицинского центра «Авиценна» г. Курска с использованием роботизированной перчатки «Аника» и программного обеспечения, устанавливаемого на персональный компьютер. На рисунке 7 приведена фотография пациента в процессе реабилитации на этом роботизированном комплексе с прикрепленным к паретичной конечности роботизированным устройством.

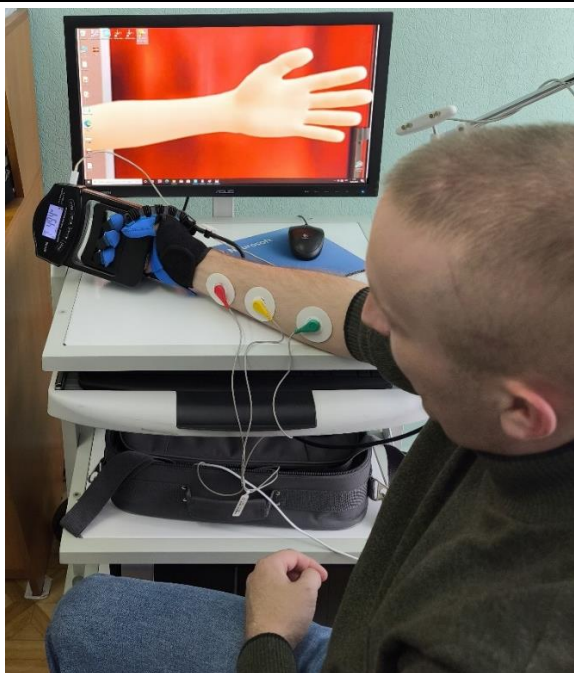


Рис. 7. Реабилитационный комплекс с мониторингом косвенного критерия биотехнического резонанса

Fig. 7. Rehabilitation complex with monitoring of indirect criterion of biotechnical resonance

Критерии включения в экспериментальную группу:

- парез верхней конечности (лёгкой и средней степени) после ишемического или геморрагического инсульта;
- давность до 6 месяцев на момент включения;
- возраст 25–75 лет.

Критерии не включения:

- эпилепсия;
- эндогенные психические расстройства;
- декомпенсированные хронические заболевания;
- выраженное снижение слуха и зрения.

Критерии исключения:

- наличие выраженных двигательных, чувствительных и нейропсихологических (памяти, внимания, регуляции произвольной деятельности, апраксии, планирования, зрительного восприятия,

сенсорная афазия) нарушений, препятствующих взаимодействию с системой VR [10].

Критерии выбывания:

- повторный инсульт;
- обострение хронических заболеваний;
- инфекционные осложнения [10].

Из экспериментальной группы были выделены основная группа и группа сравнения (контрольная группа). Обе группы подбирались одинаковыми по демографическим показателям и по функциональному состоянию паретичных конечностей. В основной группе пациенты вводились в БТР посредством VR БТОС. У пациентов основной группы к паретичной руке прикреплялось роботизированная перчатка комплекса «Аника», а сила сжатия кулака контролировалась динамометром, подключённым к персональному компьютеру. Участникам было поручено двигать паретичной рукой в соответствии с целью, визуальной представленной на экране перед ними. Если пациент не мог выполнять движения сам, робот оказывал помощь и активно направлял руку пациента к цели. В контрольной группе пациенты получали занятия на роботизированном реабилитационном комплексе для функциональной терапии верхних конечностей «Аника» по стандартной программе реабилитации.

Программа реабилитации включала 12 сеансов в течение 4 недель. Всем пациентам в 1-е, 10-е, 20-е и 28-е сутки проводилась оценка ФС при помощи следующих шкал:

1. Оценка повседневной бытовой активности пациента проводилась по стобалльному индексу активности в повседневной жизни (индекс Бартеля) [11]. Модифицированный индекс Бар-

теля суммирует показатели по десяти областям повседневной деятельности (ADL) в баллы от 0 до 100, где более высокие баллы отражают большую независимость. К распространенным областям повседневной деятельности относятся: кормление, купание, уход за собой, одевание, контроль за кишечником (дефекация), контроль за мочевым пузырем (мочеиспускание), использование туалета, перемещение, мобильность, ходьба по лестнице. Опорные точки пунктов модифицированного индекса Бартеля описывают уровень необходимой помощи – от зависимо-го до независимого с использованием вспомогательных средств или без них, поэтому оценка отражает то, что человек фактически делает в повседневной жизни. Пороговые значения позволяют быстро оценить функциональную зависимость: 0–20 – полная зависимость; 21–60 – тяжелая зависимость; 61–90 – умеренная зависимость; 91–99 – легкая зависимость; 100 – независимость. Для более полной клинической картины следует сопоставить эти диапазоны с пояснительными записями о безопасности, поддержке со стороны лиц, осуществляющих уход, и потребностях в оборудовании.

2. Для оценки мышечной силы отдельных мышц и групп мышц использовалась шестibalльная шкала оценки мышечной силы – от 5 до 0. Баллом 5 оценивается отсутствие пареза, парез оценивается как легкий при соответствии силы 4 баллам, умеренный – 3 баллам, выраженный – 2 баллам, грубый – 1 баллу и при параличе – 0 баллов [12].

3. Для оценки двигательной функции руки использовался тест ARAT [13]. При этом использовалась только

его восемнадцатibalльная шкала «Шаровой захват», включающая шесть тестовых движений кистью, успешность выполнения каждого из которых оценивалось от нуля до трех баллов.

4. Для оценки функции пораженной руки использовали тест Френчай (MFT – Modified Frenchay Test) [14].

5. Для выявления и оценки спастичности использовалась модифицированная шкала Эшворта [13]. Максимальное количество баллов (4) соответствует значительному повышению мышечного тонуса. Отсутствие повышенного мышечного тонуса соответствует 0 баллов. Методика проведения оценки состоит в выполнении максимально возможного разгибания всех пальцев одновременно из позиции максимально возможного сгибания.

6. Оценка сенсомоторной функции по шкале Фугл-Майера для оценки верхней конечности (FMA-UE) [10].

Участникам эксперимента в основной группе было поручено сжимать динамометр паретичной рукой в соответствии с целью, визуально представленной на экране перед ними. Робототехническое устройство вмешивается в стимулированное движение пациента только тогда, когда пациент не может завершить желаемое движение [15]. Пациент инициирует движение самостоятельно, однако возможны неконтролируемые движения.

Если пациент не мог выполнять движения сам, экзоскелет оказывал помощь и активно сжимал кисть руку пациента, помогая ему достичь целевых показателей [16]. Чтобы обеспечить эффективность реабилитационных процедур, запуск пластических механизмов мозга [17] по перестройке сенсомоторной системы должен совершаться только в моменты, когда мозг наиболее восприимчив

к принятию периферийных сигналов, производимых движениями экзоскелета. Увеличение амплитуды RMS ЭМГ является запускающим сигналом для экзоскелета. Однако этот сигнал не может ис-

пользоваться у полностью парализованных больных [15].

Рассмотрим показатели клинической оценки в группах до и после реабилитации (табл. 1).

Таблица 1. Динамика показателей функционального состояния пациента и функции верхней конечности в основной и контрольной группах в различные сроки реабилитации

Table 1. Dynamics of the patient's functional state indicators and upper limb function in the main and control groups at different stages of rehabilitation

Шкала	1-е сутки		28-е сутки	
	основная группа	группа сравнения	основная группа	группа сравнения
Оценка уровня бытовой активности по индексу Бартеля	73,50 ± 33,88	74,36 ± 4,82	85,11 ± 14,47	81,20 ± 5,12
Модифицированный Френчай тест (MFT)	2,58 ± 0,07	2,47 ± 0,11	3,81 ± 0,12	3,14 ± 0,11
Шестибалльная шкала оценки мышечной силы	3,41 ± 0,32	3,53 ± 0,24	4,32 ± 2,39	4,53 ± 1,20
Тест для оценки двигательной функции руки (ARAT)	18,28 ± 2,18	19,30 ± 4,82	26,80 ± 2,20	23,90 ± 3,24
Шкала Fugl-Meyer (FMA)	52,20 ± 5,26	54,10 ± 6,49	62,84 ± 3,80	58,62 ± 5,70
Модифицированная шкала Эшворта (MAS)	1,50 ± 0,14	1,52 ± 0,09	1,05 ± 0,13	1,26 ± 0,16

Сравнительная оценка эффективности реабилитации на различных шкалах, полученная на основе таблицы 1 в ос-

новной и контрольной группах, приведена ниже (табл. 2).

Таблица 2. Сравнительная оценка эффективности реабилитации на различных шкалах в основной и контрольной группах

Table 2. Comparative assessment of the effectiveness of rehabilitation on various scales in the main and control groups

Шкалы	МΔ		МΔ%	
	основная группа	группа сравнения	основная группа	группа сравнения
Оценка уровня бытовой активности по индексу Бартеля	11,60	6,84	15,8	9,1
Модифицированный Френчай тест (MFT)	1,23	0,67	47,6	27,3
Шестибалльная шкала оценки мышечной силы	0,91	0,50	26,6	14,2
Тест для оценки двигательной функции руки (ARAT)	8,52	4,60	46,6	23,8
Шкала Fugl-Meyer (FMA)	10,64	4,52	20,3	8,3
Модифицированная шкала Эшворта (MAS)	– 0,45	-0,26	30,0	17,1

У группы с мониторингом косвенного показателя БТР было большее улучшение по всем шкалам, по сравнению с группой, которая получила реабилитацию с роботизированным устройством без использования управления посредством мониторинга БТР. Так, двигательные навыки при проведении модифицированного Френчай-теста достоверно значимо ($p < 0,05$) улучшились только у пациентов основной группы. Тест для оценки двигательной функции руки ARAT и шкала Fugl-Meyer также показали преимущество реабилитации в условиях мониторинга БТР.

Выводы

1. Введено понятие биотехнического резонанса, позволяющее оценить способность мозга человека управлять телом (группой мышц), а также способностью мышц выполнять команды мозга и сообщать о качестве их выполнения.

2. Разработан алгоритм управления процедурой реабилитации верхних конечностей, отличающийся мониторингом косвенного критерия биотехнического резонанса, основанного на анализе расстояний в кластерном простран-

стве, построенном в координатах показаний динамометра F и мышечной усталости, и позволяющий управлять глобальными параметрами процедуры реабилитации с дискретностью равной одному пачу.

3. Проведены экспериментальные исследования биотехнической системы при мониторинге косвенного критерия биотехнического резонанса, которые показали, что полученные при мониторинге биотехнического резонансы результаты превосходят результаты реабилитации известным методом: на шкале MBI – на 6%, на шкале MFT – на 20%, на шкале мышечной силы – на 13%, на шкале ARAT – на 23%, на шкале FMA – на 12% и на шкале Эшворта – на 13%.

Полученные в результате исследования данные позволяют сделать заключение, что использование при реабилитации верхних конечностей мониторинга и управления биотехническим резонансом позволяет повысить эффективность использования персонифицированной биотехнической системы для восстановления двигательных функций верхних конечностей у пациентов, перенесших ишемический инсульт.

Список литературы

1. Chen H., Yun G. Efficacy of Brain-Computer Interface Therapy for Upper Limb Rehabilitation in Chronic Stroke: Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials // J. Med. Internet. Res. 2026. Vol. 28. P. e79132. <https://doi.org/10.2196/79132>.
2. Upper extremity training followed by lower extremity training with a brain-computer interface rehabilitation system / S. Sieghartsleitner, M. Sebastián-Romagosa, W. Cho, J. Grünwald, R. Ortner, J. Scharinger, K. Kamada, C. Guger // Front. Neurosci. 2024. Vol. 18. P. 1346607. <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1346607>.

3. Brain-Computer Interfaces in the Rehabilitation of Stroke and Spinal Cord Injury: A Systematic Review and Meta-Analysis of Clinical Efficacy / U. Ali, J. Khan, M. Ahsan [et al.] // *Cureus*. 2025. Vol. 17, N. 10. P. e94833. <https://doi.org/10.7759/cureus.94833>.

4. Advantages of Virtual Reality in the Rehabilitation of Balance and Gait: Systematic Review / P. D. Cano, P. Siemonsma, R. Inzelberg, G. Zeilig, M. Plotnik // *Neurology*. 2018. Vol. 90, N. 22. P. 1017-1025. <https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000005603>.

5. Воображение движения и его практическое применение / О. А. Мокиенко, Л. А. Черникова, А. А. Фролов, П. Д. Бобров // *Журнал высшей нервной деятельности имени И. П. Павлова*. 2013. Т. 63, № 2. С. 195–204. <https://doi.org/10.7868/S0044467713020056>.

6. The ReHand-BCI trial: a randomized controlled trial of a brain-computer interface for upper extremity stroke neurorehabilitation / J. Cantillo-Negrete, M. E. Rodríguez-García, P. Carrillo-Mora, O. Arias-Carrión, E. Ortega-Robles, M. A. Galicia-Alvarado, R. Valdés-Cristerna, A. G. Ramirez-Nava, C. Hernandez-Arenas, J. Quinzaños-Fresnedo, M. D. R. Pacheco-Gallegos, N. Marín-Arriaga, R. I. Carino-Escobar // *Front Neurosci*. 2025. Vol. 19. P. 1579988. <https://doi.org/10.3389/fnins.2025.1579988>.

7. Петрунина Е. В., Томакова Р. А., Филист С. А. Гибридные методы и модели для биотехнических систем с адаптивным управлением диагностическими и реабилитационными процессами: монография. Курск: Университетская книга, 2022. 249 с.

8. Гибридный метод контроля мышечной усталости в робототехнической системе / А. А. Кузьмин, Р. А. Томакова, Е. В. Петрунина, Д. А. Ермаков, С. Кадырова // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2023. Т. 13, № 3. С. 64–81. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-64-81>.

9. Нейронечеткие сети для систем дистанционного мониторинга амбулаторных пациентов с заболеваниями органов дыхания / А. В. Бутусов, А. Х. Алавси Хайдер, Р. А. Карачевцев, А. Ю. Сухомлинов, С. А. Филист // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023. Т. 11, № 3. С. 1–16. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.016>.

10. Клиническая эффективность технологий виртуальной реальности в восстановлении функции верхней конечности после инсульта / Н. И. Слепнева, В. Д. Даминов, Э. В. Новак, О. Э. Карпов // *Вестник Национального медико-хирургического центра имени Н. И. Пирогова*. 2021. Т. 16, № 2. С. 80–85. https://doi.org/10.25881/20728255_2021_16_2_80.

11. Живолупов С. А., Самарцев И. Н., Сыроежкин Ф. А. Современная концепция нейропластичности (теоретические аспекты и практическая значимость) // *Журнал неврологии и психиатрии имени С. С. Корсакова*. 2013. Т. 113, № 10. С. 102–108.

12. Brain-Computer Interfaces in the Rehabilitation of Stroke and Spinal Cord Injury: A Systematic Review and Meta-Analysis of Clinical Efficacy / U. Ali, J. A. Khan, Md T. Ahsan, B. Altaf [et al.] // *Cureus*. 2025. Vol. 17, N 10. P. e94833. <https://doi.org/10.7759/cureus.94833>.

13. Yozbatiran N., Der-Yeghiaian L., Cramer S. C. A Standardized Approach to Performing the Action Research Arm Test // *Neurorehabil. Neural Repair*. 2008. Vol. 22, N 1. P. 78–90. <https://doi.org/10.1177/1545968307305353>.

14. Association between lesion location and sensorimotor rhythms in stroke – a systematic review with narrative synthesis / I. Kancheva, S. M. A. van der Salm, N. F. Ramsey, M. J. Vansteensel // *Neurological Sciences*. 2023. Vol. 44. P. 4263–4289. <https://doi.org/10.1007/s10072-023-06982-8>.

15. Роботизированные устройства в реабилитации после инсульта / А. А. Фролов, И. Б. Козловская, Е. В. Бирюкова, П. Д. Бобров // *Журнал высшей нервной деятельности имени И. П. Павлова*. 2017. Т. 67, № 4. С. 394–413. <https://doi.org/10.7868/S004446771704-0017>.

16. Предварительные результаты контролируемого исследования эффективности технологии ИМК-экзоскелет при постинсультном парезе руки / А. А. Фролов, О. А. Мокиенко, Р. Х. Люкманов, Л. А. Черникова, С. В. Котов [и др.] // *Вестник Российского государственного медицинского университета*. 2016. № 2. С. 17–25.

17. Изменения гемодинамической активности мозга при воображении движений в результате тренировки испытуемых на управление интерфейсом мозг – компьютер / А. А. Фролов, Д. Гусек, А. В. Сильченко, Я. Тинтера, Я. Рыдло // *Физиология человека*. 2016. Т. 42, № 1. С. 5–18. <https://doi.org/10.7868/S0131164616010082>.

References

1. Chen H., Yun G. Efficacy of Brain-Computer Interface Therapy for Upper Limb Rehabilitation in Chronic Stroke: Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *J. Med. Internet. Res.* 2026;28:e79132. <https://doi.org/10.2196/79132>.

2. Sieghartsleitner S., Sebastián-Romagosa M., Cho W., Grünwald J., Ortner R., Schäringer J., Kamada K., Guger C. Upper extremity training followed by lower extremity training with a brain-computer interface rehabilitation system. *Front. Neurosci.* 2024;18:1346607. <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1346607>.

3. Ali U., Khan J., Ahsan M., et al. Brain-Computer Interfaces in the Rehabilitation of Stroke and Spinal Cord Injury: A Systematic Review and Meta-Analysis of Clinical Efficacy. *Cureus*. 2025;17(10):e94833. <https://doi.org/10.7759/cureus.94833>.

4. Cano P.D., Siemonsma P., Inzelberg R., Zeilig G., Plotnik M. Advantages of Virtual Reality in the Rehabilitation of Balance and Gait: Systematic Review. *Neurology*. 2018;90(22):1017-1025. <https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000005603>.

5. Mokiyenko O.A., Chernikova L.A., Frolov A.A., Bobrov P.D. Imagination of movement and its practical application. *I.P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity*. 2013;63(2):195-204. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0044467713020056>.

6. Cantillo-Negrete J., Rodríguez-García M.E., Carrillo-Mora P., Arias-Carrión O., Ortega-Robles E., Galicia-Alvarado M.A., Valdés-Cristerna R., Ramirez-Nava A. G., Hernan-

dez-Arenas C., Quinzaños-Fresnedo J., Pacheco-Gallegos M.D.R., Marín-Arriaga N., Carino-Escobar R.I. The ReHand-BCI trial: a randomized controlled trial of a brain-computer interface for upper extremity stroke neurorehabilitation. *Front Neurosci.* 2025;19:1579988. <https://doi.org/10.3389/fnins.2025.1579988>.

7. Petrunina E.V., Tomakova R.A., Filist S.A. Hybrid methods and models for biotechnical systems with adaptive control of diagnostic and rehabilitation processes. Kursk: Universitetskaya kniga; 2022. 249 p. (In Russ.)

8. Kuzmin A.A., Tomakova R.A., Petrunina E.V., Ermakov D.A., Kadyrova S. Hybrid Method for Controlling Muscle Fatigue in the Robotic System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2023;13(3):64–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-64-81>.

9. Butusov A.V., Alawsi Hayder A.H., Karachevtsev R.A., Sukhomlinov A.Yu., Filist S.A. Neural Fuzzy Networks for Remote Monitoring Systems for Outpatients with Respiratory Diseases. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tehnologii = Modeling, Optimization and Information Technology.* 2023;11(3):1–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.016>.

10. Slepneva N.I., Daminov V.D., Novak Eh.V., Karpov O.E. The Clinical Efficacy of Virtual Reality Technologies in Restoring Functional Abilities of the Upper Limb after Stroke. *Vestnik Nacional'nogo mediko-hirurgicheskogo Centra imeni N.I. Pirogova = Bulletin of Pirogov National Medical & Surgical Center.* 2021;(16)2:80-85. (In Russ.) https://doi.org/10.25881/20728255_2021_16_2_80.

11. Zhivolupov S.A., Samartsev I.N., Syroezhkin F.A. Contemporary conception of neuroplasticity (theoretical aspects and practical significance). *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry.* 2013;113(10):102-108. (In Russ.)

12. Ali U., Khan J.A., Ahsan Md T., Altaf B., et al. Brain-Computer Interfaces in the Rehabilitation of Stroke and Spinal Cord Injury: A Systematic Review and Meta-Analysis of Clinical Efficacy. *Cureus.* 2025;17(10):e94833. <https://doi.org/10.7759/cureus.94833>.

13. Yozbatiran N., Der-Yeghiaian L., Cramer, S.C.A Standardized Approach to Performing the Action Research Arm Test. *Neurorehabil. Neural Repair.* 2008;22(1):78–90. <https://doi.org/10.1177/1545968307305353>.

14. Kancheva I., van der Salm S.M.A., Ramsey N.F., Vansteensel M.J. Association between lesion location and sensorimotor rhythms in stroke – a systematic review with narrative synthesis. *Neurological Sciences.* 2023;44:4263–4289. <https://doi.org/10.1007/s10072-023-06982-8>.

15. Frolov A.A., Kozlovskaja I.B., Biryukova E.V., Bobrov P.D. Robotic Devices in Poststroke Rehabilitation. *Zhurnal vysshej nervnoj deyatel'nosti imeni I.P. Pavlova =*

I.P. Pavlov *Journal of Higher Nervous Activity*. 2017;67(4):394-413. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S004446771704-0017>.

16. Frolov A.A., Mokienko O.A., Lyukmanov R.Kh., Chernikova L.A., Kotov S.V., et al. Preliminary Results of a Controlled Study of BCI-Exoskeleton Technology Efficacy in Patients with Poststroke Arm Paresis. *Vestnik rossiiskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Bulletin of the Russian State Medical University*. 2016;(2):17-25. (In Russ.).

17. Frolov A.A., Husek D., Silchenko A.V., Tintera Y., Rydlo J. The Changes in the Hemodynamic Activity of the Brain during Moroe Imagery Training with the Use of Brain – Computer Interface. *Fiziologiya Cheloveka = Human Physiology*. 2016;42(1):5-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0131164616010082>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Петрунина Елена Валерьевна, кандидат технических наук, доцент, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: petrunina@mggeu.ru, ORCID: 0000-0003-3661-0778

Elena V. Petrunina, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: petrunina@mggeu.ru, ORCID: 0000-0003-3661-0778

Ермаков Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dmitriyermakov98@yandex.ru, ORCID: 0009-0003-9426-7741

Dmitry A. Ermakov, Postgraduate at the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dmitriyermakov98@yandex.ru, ORCID: 0009-0003-9426-7741

Скворцов Михаил Константинович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: m.k.skvortsov@gmail.com, ORCID: 0009-0006-4962-1125

Mikhail K. Skvortsov, Postgraduate at the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: m.k.skvortsov@gmail.com, ORCID: 0009-0006-4962-1125

Дрейзин Валерий Элеazarович, доктор технических наук, профессор, ведущий инженер Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: drezin-ve@yandex.ru, Researcher ID: G-4715-2013, ORCID: 0000-0003-4818-565X

Valery E. Drejzin, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Leading Engineer of the Regional Nanotechnology Center, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: drezin-ve@yandex.ru, Researcher ID: G-4715-2013, ORCID: 0000-0003-4818-565X

Филист Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: SFilist@gmail.com, Researcher ID: O-4610-2015, ORCID: 0000-0003-1358-671X

Sergey A. Filist, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor at the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: SFilist@gmail.com, Researcher ID: O-4610-2015, ORCID: 0000-0003-1358-671X

Шаталова Ольга Владимировна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: shatolg@mail.ru, Researcher ID: C-3687-2015, ORCID: 0000-0002-0901-9272

Olga V. Shatalova, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor at the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: shatolg@mail.ru, Researcher ID: C-3687-2015, ORCID: 0000-0002-0901-9272