

13. Баенхаева, А. В. Моделирование валового регионального продукта Иркутской области на основе применения методики множественного оценивания регрессионных параметров / А. В. Баенхаева, М. П. Базилевский, С. И. Носков // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 10-1. – С. 9-14.
14. Носков С.И. Идентификация параметров кусочно-линейной функции риска// *Транспортная инфраструктура Сибирского региона*. – 2017. – Т. 1. – С. 417-421.
15. Ильина Н.К., Лебедева С.А., Носков С.И. Идентификация параметров некоторых негладких регрессий//*Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем*. – 2016. – № 17. – С. 111.
16. Носков С.И., Лоншаков Р.В. Идентификация параметров кусочно-линейной регрессии//*Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем*. – 2008. – № 6. – С. 63-64.
17. Носков С.И. Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных. – Иркутск: Облформпечать. – 1996. – 320 с.
18. Носков, С. И. Оценка параметров аппроксимирующей функции с постоянными пропорциями / С. И. Носков // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2013. – № 2(38). – С. 135-136.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613936 Российская Федерация. Программный комплекс построения кусочно-линейных регрессий с максимумом в правой части : № 2021613052 : заявл. 12.03.2021 : опубл. 16.03.2021 / С. И. Носков, А. А. Хоняков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения».
20. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/statistic>
21. Витрина статистических данных статистики [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://showdata.gks.ru/finder/>
22. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.fedstat.ru/>
23. Носков С.И. Применение функции риска для моделирования экономических систем / С.И. Носков, А.А. Хоняков // *Ужно-Сибирский научный вестник*. – 2020. – № 5. – С. 85-92.
24. Носков, С. И. Точечная характеристика множества Парето в линейной многокритериальной задаче / С. И. Носков // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2008. – № 1(17). – С. 99-101.
25. Носков, С. И. Регрессионная модель динамики эксплуатационных показателей функционирования железнодорожного транспорта / С. И. Носков, И. П. Врублевский // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2016. – № 2(50). – С. 192-197.

© С. И. Носков, А. А. Хоняков

Ссылка для цитирования:

Носков С. И., Хоняков А. А. Применение функции риска для модельного описания колебания цен на рынке недвижимости // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2021. № 3 (37). С. 77-82.*

УДК 612.821
DOI 10.52684/2312-3702-2021-37-3-82-88

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ

А. А. Трифонов¹, Е. В. Петрунина², Л. П. Лазурин³

¹ *Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия*

² *Московский государственный гуманитарно-экономический университет, г. Москва, Россия*

³ *Курский государственный медицинский университет, Курск, Россия*

Современные методы нейровизуализации играют важную роль для эффективного использования роботизированных устройств в нейрореабилитации и открывают путь для разработки новых решений, направленных на повышение терапевтической эффективности лечения. Эффективное использование реабилитационных роботов требует тщательно разработанного протокола реабилитации. Для достижения этой цели в последние десятилетия было проведено большое количество работ, направленных на исследования процессов обучения двигательным навыкам. Фундаментальным аспектом планирования роботизированной терапии, направленной на ускорение сенсомоторного восстановления, является четкое понимание того, как мозг управляет движениями, и какие механизмы применяются для обучения новым навыкам. В данной статье представлен анализ современных тенденций в области реабилитации постинсультных больных, рассмотрены методы и модели нейрореабилитации. Проведен анализ мультимодальных оценок механизмов реабилитации, дающих возможность оценить эффективность применения протокола роботизированной реабилитации на основе клинических шкал. Проведенный анализ показал, что современные тенденции развития технологии нейрореабилитации строятся с использованием последних достижений в области нейробиологии человека.

Ключевые слова: *методы нейрореабилитации, модели нейрореабилитации, методы нейровизуализации, интерфейс мозг-компьютер, экзоскелеты.*

CONTEMPORARY TENDENCES OF THE ROBOT-ASSISTED NEUROREHABILITATION

A. A. Trifonov¹, E. V. Petrunina², L. P. Lazurina³

¹ *South-West State University, Kursk, Russia*

² *Moscow State University for the Humanities and Economics, Moscow, Russia*

³ *Kursk State Medical University, Kursk, Russia*

State-of-the-art methods of neurovisualization are instrumental for the efficient application of robotic devices in neurorehabilitation. They pave the way for the development of further robotic solutions aiming to enhance the effectiveness of therapeutic treatments. A thoroughly developed rehabilitation training protocol is imperative for the effective application of robots in patient care. In recent decades, a tremendous number of studies have been conducted in order to achieve this objective. They were aimed at gaining a full understanding of motor learning processes. An insight into both the way the brain controls movements and the mechanisms

which are applied to learning new skills are considered to be fundamental aspects of rehabilitation therapy planning. This article examines current trends in the field of rehabilitation of post-stroke patients and highlights methods and models of neurorehabilitation based on noninvasive methods of neurovisualization. An exhaustive analysis of multimodal assessments of the rehabilitation mechanisms' efficiency was performed. It enabled the estimation of changes in brain activity before/after and during the application of the robot-assisted rehabilitation protocol based on clinical scales. According to the analysis performed, software-assisted exoskeletons are recognized as the most widespread technologies for rehabilitation of the lower extremities of post-stroke patients.

Keywords: *neurorehabilitation methods, robot-assisted neurorehabilitation, neurovisualization methods, computer-brain interface, exoskeletons.*

Введение

Роботизированные тренировки играют ключевую роль в нейрореабилитации. Действительно, можно запрограммировать устройства для реализации различных возможностей обучения на основе парадигм моторного обучения и управления мозгом. Кроме того, роботы способны не только обеспечивать воспроизводимые и точные движения (в зависимости от сил и моментов), но также могут точно считывать информацию о характеристиках движения.

Более того, очевиден факт, что поведенческий результат реабилитационного лечения не позволяет дать четкой картины сложного механизма нейропластических изменений, влияющих на выздоровление. Однако современные методы нейровизуализации играют важную роль для характеристики нейронных коррелятов. Последние исследования [1–4] подтверждают эффективность применения роботизированных устройств в сфере нейрореабилитации и открывают пути для разработки новых решений в данной области.

Эффективное использование реабилитационных роботов для ухода за пациентами требует тщательно проработанного протокола реабилитации. Для достижения этой цели в последние десятилетия было проведено большое количество работ, направленных на исследования процессов обучения двигательным навыкам.

Фундаментальным аспектом планирования роботизированной терапии, направленной на ускорение сенсомоторного восстановления, является изучение процесса управления движением, а также изучение механизмов формирования новых навыков. В данном контексте разработка наиболее подходящей и эффективной стратегии контроля играет решающую роль и может быть достигнута путем использования последних достижений в области нейробиологии человека.

Методы и модели нейрореабилитации

В результате проделанных исследований в области физиологии человека, биомеханики и управления были сформулированы теоретические основы формирования и генерации процесса движения. Первый нейробиологический результат использования сенсомоторной нейрореабилитации основывался на влиянии двигательной активности на когнитивный процесс моторного обучения. В то время, как изначально изменчивость рассматривалась как «шум», ко-

торый мозг должен был уменьшить в процессе обучения, последующие исследования подчеркнули ее значение в процессе формирования двигательных навыков. Другие исследования пытались пойти дальше, попытавшись ранжировать вариативность в зависимости от ее влияния на процесс выполнения задачи, и пришли к заключению, что различная степень вариативности по-разному влияет на процесс обучения, если применяется в различных пространствах динамического многообразия [5]. Все эти достижения предполагают, что разработка протоколов роботизированной реабилитации, которые вносят вариативность в задачу во время фазы обучения, может облегчить обучение и, следовательно, сенсомоторное восстановление.

Следующий нейробиологический результат, на который стоит обратить внимание, связан с наблюдением пациента за действием – виртуальной реальностью (VR). Было продемонстрировано, что визуальная обратная связь, полученная в процессе наблюдения за действием, выполняемым другим человеком, способствует улучшению моторного обучения. Маттар и Гриббл показали, что эффективность реабилитационных тренингов у пациентов, которые первоначально просмотрели видео с образцами движений значительно выше, чем у пациентов, которые не просматривали ни одного видео. В качестве возможного объяснения авторы предположили, что наблюдение за действиями может быть связано с приобретением нейронного представления динамики задачи, что также подтвердилось другими экспериментами. Таким образом, разумно полагать, что интеграция этапов наблюдения за действиями в программу роботизированной нейрореабилитации может привести к большему эффекту.

Основываясь на этих выводах, дальнейшим этапом развития, стало совместное наблюдение за действиями и пассивное проприоцептивное обучение, что послужило толчком для обсуждения роли проприоцептивного обучения (или, в более общем смысле, сенсорного обучения) в процессе восстановления. Сенсорное обучение тесно связано с моторным обучением, так как моторное обучение формирует сенсорные сети головного мозга, а сенсорное обучение изменяет моторные области. В частности, сенсорное обучение приводит к изменениям в моторных сетях в головном мозге, а также связано с пластичностью сенсорных систем, которая определяется

афферентными сигналами с периферии и корковыми проекциями из моторных областей. Ограниченная проприоцепцией, идея использования роботов для улучшения восстановления этого сенсорного канала была тщательно протестирована, в дополнение к дополнительной вибротактильной обратной связи [5].

Несмотря на все вышеупомянутые исследования, до сих пор отсутствует возможность получить информацию о механизмах, задействованных мозгом в процессе сенсомоторного восстановления. Новыми инструментами для решения этой проблемы могут послужить модели, относящиеся к области компьютерной нейрореабилитации. Парадигма компьютерной нейрореабилитации состоит из математического моделирования механизмов, лежащих в основе процесса реабилитации, с целью понимания биологических деталей восстановления и оптимизации индивидуального лечения пациентов. Каждая модель характеризуется тремя характеристиками: (1) использование в качестве входных данных количественного описания сенсомоторной активности, полученное с помощью моделирования или взаимодействия с роботами; (2) использование в качестве основы в описании вычислительных механизмов активности – зависимой пластичности; (3) получение количественных значений функциональных результатов. Некоторые примеры данных моделей были разработаны для конкретных случаев, однако, их можно адаптировать в сочетании с роботизированной нейрореабилитацией для лечения пациентов [6, 7].

Несмотря на это, необходимо также учитывать возможность мозга автономно выбирать определенную стратегию управления моторикой для выполнения задачи. Например, при обучении стабилизации нестабильных инструментов можно выбрать либо стратегию, которая больше полагается на управление с обратной связью, либо стратегию, основанную на управлении жесткостью [5]. Следовательно, понимание и моделирование стратегий и механизмов переключения между ними позволит более эффективно прогнозировать поведенческие последствия применения конкретной стратегии. Использование интегрированных моделей сенсомоторного контроля во время роботизированной нейрореабилитации позволит создать роботов полностью адаптированных к уровню поражения пациента и подстраивающихся к действиям пациента.

Последний аспект, который необходимо рассмотреть, – это тенденция совместного обучения пациента и специалиста в группах или, по крайней мере, парами. Данная стратегия позволит достичь большего эффекта: при взаимодействии пациента с роботом повышается эффективность

лечения за счет мотивации; при взаимодействии пациента со специалистом происходит улучшение обобщающих способностей пациента.

Интерфейсы мозг-компьютер (ИМК) изначально задумывались как неинвазивные устройства, обеспечивающие связь, в то время как их инвазивные аналоги, часто определяемые как интерфейсы мозг-машина (ИМТ), были нацелены на обеспечение определенного уровня моторного контроля у полностью парализованных или серьезно ослабленных людей. Учитывая их способность изменять и формировать пластичность нейронов, в последнее время ИМК и ИМТ стали использоваться в нейрореабилитации лиц с двигательными нарушениями, часто в сочетании с другими терапевтическими подходами, включая манипуляторы или экзоскелеты [6, 7].

Например, в недавнем исследовании группа Миллана показала, что использование функциональной электростимуляции (ФЭС) на основе ИМК могло вызвать значительное функциональное восстановление у пациентов с инсультом, причем эффект сохранялся через 6–12 месяцев после окончания терапии [6]. В этом исследовании использование ИМК для определения намерения движения запускало активацию мышц рук посредством ФЭС, было показано, что восстановление моторики сопровождалось значительной реорганизацией коры.

В другом исследовании, группа Контрерас-Видала изучала ходьбу человека по беговой дорожке с контролем ходящего аватара с помощью ИМК и без него, и с помощью анализа локализации источника данных ЭЭГ. Авторы показали, что использование ИМК приводит к активации коры головного мозга, в отличие от тренировок без ИМК, что свидетельствует о потенциальной пользе терапии на основе ИМК для стимулирования коркового взаимодействия во время реабилитации.

Недавно группы Рамос-Мургилдай и Кармена разработали новый «гибридный» ИМТ, в котором внутрикортикальные сигналы и ЭМГ использовались для управления роботизированным экзоскелетом верхней конечности с несколькими степенями свободы у пациента с тяжелым хроническим инсультом и показали, что реабилитация с помощью этой системы позволила достичь значительного восстановления моторики, которое сохранялось через 6 месяцев [7].

Эти примеры показывают, что ИМК и ИМТ могут быть успешно использованы для повышения эффективности результатов нейрореабилитации за счет более сильных кортикальных изменений. Эти данные открывают путь для разработки новых комбинированных и персонализированных стратегий реабилитации, в которых декодирование мозговой активности по замкнутому циклу

играет ключевую роль для максимального сенсомоторного восстановления.

Мультимодальная оценка восстановления

В дополнение к кинематическому и кинетическому мониторингу реабилитационных тренировок также необходимо оценить результаты протокола нейрореабилитации. Обеспечение надежной оценки сенсомоторных компонентов важно для оптимизации шансов пациента на выздоровление. Несмотря на это количественные оценки реабилитации с помощью роботизированных устройств не всегда выполняются постоянно во время клинической практики. Следовательно, повышенная точность, обеспечиваемая объективными измерениями производительности, отбрасывается в пользу объективных клинических шкал, которые зависят от опыта и способностей клиницистов, что приводит к результатам, которые не имеют точных количественных оценок

Более того, незначительные сенсорные и моторные аномалии практически не обнаруживаются клиническими измерениями. В этом контексте реабилитационная робототехника также может повысить клиническую оценку, по крайней мере, путем размещения количественной оценки рядом со стандартными клиническими оценками.

Многие работы в области нейрореабилитации, в которых использовались новые роботизированные решения, не учитывали полную характеристику активности мозга. На сегодняшний день уже проведены некоторые исследования в данном направлении, но необходимо проделать следующие шаги, чтобы охарактеризовать нейронную основу восстановления сенсомоторной функции, управляемой новыми роботизированными устройствами. Особое внимание необходимо сфокусировать на изучении процесса формирования структурных и функциональных свойств мозга в ходе программы реабилитации. Фактически, характеристика реорганизации мозга в комплексе с адекватной оценкой поведенческих характеристик позволит провести количественную оценку процессов реабилитации, управляемых роботом, как с точки зрения способности восстановления навыков движения, так и с точки зрения восстановления функций мозга. Применяемые современные неинвазивные методы нейровизуализации дают возможность оценить изменения мозговой активности во время применения протокола роботизированной реабилитации.

Текущая клиническая процедура оценки двигательных аномалий в основном представлена качественными оценками, выполняемыми операторами-специалистами с использованием клинических шкал. Применение этих шкал состоит из предложения пациентам серии заданий, те-

стов и анкет, а также процесса наблюдения за их выполнением и оценивания результативности.

Разработанные клинические шкалы можно разделить на шкалы для измерения двигательной активности и шкалы для оценки сенсорных функций. Среди первой группы наиболее широко используются: Тест качества навыков верхних конечностей (QUEST) для оценки моделей движений и функции рук [8], Модифицированная шкала Ашворта (MAS) для измерения степени спастичности верхних конечностей на основе сопротивление мышц пассивным растяжениям [9], оценка Фугля-Мейера (FMA) для количественного измерения сенсомоторных нарушений [10], оценка односторонней функции верхних конечностей Мельбурна (MAUULF) для оценки качества движений [11] и, наконец, тест «Box and Block Test» (BTB) для оценки степени ловкости рук [12]. Кроме того, клинические рейтинговые шкалы, утвержденные и в основном используемые для измерения сенсорных функций, – это Nottingham Sensory Assessment [13] или Rivermead Assessment of Somatosensory Performance [14] и тест Joint Position Matching (JPM) [15], предназначенный для измерения остроты восприятия позиции порога обнаружения пассивного движения (TTDPM) для тестирования кинестезии [16], и тест камертона для измерения чувствительности к вибрации [17].

Все вышеупомянутые сенсорные клинические шкалы применяются также и к нижним конечностям. Другие шкалы, используемые для нижней конечности, – это тест «пять раз сесть, чтобы встать» [18], тест «встань и иди» (TUG) [19], тест на двухминутную ходьбу и тест на ходьбу на десять метров [20]. Для проверки способности контролировать равновесие при спокойном стоянии наиболее распространенными клиническими шкалами являются тест Ромберга и шкала баланса Берга [5]. Несмотря на то, что такие шкалы широко приняты и признаны во всем мире и фактически обеспечивают важные измерения сенсомоторной функции пациентов, они в основном качественные и имеют низкое разрешение. По этой причине они могут быть субъективными и трудно воспроизводимыми и, следовательно, не подходят для обеспечения точных и надежных измерений. Ограничением к применению этих тестов является дефицит объективных технологий измерения во многих клинических условиях. Известно, что широко используемые инструменты, такие как ручные гониометры, не обладают чувствительностью и надежностью.

Учитывая низкое разрешение таких шкал, большинство пациентов получает промежуточный балл, неадекватно характеризующий их состояние; кроме того, значения, которые ниже разрешающей способности шкалы, остаются

невидимыми, что приводит к одному и тому же результату в течение длительного периода времени. Другой недостаток заключается в том, что многие операторы считают администрирование этих весов слишком сложным и трудоемким. Кроме комфорта, оказывает влияние и надежность оценки. Наконец, поскольку выполнение многих оценок может быть длительным, клиницисты склонны откладывать лечение в пользу серьезной оценки, несмотря на данные о важности своевременности и ранней реабилитации.

Последние достижения в области тактильных интерфейсов, предназначенных для сенсомоторной реабилитации, послужили толчком к разработке инновационной роботизированной оценки. На самом деле такая технология представляет систему временного и пространственного измерений, которые позволяют точно и непрерывно измерять положения, скорости и силы суставов и получать из них кинематические и кинетические параметры, а также обеспечивает надежную процедуру сбора больших наборов нормативных данных с высоким разрешением. Недавние публикации подчеркивают эффективность использования роботизированных устройств для получения значимой информации о сенсомоторных функциях. Данные измерения являются объективными и предоставляют специалистам и пациентам возможность немедленного измерения сенсорных и двигательных функций. Сокращение времени оценки открывает новые возможности для разработки терапевтических программ и, в конечном итоге, для повышения эффективности ухода за пациентами.

Стоит подчеркнуть, как роботизированные устройства могут мгновенно измерять эффективность субъектов в течение всего процесса лечения, обеспечивая онлайн-оценку не прямых движений, делая оценку прозрачной для пациента и сокращая время администрирования, обеспечивая немедленную обратную связь. Оценка в реальном времени может не только значительно сократить время, необходимое для оценки двигательных улучшений пациентов, но также становится важным преимуществом процесса нейрореабилитации с помощью роботов.

В последнее время появились новые способы оценки энергопотребления и психологического состояния путем подключения датчиков роботов и внешних устройств. Например, потребление энергии действительно важно во время ходьбы, и, чтобы свести его к минимуму, люди могут изменять длину шага, размах рук и частоту вращения педалей. Хорошо известно, что неврологические заболевания, влияющие на походку, увеличивают расход энергии до 70 % по отношению к здоровым. Эта проблема была количественно оценена с помощью не прямой калориметрии с использованием экзоскелета.

Кроме того, в стадии разработки находятся новые методы оценки, использующие возможности роботов. Что касается возможности оценки психологических состояний, существует множество исследований в области взаимодействия человека и робота. В частности, оценка этих состояний может иметь решающее значение для количественного мониторинга уровня вовлеченности и мотивации пациентов с использованием внешних устройств для измерения вариабельности сердечного ритма, частоты дыхания, реакции проводимости кожи и температуры кожи и сопоставления этих показателей с кинематической и динамической информацией, поступающей от робота [5].

Роботизированные устройства нейрореабилитации позволяют улучшить качество оценки, что важно для изучения и вывода о влиянии реабилитационного лечения на сенсомоторную функцию. Роботизированные измерения могут потенциально превзойти клинические масштабы, управляемые человеком, и ограничены только техническими характеристиками датчиков.

Сенсомоторную работу также можно оценить с помощью записей активности мозга или мышц. Фактически, учитывая сложность функциональной реорганизации мозга в ответ на заболевания центральной нервной системы (ЦНС), крайне важно изучить активность мозга в высоком временном (порядка миллисекунд) и пространственном (порядка 1 см или меньше) разрешениях. Таким образом, объединение этих двух шкал увеличивает шанс понимания процесса реабилитации. Достижение высоких разрешений возможно благодаря комбинации записей электроэнцефалографии высокой плотности (HDEEG) и методов визуализации источников, которые позволили надежно реконструировать сети состояния покоя мозга, а также измерить электрофизиологическую подкорковую активность. Кроме того, HDEEG недорога и портативна по сравнению с другими неинвазивными методами нейровизуализации, такими как магнитоэнцефалография (МЭГ) или функциональная и структурная магнитно-резонансная томография (МРТ). Кроме того, можно использовать ЭЭГ при выполнении задания в экологической среде. Эта технология позволяет исследовать функциональные изменения мозга и контролировать активность мозга в процессе реабилитации, потенциально проливая свет на конкретные взаимосвязи между мозгом и поведением.

В дополнение к исследованию деятельности, связанной с задачами, актуально оценить функциональную связность (ФСВ) как во время выполнения задач, так и в состоянии покоя. ФСВ представляет собой значимую статистическую взаимосвязь между отдельными областями моз-

га, и любой дисбаланс, возникающий в свойствах ФСВ, моделируемый с помощью показателей на основе графиков, может лежать в основе нейропатологических процессов и нарушений, происходящих в церебральной организации. Более того, ФСВ во время спонтанной колебательной активности, измеряемой другими методами, такими как функциональная МРТ в состоянии покоя, изменяется после проприоцептивной тренировки с роботизированным манипулятором. Кроме того, ФСВ предсказывает поведенческие результаты реабилитационных протоколов, а также восстановление двигательной функции у пациентов с инсультом, а также коррелирует с уровнем клинической инвалидности у пациентов с ранним ремитирующим рассеянным склерозом. Совместные характеристики показывают, что оценка ФСВ до и после реабилитации является ценным инструментом для оценки эффективности протокола реабилитации с использованием роботизированного устройства. Существуют и другие причины использования ФСВ состояния покоя. Во-первых, состояние покоя подходит даже для тех субъектов, которые страдают очень высокими физическими недостатками, которые могут вызвать резкое снижение отношения сигнал/шум. Во-вторых, он нечувствителен к параметрам, связанным с задачей, и очень хорошо подходит для изучения потенциального долгосрочного сохранения протокола. В-третьих, связанные с движением артефакты, возникающие во время выполнения задания, могут быть пагубными, в том числе у здоровых и минимально ослабленных субъектов [5].

Степень сенсомоторного восстановления также можно оценить с помощью других электрофизиологических измерений, таких как пЭМГ. В самом деле, многие заболевания, влияющие на сенсомоторную систему человека, связаны с аномальными паттернами мышечной активации и, таким образом, восстановление моторики может быть непосредственно измерено с помощью паттернов ЭМГ. В этом контексте мышечная активность обычно раскладывается на инвариантные модули пространственной и/или временной активации. Аномальная синергия мышц по отношению к их здоровым аналогам может, например, быть информативной для компенсаторных стратегий, которые обычно отражают природу и уровень нарушения.

До сих пор многодоменные оценки (поведенческие, мышечные и нейронные корреляты) не выполнялись постоянно, и оригинальное роботизированное решение должно сопровождаться валидационными исследованиями того, как реабилитационный робот влияет на функциональное состояние (ФС) пациентов, оценивая в то же время изменения нейронных и поведенческих коррелятов и их взаимодействие. Следова-

тельно, объединение этих оценок может повысить чувствительность, выделить потенциальные дезадаптивные компенсаторные стратегии, спланировать индивидуальное терапевтическое вмешательство и более точно отслеживать прогрессирование заболевания. Эти исследования потенциально могут открыть новые представления о функциях мозга и об эффективности конкретной реабилитационной программы и устройства. Например, в области реабилитации походки для субъектов, страдающих рассеянным склерозом, эффективность тренировок с помощью роботов для восстановления опорно-двигательной функции все еще обсуждается. Однако, используя мультимодальную структуру, описанную выше, можно добиться дальнейшего повышения эффективности использования роботизированных устройств в реабилитации постинсультных больных.

Наконец, нейрофизиологические и клинические факторы, влияющие на восстановление сенсомоторной функции пациента, должны управлять процессом реабилитации робототехнического устройства. В этом контексте сочетание мультимодальных подходов кажется обнадеживающим для использования и лучшего понимания этих важнейших факторов. Например, электрофизиологические записи с мышц человека могут служить в качестве управляющих сигналов для роботизированных реабилитационных устройств, тем самым отводя ЭМГ двойную роль: формирование объема реабилитационного вмешательства и биологическую обратную связь (БОС) выполняемого движения [5].

В перспективе должны быть разработаны вычислительные модели для понимания механизмов восстановления, прогнозирования использования различных стратегий управления моторикой и, в конечном итоге, адаптации плана лечения к пациенту.

Заключение

Проведенный анализ современных исследований в области реабилитации постинсультных больных показал, что в настоящее время в реабилитации нижних конечностей постинсультных больных широко используются экзоскелеты с программным управлением. Однако в большинстве робототехнических устройств, предназначенных для реабилитации пациента, отсутствуют средства адаптации программы реабилитации, как к общему функциональному состоянию пациента, так и к функциональному состоянию реабилитируемой конечности. Более того, в программах реабилитации не предусматривается контроль текущей динамики эффективности процесса реабилитации. В связи с вышеизложенным, актуальна разработка биотехнической системы нейрофизиологической реабилитации с роботизированным устройством, управляемым посред-

ством дешифрации электромиосигналов, позволяющей повысить эффективность реабилитации постинсультных больных посредством адаптации алгоритма управления робототехническим устройством к текущего функциональному состоянию пациента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90112.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90112.

Список литературы

1. Трифонов, А.А. Реабилитационная биотехническая система с электромиографическим контуром управления / А.А. Трифонов, А.А. Кузьмин, М.Б. Мяснянкин, С.А. Филлист // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии - ФРЭМЭ'2020: труды XIV Международной научной конференции с научной молодежной школой им. И.Н. Спиридонова (01-03 июля 2020 г.). – Владимир-Суздаль, 2020. – С. 128-133.
2. Trifonov, A. Human-Machine Interface of Rehabilitation Exoskeletons with Redundant Electromyographic Channels / A. Trifonov, S. Filist, S. Degtyarev, V. Serebrovsky, and O. Shatalova // Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" ER(ZR) 2020, Ufa, Russia, 15-18 April 2020. – P. 237-247.
3. Трифонов, А.А. Биотехническая система с виртуальной реальностью в реабилитационных комплексах с искусственными обратными связями / А.А. Трифонов, Е.В. Петрунина, С.А. Филлист, А.А. Кузьмин, В.В. Жилин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2019. – Т. 9. – №4(33). – С. 49-66.
4. Трифонов, А.А. Двухуровневая нейросетевая модель дешифратора электромиосигнала в системе управления вертикализацией экзоскелета / А.А. Трифонов, С.А. Филлист, А.А. Кузьмин, В.В. Жилин, Е.В. Петрунина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии, № 4 (52), 2020. – С.99-111.
5. Frolov, A.A. Use of robotic devices in post-stroke rehabilitation / A.A. Frolov, E.V. Biryukova, P.D. Bobrov, I.B. Kozlovskaya // Neuroscience and behavioral physiology. – 2018. – Vol. 48. – No. 9. – Pp. 1053-1066.
6. Biasucci, A. Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke / A. Biasucci, R. Leeb, I. Iturrate, S. Perdakis, A. Al-Khodairy, T. Corbet, A. Schnider, T. Schmidlin, H. Zhang, M. Bassolino // Nat. Commun. – 2018. – No.9. – Pp. 2421.
7. Ramos-Murguialday, A.A. novel implantable hybrid brain-machine-interface (BMI) for motor rehabilitation in stroke patients / A.A. Ramos-Murguialday, P. Khanna, A. Sarasola-sanz, N. Irastorza-Landa, J. Klein, J.H. Jung et al. // In Proceedings of the 2019 9th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER) (20-23 March 2019). – San Francisco, CA, USA, 2019.
8. DeMatteo, C. The reliability and validity of the Quality of Upper Extremity Skills Test / C. DeMatteo, M. Law, D. Russell, N. Pollock, P. Rosenbaum, S. Walter // Phys. Occup. Ther. Pediatr. – 1993. – No. 13. – Pp.1-18.
9. Bohannon, R.W. Interrater Reliability of a Modified Ashworth Scale of Muscle Spasticity / R.W. Bohannon, M.B. Smith // Phys. Ther. – 1987. – No.67. – Pp. 206-207.
10. Duncan, P.W. Reliability of the Fugl-Meyer Assessment of Sensorimotor Recovery Following Cerebrovascular Accident / P.W. Duncan, M. Propst, S.G. Nelson // Phys. Ther. – 1983. – No.63. – Pp. 1606-1610.
11. Randall, M. Reliability of the Melbourne Assessment of Unilateral Upper Limb Function / M. Randall, J.B. Carlin, P. Chondros, D. Reddihough // Dev. Med. Child Neurol. – 2001. – No.43. – Pp. 761-767.
12. Mathiowetz, V. Adult norms for the Box and Block Test of manual dexterity / V. Mathiowetz, G. Volland, N. Kashman, K. Weber // Am. J. Occup. Ther. – 1985. – No.39. – Pp. 386-391.
13. Lincoln, N. Reliability and revision of the Nottingham Sensory Assessment for stroke patients / N. Lincoln, J. Jackson, S. Adams. – 1998. – No.84. – Pp. 358-365.
14. Winward, C.E. The Rivermead Assessment of Somatosensory Performance (RASP): Standardization and reliability data / C.E. Winward, P.W. Halligan, D.T. Wade // Clin. Rehabil. – 2002. – No.16. – Pp. 523-533.
15. Lephart, S.M. Proprioception following anterior cruciate ligament reconstruction / S.M. Lephart, F.H. Fu, P.A. Borsa, C.D. Harner // J. Sport Rehabil. – 1992. – No.1. – Pp. 188-196.
16. Lephart, S.M. Proprioception of the shoulder joint in healthy, unstable, and surgically repaired shoulders / S.M. Lephart, J.J. Warner, P.A. Borsa, F.H. Fu // J. Shoulder Elb. Surg. – 1994. – No.3. – Pp. 371-380.
17. Gilman, S. Joint position sense and vibration sense: Anatomical organisation and assessment / S. Gilman // J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry. – 2002. – No. 73. – Pp. 473-477.
18. Mong, Y. 5-repetition sit-to-stand test in subjects with chronic stroke: Reliability and validity / Y. Mong, T.W. Teo, S.S. Ng // Arch. Phys. Med. Rehabil. – 2010. – No.91. – Pp. 407-413.
19. Podsiadlo, D. The timed "Up & Go": A test of basic functional mobility for frail elderly persons / D. Podsiadlo, S. Richardson // J. Am. Geriatr. Soc. – 1991. – No.39. – Pp. 142-148.
20. Watson, M.J. Refining the ten-metre walking test for use with neurologically impaired people / M.J. Watson // Physiotherapy. – 2002. – No. 88. – Pp. 386-397.

© А. А. Трифонов, Е. В. Петрунина, Л. П. Лазурина

Ссылка для цитирования:

Трифонов А. А., Петрунина Е. В., Лазурина Л. П. Современные тенденции роботизированной нейрореабилитации // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2021. № 3 (37). С. 82-88.