

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА РЕАБИЛИТАЦИИ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ПАЦИЕНТОВ В ПОСТИНСУЛЬТНОМ ПЕРИОДЕ

И. Ю. Земляков², Д. С. Жданов^{1,2} ✉, А. Ш. Буреев^{1,2}, Е. В. Голобокова^{1,2}, Я. В. Костелей^{1,2,3}

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

² Федеральный научно-клинический центр медицинской реабилитации и курортологии Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

³ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

Проблема распространенности инсультов одна из самых острых в медицинской и социальной составляющей жизни общества — инсульты занимают второе место по распространенности в статистике смертности населения. В Российской Федерации инсульт наблюдается ежегодно почти у 500 000 человек и является первым среди причин смерти от неврологических заболеваний и вторым по частоте в структуре смертности после заболеваний сердца. Наиболее частые последствия инсульта — двигательные нарушения различной степени выраженности, проявляющиеся в виде изменения мышечного тонуса, парезов и параличей, нарушений функции ходьбы. В обзоре представлены результаты анализа текущего состояния и возможных направлений развития роботизированных реабилитационных устройств, используемых при постинсультных парезах конечностей. Рассмотрены существующие варианты их построения, условия проведения кинезиотерапевтических сеансов для получения наибольшего эффекта. Ближайшую перспективу развития высокотехнологических устройств данного типа авторы видят в создании не только сложных стационарных универсальных комплексов для клиник, но и простых мобильных специализированных тренажеров с удаленным врачебным контролем для амбулаторного использования.

Ключевые слова: медицинская робототехника, устройства для реабилитации, инсульт, экзоскелет, биологическая обратная связь, функциональная электростимуляция

Финансирование: результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2022-0008.

Благодарности: проректору по научной и инновационной деятельности НИ ТГУ А. Ворожцову за помощь в развитии исследований в области медицинской робототехники.

Вклад авторов: И. Ю. Земляков — написание статьи; Д. С. Жданов — анализ литературных источников; А. Ш. Буреев — анализ патентных решений; Е. В. Голобокова — поиск информации об устройствах для восстановления функций верхней конечности; Я. В. Костелей — поиск информации об устройствах для восстановления функций нижней конечности.

Соблюдение этических стандартов: исследование одобрено этическим комитетом при ФГБУ ФНКЦ МРИК ФМБА России (протокол № 1 от 06 июля 2022 г.).

✉ **Для корреспонденции:** Дмитрий Сергеевич Жданов
Площадь Новособорная, д. 1, каб. 103, г. Томск, 63450, Россия; D_S_Zhdanov@mail.ru

Статья получена: 01.11.2023 **Статья принята к печати:** 09.12.2023 **Опубликована онлайн:** 28.12.2023

DOI: 10.47183/mes.2023.054

ROBOTIC MEANS OF REHABILITATION OF MOTOR ACTIVITY OF PATIENTS IN THE POST-STROKE PERIOD

Zemlyakov IY², Zhdanov DS^{1,2} ✉, Bureev AS^{1,2}, Golobokova EV^{1,2}, Kosteley YaV^{1,2,3}

¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

² Federal Research and Clinical Centre for Medical Rehabilitation and Balneology of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

³ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Stroke prevalence is one of the most acute problems in the medical and social aspects of society: strokes are the second most common in the mortality statistics of the population. In the Russian Federation, stroke occurs annually in almost 500,000 people and is the first among the causes of death from neurological diseases and the second most common cause of death after heart disease. The most common consequences of stroke are motor disorders of varying severity, manifested as changes in muscle tone, paresis and paralysis, and impaired walking function. This paper is an overview of the current state of robotic rehabilitation devices used for post-stroke limb paresis and of expected trends of their development. The existing variants of their construction, conditions of kinesiotherapy sessions for obtaining the greatest effect are considered. The authors are of the opinion that the nearest prospect for the development of high-tech devices of this type is not only complex stationary universal complexes for clinics, but also simple mobile specialized simulators with remote medical control for outpatient use.

Keywords: medical robotics, devices for rehabilitation, stroke, exoskeleton, biofeedback, functional electrical stimulation

Funding: the results were obtained as part of the fulfillment of the state assignment of the Russian Ministry of Education and Science, project № FSWM-2022-0008.

Acknowledgements: to A. Vorozhtsov, Vice-Rector for Research and Innovation of the National Research University for assistance in the development of research in the field of medical robotics.

Author contribution: IY Zemlyakov — article core authoring, formalization of findings and conclusion; DS Zhdanov — analysis of literature; ASh Bureev — analysis of patented solutions; EV Golobokova — search for information on devices for restoration of upper limb functions; YaV Kosteley — search for information on devices for restoration of lower limb functions.

Compliance with the ethical standards: The study was approved by the Ethical Committee of the Multidisciplinary Scientific and Clinical Center for Medical and Sports Rehabilitation and Resorts (minutes №1 dated July 6, 2022).

✉ **Correspondence should be addressed:** Dmitry S. Zhdanov
Novosobornaya ploshchad', 1, k. 103, Tomsk, 63450, Russia; D_S_Zhdanov@mail.ru

Received: 01.11.2023 **Accepted:** 09.12.2023 **Published online:** 28.12.2023

DOI: 10.47183/mes.2023.054

Медицинская робототехника — сложный и весьма специфический раздел, лежащий на пересечении нескольких высокотехнологических областей науки и техники. По мнению Д. Энгельбергера, получившего титул «отец робототехники», «больницы — это идеальное место и идеальная окружающая среда для использования роботов» [1]. Тем не менее полностью заменить человека робототехнические системы в ближайшее время не смогут — пока им под силу выполнять только рутинные и повторяющиеся действия [2, 3].

Впервые роботизированные устройства (РУ) в медицине были применены в 1985 г. для точного направления движения иглы при проведении биопсии тканей головного мозга с использованием манипулятора PUMA 560 [2]. В дальнейшем развитие именно позиционирующих хирургических систем стало основным направлением развития медицинской робототехники. Впрочем, в полном смысле назвать дистанционно управляемые манипуляторы робототехническими устройствами нельзя, хотя они прекрасно зарекомендовали себя в микрохирургии [4].

С развитием микроэлектроники и общей робототехники внедрение РУ в медицину существенно расширилось [5]. Стало возможным их внедрение в лабораторной диагностике [5], хирургии [6], психиатрии и психологии [7], стоматологии [8] и других разделах. Вместе с тем высокую актуальность имеет скорейшее внедрение сервисных РУ в стационарах для обслуживания маломобильных пациентов. Выполняя рутинные задачи, они существенно снижают рабочую нагрузку на медицинских сестер [9].

Существует еще одно направление в здравоохранении, где РУ могут оказаться весьма востребованными. В мире ежегодно около 17 млн человек страдают от инсультов, частично или полностью теряя двигательные функции. За последние годы наметилась тенденция повышения выживаемости больных, и к 2030 г. их количество достигнет 70 млн человек, что ляжет существенным бременем на национальные системы здравоохранения и социального обеспечения [10]. РУ для реабилитации этой категории пациентов предназначены для решения задачи восстановления функционирования пораженных конечностей.

Целью создания обзора было проведение технического анализа построения существующих роботизированных систем двигательной реабилитации пациентов в постинсультном периоде, а также их возможных направлений развития. Поиск материалов проводили в базах данных National Library of Medicine, Scopus, eLIBRARY, Google Patents, а также в ряде других баз данных научной и патентной ориентации.

Тенденции развития реабилитационных РУ

Восстановление функционирования двигательных функций пациентов, перенесших инсульт, в настоящее время возможно с помощью внешних РУ (экзоскелетов) и электромеханических устройств, проводящих принудительную тренировку конечности в соответствии с методиками проведения кинезотерапии. Впервые электромеханические РУ были применены на рубеже 1980–90-х гг. [11, 12]. За счет использования датчиков обратной связи конструкции РУ при проведении упражнений была предпринята попытка обеспечить атравматическое и наиболее полное взаимодействие экзоскелета с человеком. Так, положительный эффект использования экзоскелета в нейрореабилитации

был впервые описан в 1998 г. [13]. Авторы показали отсутствие побочных эффектов, хорошую переносимость назначенных процедур и значимое влияние манипуляций с поврежденной конечностью на процесс восстановления двигательных центров коры головного мозга.

За последующие 20 лет количество публикаций, посвященных постинсультной нейрореабилитации с использованием РУ, быстро росло. В русскоязычной литературе вопрос нейрореабилитации с использованием РУ до 2018 г. отражен в аналитическом обзоре [14]. Использование РУ в отечественной клинической практике нейрореабилитации того периода можно оценить, посчитав количество процитированных статей российских авторов: из 71 статьи их оказалось всего лишь 5. В другом отечественном обзоре упоминают более 240 моделей РУ для восстановительного лечения [15]. Авторы приводят данные, что для закрепления в памяти двигательного акта необходимо совершить упражнение не менее 400 раз. Однако при отсутствии РУ без ошибок это выполнить затруднительно.

Авторы одного из обзоров указывают на постоянно растущую стоимость курсов по реабилитации инсультных пациентов в восстановительном периоде и периоде остаточных явлений, а также на высокую стоимость соответствующего оборудования [16]. Связано это с процессом разработки и внедрением РУ, имеющих возможность индивидуальной адаптации, в том числе с использованием элементов искусственного интеллекта. Небольшие тиражи таких изделий при существенных трудовых и финансовых затратах на создание и сертификацию обуславливают их высокую стоимость [17]. Вторая тенденция развития — на рынке появляется все большее количество мобильных компактных устройств, предназначенных для индивидуального постоянного использования [18]. В сравнении со стационарными реабилитационными тренажерами, они требовательнее к используемым материалам, качеству изготовления и энергопотреблению, что также влияет на себестоимость. Предполагается, что за пять лет с 2020 по 2025 г. рынок реабилитационных устройств вырастет на треть и достигнет \$16,6 млрд в год. При этом необходимо учитывать, что высокотехнологичная помощь данного направления в мире в настоящее время доступна менее чем 50% нуждающихся в ней [16].

Высокая нагрузка на сотрудников реабилитационных отделений, существенная стоимость оборудования и недостаточная распространенность специализированных клинических центров вынуждает ограничивать продолжительность цикла восстановительной терапии несколькими неделями. Выходом из создавшейся ситуации может стать рост производства и расширение номенклатуры домашних реабилитационных РУ, относительно недорогих из-за узкой специализации и, как следствие, упрощенной конструкции. Подобное решение позволит организовывать непрерывный реабилитационный процесс под периодическим врачебным контролем и достигать положительных результатов за меньшее время. К сожалению, отечественный сегмент рынка индивидуальных реабилитационных РУ находится в стадии становления и пока еще недостаточно широк [16].

Устройства для нейрореабилитации

РУ для нейрореабилитации можно квалифицировать как сервисных роботов в подкатегории «роботы для

реабилитации пациентов» [19]. Их было предложено разделить на два подкласса: роботы, разработанные для тренировки утраченных двигательных функций после инсульта (терапевтические устройства), и роботы, предназначенные для компенсации утраченных навыков (вспомогательные устройства) [20]. Актуальность использования обоих типов РУ объясняется тем, что на разных стадиях реабилитации они органично дополняют друг друга. При этом за счет экономии времени на очный контроль правильности выполнения упражнений снижается нагрузка на медицинский персонал, а также возникает экономический эффект, выражающийся в увеличении количества курируемых пациентов при незначительном росте нагрузки на одного врача.

Устройства, предназначенные для нейрореабилитации конечностей и их фрагментов, можно разделить на три типа [21–23]:

1) статические ортопедические аппараты, реализующие функцию поддержки конечности. Не имеют в составе никаких исполнительных механизмов. К ним относят шины, лангеты, корсеты и фиксаторы различного типа [24];

2) динамические ортезы, сохраняющие подвижность конечности. Могут быть пассивными, поддерживающими, или активными, снабженными механическими приводами, тренирующими конкретный сустав [25];

3) роботизированные экзоскелеты, повторяющие механические свойства конечности и, как следствие, в большей степени соответствующие ее анатомии. Несмотря на громоздкость и высокую стоимость, эти решения в наибольшей степени соответствуют задачам нейрореабилитации и функционального протезирования в условиях свободного перемещения.

Рассмотрим последний вариант как наиболее универсальное решение, хотя до настоящего времени экзоскелеты медицинского назначения в отечественной системе стандартов не выделены в отдельную категорию [26]. Экзоскелеты предполагают безопасную совместную работу с пациентом, направленную на возможность использования и улучшение остаточных двигательных функций. Следовательно, системы приведения в действие и управления должны обеспечивать минимум два режима работы: режим с управлением по положению и режим с управлением по усилию. В режиме управления по положению РУ движется по заранее заданным пространственно-временным траекториям, определенным его настройками. Режим управления по усилию предполагает использование мышечных усилий пациента для формирования РУ полноценного движения: эта схема применима при незначительных порезах мышц. В качестве дополнительного контура, корректирующего правильность выполнения упражнения, можно добавить управление по положению.

Сокращение времени реабилитации при использовании экзоскелетов при проведении кинезиотерапии впервые было показано в работе [21]. При этом достоверных различий в эффективности упражнений с экзоскелетами с адаптивным управлением и без него не установлено [22]. Авторы даже склоняются в пользу РУ без адаптивных возможностей из-за их меньшей стоимости, большей надежности, простоты в использовании и обслуживании.

Период начала проведения реабилитационных мероприятий и параметры проведения роботизированной тренировки ходьбы (RAGT, роботизированная тренировка походки) зависят от многих факторов [23]. Установлено, что наилучшие результаты можно получить в остром периоде

заболевания, при проведении сеанса длительностью 30 мин, три раза в неделю в течение четырех недель. Для оценки состояния использовали шесть клинических параметров, включая оценку сенсомоторных функций по шкале Фугл-Мейера, шкалу оценки нарушения равновесия и баланса Берг, шкалу оценки контроля и нарушений движения туловища, модифицированный индекс Бартел оценки независимости в основных сферах повседневной жизни и модифицированную шкалу спастичности мышц Эшворта. Это утверждение было подтверждено результатами исследований электромиограмм (ЭМГ) группы из 36 пациентов. Разница параметров ЭМГ (частота пиков, ее длительность и площадь) между контрольной и экспериментальной группами была достоверной [27].

Экзоскелеты верхних конечностей более сложны относительно РУ того же типа для нижних конечностей. Это связано с тем, что к простым движениям крупных суставов добавляются повороты кисти, а также хватательные или щипковые движения пальцев [28, 29]. При этом известные РУ, реализующие перемещения пальцев, не учитывают движение запястья, поэтому конструкции устройств либо удерживают его неподвижно, либо позволяют совершать движения только в одной плоскости — сгибаться и разгибаться. Функциональная многогранность имитации движения кисти и пальцев руки человека предполагает высокую сложность задачи управления РУ, в том числе с использованием элементов искусственного интеллекта и методов обнаружения намерений движения пациента, включая регистрацию тензометрических и электрофизиологических сигналов паретичных мышц [30].

Устройства для восстановления функций верхних конечностей

Несмотря на достаточное количество моделей РУ, ориентированных на восстановление функционирования верхних конечностей, до сих пор отсутствует единая согласованная, функционально и физиологически обоснованная концепция проведения нейрореабилитационных мероприятий подвижности руки и кисти с использованием РУ [31]. Эта ситуация отражает неоднозначность существующих подходов к проведению нейрореабилитации инсультных больных и многообразию клинических состояний, часто не имеющих четких различий и являющихся сочетанными [31]. Как результат описанной ситуации, в настоящее время имеются РУ, предназначенные для восстановления функционирования рук на основе ЭМГ с интерфейсом мозг-компьютер (BCI или ИМК) и соматосенсорные РУ с функциональной электростимуляцией (BCI-FES) [32].

Реабилитационный процесс с использованием ЭМГ может быть основан на описанных ниже принципах. Достоверного различия в эффективности описанных методов пока не обнаружено [33]:

1) воздействие на мышцы паретичной конечности сигналами электростимулятора, которые соответствуют физиологической норме и хранятся в соответствующей базе данных: электромиограмма служит для контроля воздействия;

2) использование принципа «зеркала», когда на паретичную конечность подается усиленный сигнал, регистрируемый на здоровой в тот момент, когда пациент пытается совершить идентичные движения;

3) использование ЭМГ в цепи биологической обратной связи (БОС), когда в режиме «зеркала» пациенту предъявляются электромиограммы при попытке

совершения идентичных движений паретичной и здоровой рукой.

РУ, использующие BCI, реализуют различные подходы, основанные на регистрации электроэнцефалограмм (ЭЭГ) двигательных зон коры головного мозга. Основная проблема таких РУ — неоднозначность трактовки регистрируемого сигнала. Одним из первых относительно простых и специализированных, но требующим существенных вычислительных мощностей, представляется алгоритм, основанный на анализе пространственно-временных характеристик ЭЭГ в нескольких частотных диапазонах общей полосы пропускания сигнала электроэнцефалограммы [34]. Более универсальный и быстрый алгоритм минимизации энергии сигнала (или его частные реализации), распознаваемого образа, позволяет на практике получать приближенные решения, которые в отдельных случаях оказываются более эффективными [35]. Алгоритм PSD (спектральная площадь мощности) основан на измерении спектральной плотности мощности сигнала, состоящего из большого количества синусоид, генерируемых независимыми источниками, что наблюдают во многих шумоподобных сигналах [36]. К общим недостаткам РУ с нейроинтерфейсами следует отнести существующую в настоящее время невозможность выделения слабых сигналов активации мелких мышц кисти и предплечья, управляющих отдельными пальцами.

Соматосенсорные РУ основаны на создании петли биологической обратной связи между завершенными комплексами движений и ощущениями, получаемыми от зрительной, слуховой или тактильной систем организма [37]. Наиболее эффективной оказалась аудиовизуальная БОС в сочетании с технологиями виртуальной или дополненной реальности, где пациенты выполняли упражнения с эффектом соматосенсорного погружения. Датчики обратной связи, установленные для фиксации движений, регистрируют силу воздействия, скорость движения или положение в пространстве руки, кисти и/или пальцев. Последующие исследования доказали, что мультисенсорная стимуляция и механическая обратная связь, помогающие в реабилитационном обучении, значительно сокращают процесс реабилитации и имеют длительное последствие [38].

Эффективное средство для восстановления подвижности — BCI-FES, при которой стимулирующие импульсы вызывают мышечную активность параллельно с принудительными движениями всей конечности или какой-либо ее части. Тем самым через реципрокные отношения в двигательных центрах коры головного мозга формируется устойчивая связь между внешним стимулом и соответствующим движением. Действенность метода показана на восстановлении подвижности как нижних [39, 40], так и верхних конечностей независимо от возраста и пола [41, 42]. При этом наибольший эффект был продемонстрирован в острой фазе инсульта. Немного уступая в эффективности соматосенсорным РУ, реабилитационные тренажеры этого типа за счет узкой специализации, направленной на тренировку ограниченного количества движений, могут оказаться проще, дешевле и компактнее.

Устройства для восстановления функций нижних конечностей

Существенное снижение сроков нейрореабилитации у пациентов с парезами нижних конечностей при

использовании роботизированных экзоскелетов, а также более эффективное восстановление их функционирования отмечают многие авторы [43–46]. В последнее время распространение начинают получать гибкие экзоскелеты нижних конечностей, которые эффективно решают некоторые проблемы традиционных жестких экзоскелетов, обеспечивая более высокое качество имитации биомеханики нормальной ходьбы, большую жесткость в области суставов, меньший вес и относительную компактность системы управления [43].

Согласно полученным данным, за последние десятилетия внимание разработчиков экзоскелетов нижних конечностей сосредоточилось на трех основных направлениях: материалы, технология производства и управление [44]. Относительно механической части исполнения каких-либо принципиальных улучшений не произошло. Из материалов для производства на первый план ожидаемо вышли биологически нейтральные легкие сплавы на основе титана и композитных пластиков на основе углеволокна (карбона). Это позволяет существенно упростить технологию производства, заменив штамповку под прессом на моделирование изделия в легкой пресс-форме с подогревом и последующим уплотнением в ходе полимеризации связующих смол. Таким образом, изготовление основы механической части экзоскелетов стало доступно небольшим предприятиям. Кроме того, появилась возможность индивидуальной подгонки частей экзоскелета уже на стадии их производства. Управление механикой экзоскелетов также активно развивается, существенно уменьшается энергопотребление и элементы становятся все более компактными за счет появления на рынке микроконтроллеров, соизмеримых по производительности с настольными ЭВМ начала 2000-х гг., а также миниатюрных шаговых двигателей с высоким крутящим моментом.

Положительным моментом представляется внедрение БОС для расширения возможностей управления экзоскелетами. Одно из направлений — это развитие адаптивного управления на основе распознавания намерений движения с помощью датчиков ускорения и кожной ЭМГ [45]. В этом случае, как справедливо отмечают авторы, основными препятствиями становятся множественность несогласованных шкал и оценок двигательной активности постинсультных больных, что затрудняет объективность оценки эффективности воздействий, отсутствие адекватных математических моделей, связывающих ЭМГ-активность двигательных нервов с соответствующим движением ноги, особенно во время спуска и подъема по лестницам, а также сам характер сигналов ЭМГ с нарушенной координацией мышц после инсульта, что требует использования многослойных моделей нейронных сетей для их распознавания. Решение этих задач позволит частично автоматизировать процесс реабилитации, в первую очередь в плане изменения влияния экзоскелета на походку по мере прогресса в восстановлении двигательных навыков. Авторы справедливо замечают, что внедрение экзоскелетов с адаптивным управлением снизит не только нагрузку на врача-реабилитолога, взяв на себя решение рутинных задач, но и даст существенный экономический эффект за счет роста численности группы пациентов, приходящихся на одного врача.

Вместе с тем даже использование упрощенных роботизированных приводов, реализующих подвижность лишь тазобедренного и коленного суставов во время

тренировок, уже дает положительный эффект для восстановления биомеханики ходьбы. При анализе результатов влияния подобной схемы на восстановление двигательных функций установлено общее улучшение моторики движений, снижение мышечного тонуса разгибателей и увеличение длительности фазы опоры в цикле шага; при этом сам цикл шага сократился с пяти частей до трех. Авторы пришли к выводу, что роботизированные тренировки с применением активных приводов для тазобедренного и коленного суставов опосредованно способствуют изменениям кинематических параметров в голеностопном суставе за счет приближения показателей паттерна к некоему усредненному шаблону движений [46].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя работы, описывающие влияние РУ на функциональное восстановление конечностей постинсультных больных, нельзя не согласиться с позицией, изложенной в одной из работ: большинство источников описывают лишь идеи, в лучшем случае — предварительный дизайн и тестирование прототипов, а не оценку уже выпускаемых или готовых к массовому внедрению устройств [47]. Кроме того, несмотря на социальную значимость и важность внедрения медицинских РУ, до сих пор основной объем предложений на отечественном рынке представлен зарубежными разработками. Заметим, что их высокая стоимость и сложность сервисного обслуживания в условиях наложенных на Россию санкций требуют скорейшего решения задач разработки и серийного выпуска отечественных устройств аналогичного назначения.

Основной вывод представленного обзора состоит в том, что для сохранения непрерывности реабилитационного процесса и действительного повышения качества жизни пациентов следует разрабатывать не только высокоэффективные робототехнические комплексы, доступные для крупных клиник и реабилитационных центров, но и относительно простые, недорогие и массовые РУ для домашнего использования. Это позволит сделать реабилитационный процесс по-настоящему непрерывным. Примером этому могут послужить относительно простые и недорогие специализированные РУ типа BCI-FES для пациентов в постинсультном периоде, реализация которых, по нашему мнению, не потребует больших вложений.

Использование медицинских сервисных роботов для пациентов с ограниченной мобильностью в домашних условиях пока затруднено из-за высокой стоимости и необходимости создания разветвленной сети сервисных центров. Однако применение подобных РУ с голосовым управлением в клинических условиях более чем оправдано,

так как позволяет снизить нагрузку на медсестер и автоматизировать такие рутинные процедуры, как раздача лекарств или утренний контроль за температурой и артериальным давлением пациентов.

Если анализировать состояние и ближайшие перспективы развития реабилитационных РУ, то следует ожидать их развития в двух взаимодополняющих направлениях.

С одной стороны, появление все большего количества моделей универсальных стационарных комплексов, ориентированных на эксплуатацию в клинических условиях и крупных реабилитационных центрах. Изначально каждый такой комплекс должен обладать библиотекой профилей проведения «стандартных» тренировочных сеансов общего плана с возможностью расширения и дополнения новыми комбинациями упражнений. Обязательным условием для таких систем должно стать использование многопетлевой БОС, обеспечивающей индивидуальную адаптацию к возможностям каждого пациента с элементами самообучения. Вырабатываемые в ходе тренировок индивидуальные профили больных должны храниться в цифровой библиотеке и использоваться при повторных визитах. При этом распространение таких профилей вряд ли целесообразно из-за их высокой индивидуальности.

С другой стороны, для обеспечения непрерывности реабилитационного процесса следует ожидать развития рынка относительно недорогих специализированных, возможно, мобильных устройств, используемых в том числе и в домашних условиях. Снижение стоимости таких РУ возможно при их функциональной специализации, использовании упрощенных технологий и унификации механической части и электромеханической оснастки, а также если сделать набор профилей упражнений разумно минимальным. Но и в этом случае необходимым условием следует считать использование, по крайней мере, одной БОС, позволяющей организовать адаптацию и самообучение РУ. Обеспечение этих изделий средствами объективного контроля (поверхностная ЭМГ, акселерометрия) за двигательной активностью пораженных конечностей совместно с каналом передачи данных на удаленный сервер обеспечит наиболее полные условия для проведения полноценных реабилитационных мероприятий.

В заключение необходимо отметить, что, по мнению авторов, внедрение робототехники в медицину обязательно приведет к росту эффективности диагностических, лечебных и реабилитационных процедур и повышению долгосрочной выживаемости пациентов. Широкая роботизация здравоохранения способна создать условия для достаточно скорого перехода медицины на совершенно иной уровень диагностики и лечения, который еще недавно считался фантастическим.

Литература

1. Краевский С. В., Рогаткин Д. А. Медицинская робототехника: первые шаги медицинских роботов. Технологии живых систем. 2010; 7 (4): 3–14. EDN: OPBPTP.
2. Мосоян М. С., Федоров Д. А. Современная робототехника в медицине. Трансляционная медицина. 2020; 7 (5): 91–108. DOI: 10.18705/2311-4495-2020-7-5-91-108.
3. Козырев Ю. Г. Промышленные роботы: основные типы и технические характеристики. М.: КНОРУС, 2015; 560 с.
4. Moglia A, Georgiou K, Georgiou E, Satava RM, Cuschieri A. A systematic review on artificial intelligence in robot-assisted surgery. *Int J Surg.* 2021; 95: 106151. DOI: 10.1016/j.ijsu.2021.106151. PMID: 34695601.
5. Gyles C. Robots in medicine. *Can Vet J.* 2019; 60 (8): 819–20. PMID: 31391598. PMID: PMC6625162.
6. Denning NL, Kallis MP, Prince JM. Pediatric robotic surgery. *Surg Clin North Am.* 2020; 100 (2): 431–43. DOI: 10.1016/j.suc.2019.12.004. PMID: 32169188.
7. Fiske A, Henningsen P, Buyx A. Your robot therapist will see you now: ethical implications of embodied artificial intelligence in psychiatry, psychology, and psychotherapy. *J Med Internet Res.*

- 2019; 21 (5): e13216. DOI: 10.2196/13216. PMID: 31094356. PMID: PMC6532335.
8. Ahmad P, Alam MK, Aldajani A, Alahmari A, Alanazi A, Stoddart M, et al. Dental robotics: a disruptive technology. *Sensors (Basel)*. 2021; 21 (10): 3308. DOI: 10.3390/s21103308. PMID: 34064548. PMID: PMC8151353.
 9. Maalouf N, Sidaoui A, Elhadj IH, Asmar D. Robotics in nursing: a scoping review. *J Nurs Scholarsh*. 2018; 50 (6): 590–600. DOI: 10.1111/jnu.12424. PMID: 30260093.
 10. Ding Q, Liu S, Yao Y, Liu H, Cai T, Han L. Global, regional, and national burden of ischemic stroke, 1990–2019. *Neurology*. 2021; 98: 1–10. DOI:10.1212/WNL.00000000000013115.
 11. Gosine R, Harwin W, Furby L, Jackson R. An intelligent end-effector for a rehabilitation robot. *Journal of Medical Engineering Technology*. 1989; 13 (1–2): 37–43.
 12. Gosine R, Harwin W, Jackson R. An interactive robot workstation for applications in rehabilitation. *IEEE Xplore: Intelligent Robots and Systems '90*. 1990; 2: 977–83. DOI: 10.1109/IROS.1990.262522.
 13. Krebs H, Hogan N, Aisen M, Volpe B. Robot-Aided Neurorehabilitation. *IEEE transactions on rehabilitation engineering: IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 1998; 6: 75–87. DOI: 10.1109/86.662623.
 14. Белова А. Н., Борзиков В. В., Кузнецов А. Н., Рукина Н. Н. Роботизированные устройства в нейрореабилитации: состояние вопроса. *Вестник восстановительной медицины*. 2018; 2: 94–107.
 15. Королева Е. С., Алифинова В. М., Латыпова А. В., Чебан С. В., Отт В. А., Бразовский К. С. и др. Принципы и опыт применения роботизированных реабилитационных технологий у пациентов после инсульта. *Бюллетень сибирской медицины*. 2019; 18 (2): 223–33.
 16. Аксенова Е. И., Горбатов С. Ю., Маклакова Ю. А. Экспертный обзор: Индустрия реабилитационных технологий в России и мире. М.: ГБУ «НИИОЗММ ДЗМ», 2020; 64 с.
 17. Сервисные роботы от Promobot. Применение в медицине. [последнее цитирование 5 сентября 2023 г.]. Доступно по ссылке: <https://evercare.ru/news/servisnye-roboty-ot-promobot-primenenie-v-medicine>.
 18. Mehrholz J, Pohl M, Platz T, Kugler J, Elsner B. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving activities of daily living, arm function, and arm muscle strength after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*. 2018; 9 (9): CD006876. DOI: 10.1002/14651858.CD006876.pub5. PMID: 30175845. PMID: PMC6513114.
 19. ГОСТ Р 60.0.0.2 — 2016. Роботы и робототехнические устройства. Классификация. М.: Стандартинформ, 2016; 15 с.
 20. Klamroth-Marganska V. Stroke rehabilitation: therapy robots and assistive devices. In: P Kerkhof LM, Miller VM, editors. Sex-specific analysis of cardiovascular function. Springer International Publishing AG, 2018; p. 579–87. DOI: 10.1007/978-3-319-77932-4_35.
 21. Fukuda H, Morishita T, Ogata T, Saita K, Hyakutake K, Watanabe J, et al. Tailor-made rehabilitation approach using multiple types of hybrid assistive limb robots for acute stroke patients: A pilot study. *Assist Technol*. 2016; 28 (1): 53–6. DOI: 10.1080/10400435.2015.1080768. PMID: 26478988.
 22. Park JH, Park G, Kim HY, Lee JY, Ham Y, Hwang D, et al. A comparison of the effects and usability of two exoskeletal robots with and without robotic actuation for upper extremity rehabilitation among patients with stroke: a single-blinded randomised controlled pilot study. *J Neuroeng Rehabil*. 2020; 17 (1): 137. DOI: 10.1186/s12984-020-00763-6. PMID: 33076952. PMID: PMC7574181.
 23. Xie L, Yoon BH, Park C, You JSH. Optimal intervention timing for robotic-assisted gait training in hemiplegic stroke. *Brain Sci*. 2022; 12 (8): 1058. DOI: 10.3390/brainsci12081058. PMID: 36009121. PMID: PMC9405763.
 24. ГОСТ Р 51079-2006 (ISO 9999:2002). Технические средства реабилитации людей с ограничениями жизнедеятельности. Классификация. М.: Российский институт стандартизации, 2007; 114 с.
 25. ГОСТ Р 51819-2022. Протезирование и ортезирование верхних и нижних конечностей. Термины и определения. М.: Российский институт стандартизации, 2022; 20 с.
 26. ГОСТ Р 59181-2022. Средства индивидуальной защиты опорно-двигательного аппарата. Экзоскелеты промышленные. Классификация. Термины и определения. М.: Российский институт стандартизации, 2022; 8 с.
 27. Zhang H, Li X, Gong Y, Wu J, Chen W, et al. Three-Dimensional Gait Analysis and sEMG measures for robotic-assisted gait training in subacute stroke: a randomized controlled trial. *Biomed Res Int*. 2023; 2023: 7563802. DOI: 10.1155/2023/7563802. PMID: 37082189. PMID: PMC10113045.
 28. Gassert R, Dietz V. Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: a neurophysiological perspective. *J Neuroeng Rehabil*. 2018; 15 (1): 46. DOI: 10.1186/s12984-018-0383-x. PMID: 29866106. PMID: PMC5987585.
 29. Baniqued PDE, Stanyer EC, Awais M, Alazmani A, Jackson AE, Mon-Williams MA, et al. Brain-computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review. *J Neuroeng Rehabil*. 2021; 18 (1): 15. DOI: 10.1186/s12984-021-00820-8. PMID: 33485365. PMID: PMC7825186.
 30. Du Plessis T, Djouani K, Oosthuizen C. A review of active hand exoskeletons for rehabilitation and assistance. *Robotics*. 2021; 10: 42. DOI: 10.3390/robotics10010040.
 31. Sun Y, Yuntao T, Zheng J, Dong D, Chen X, Bai L. From sensing to control of lower limb exoskeleton: a systematic review. *Annual Reviews in Control*. 2022; 53. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2022.04.003.
 32. Wu H, Li L, Li L, Liu T, Wang J. Review of comprehensive intervention by hand rehabilitation robot after stroke. *Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi*. 2019; 36 (1): 151–6. DOI: 10.7507/1001-5515.201711024. PMID: 30887790. PMID: PMC9929888.
 33. Spencer J, Wolf SL, Kesar TM. Biofeedback for post-stroke gait retraining: a review of current evidence and future research directions in the context of emerging technologies. *Front Neurol*. 2021; 12: 637199. DOI: 10.3389/fneur.2021.637199. PMID: 33859607. PMID: PMC8042129.
 34. Ang K, Chin Z, Zhang H, Guan C. Filter Bank Common Spatial Pattern (FBCSP) in brain-computer interface. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks; 2008 June 1–8; Hong Kong, China; p. 2390–7*. DOI: 10.1109/IJCNN.2008.4634130.
 35. Осокин А. А. Субмодулярная релаксация в задаче минимизации энергии марковского случайного поля [диссертация]. М., 2014.
 36. Thomas BE, John SK, Abe S. Power Spectral Density (PSD) Computation using Modified Welsh Method. *Int J Sci Technol Engeneer*. 2015; 2 (4): 145–52.
 37. Костенко Е. В., Петрова Л. В., Погонченкова И. В., Непринцева Н. В., Шурупова С. Т., Копашева В. Д. и др. Инновационные технологии и мультимодальная коррекция в медицинской реабилитации двигательных и нервно-психических нарушений вследствие инсульта. *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры*. 2022; 99 (6): 67–78. DOI: 10.17116/kurort20229906167.
 38. Assis G, Brandao A, Corrêa AG, Castellano G. Characterization of functional connectivity in chronic stroke subjects after augmented reality training. *Virtual Worlds*. 2023; 2 (1): 1–15. DOI: 10.3390/virtualworlds2010001.
 39. Sota K, Uchiyama Y, Ochi M, Matsumoto S, Hachisuka K, Domen K. Examination of factors related to the effect of improving gait speed with functional electrical stimulation intervention for stroke patients. *PM R*. 2018; 10 (8): 798–805. DOI: 10.1016/j.pmrj.2018.02.012. PMID: 29518588.
 40. Jacqueline da Cunha M, Rech KD, Salazar AP, Pagnussat AS. Functional electrical stimulation of the peroneal nerve improves post-stroke gait speed when combined with physiotherapy. A systematic review and meta-analysis. *Ann Phys Rehabil Med*. 2021; 64 (1): 101388. DOI: 10.1016/j.rehab.2020.03.012. PMID: 32376404.
 41. Cardoso LRL, Bochekezanian V, Forner-Cordero A, Melendez-Calderon A, Bo APL. Soft robotics and functional electrical stimulation advances for restoring hand function in people with

- SCI: a narrative review, clinical guidelines and future directions. *J Neuroeng Rehabil.* 2022; 19 (1): 66. DOI: 10.1186/s12984-022-01043-1. PMID: 35773733. PMCID: PMC9245887.
42. Zulauf-Czaja A, Al-Taleb MKH, Purcell M, Petric-Gray N, Cloughley J, Vuckovic A. On the way home: a BCI-FES hand therapy self-managed by sub-acute SCI participants and their caregivers: a usability study. *J Neuroeng Rehabil.* 2021; 18 (1): 44. DOI: 10.1186/s12984-021-00838-y. PMID: 33632262. PMCID: PMC7905902.
43. Meng Q, Zeng Q, Xie Q, Fei C, Kong B, Lu X, et al. Flexible lower limb exoskeleton systems: A review. *NeuroRehabilitation.* 2022; 50 (4): 367–90. DOI: 10.3233/NRE-210300. PMID: 35147568.
44. Hussain F, Goecke R, Mohammadian M. Exoskeleton robots for lower limb assistance: A review of materials, actuation, and manufacturing methods. *Proc Inst Mech Eng H.* 2021; 235 (12): 1375–85. DOI: 10.1177/09544119211032010. PMID: 34254562.
45. Su D, Hu Z, Wu J, Shang P, Luo Z. Review of adaptive control for stroke lower limb exoskeleton rehabilitation robot based on motion intention recognition. *Front Neurobot.* 2023; 17: 1186175. DOI: 10.3389/fnbot.2023.1186175. PMID: 37465413. PMCID: PMC10350518.
46. Клочков А. С., Зимин А. А., Хижникова А. Е., Супонева Н. А., Пирадов М. А. Влияние роботизированных тренировок на биомеханику голеностопного сустава у пациентов с постинсультным парезом. *Вестник РГМУ.* 2020; 5: 47–57. DOI: 10.24075/vrgmu.2020.066.
47. Suarez-Escobar M, Rendon-Velez E. An overview of robotic/mechanical devices for post-stroke thumb rehabilitation. *Disabil Rehabil Assist Technol.* 2018; 13 (7): 683–703. DOI: 10.1080/17483107.2018.1425746. PMID: 29334274.

References

- Kraevsky SV, Rogatkin DA. Medical robotics: the first steps of medical robots. *Technologies of living systems.* 2010; 7 (4): 3–14. EDN: OPBPTP. Russian.
- Mosoyan MS, Fedorov DA. Modern robotics in medicine. *Translational Medicine.* 2020; 7 (5): 91–108. DOI: 10.18705/2311-4495-2020-7-5-91-108. Russian.
- Kozyrev YuG. *Promyshlennyye roboty: osnovnyye tipy i tehnikeskie harakteristiki.* M.: KNORUS, 2015; 560 p. Russian.
- Moglia A, Georgiou K, Georgiou E, Satava RM, Cuschieri A. A systematic review on artificial intelligence in robot-assisted surgery. *Int J Surg.* 2021; 95: 106151. DOI: 10.1016/j.ijsu.2021.106151. PMID: 34695601.
- Gyles C. Robots in medicine. *Can Vet J.* 2019; 60 (8): 819–20. PMID: 31391598. PMCID: PMC6625162.
- Denning NL, Kallis MP, Prince JM. Pediatric robotic surgery. *Surg Clin North Am.* 2020; 100 (2): 431–43. DOI: 10.1016/j.suc.2019.12.004. PMID: 32169188.
- Fiske A, Henningsen P, Buys A. Your robot therapist will see you now: ethical implications of embodied artificial intelligence in psychiatry, psychology, and psychotherapy. *J Med Internet Res.* 2019; 21 (5): e13216. DOI: 10.2196/13216. PMID: 31094356. PMCID: PMC6532335.
- Ahmad P, Alam MK, Aldajani A, Alahmari A, Alanazi A, Stoddart M, et al. Dental robotics: a disruptive technology. *Sensors (Basel).* 2021; 21 (10): 3308. DOI: 10.3390/s21103308. PMID: 34064548. PMCID: PMC8151353.
- Maalouf N, Sidaoui A, Elhajj IH, Asmar D. Robotics in nursing: a scoping review. *J Nurs Scholarsh.* 2018; 50 (6): 590–600. DOI: 10.1111/jnu.12424. PMID: 30260093.
- Ding Q, Liu S, Yao Y, Liu H, Cai T, Han L. Global, regional, and national burden of ischemic stroke, 1990–2019. *Neurology.* 2021; 98: 1–10. DOI:10.1212/WNL.00000000000013115.
- Gosine R, Harwin W, Furby L, Jackson R. An intelligent end-effector for a rehabilitation robot. *Journal of Medical Engineering Technology.* 1989; 13 (1–2): 37–43.
- Gosine R, Harwin W, Jackson R. An interactive robot workstation for applications in rehabilitation. *IEEE Xplore: Intelligent Robots and Systems '90.* 1990; 2: 977–83. DOI: 10.1109/IROS.1990.262522.
- Krebs H, Hogan N, Aisen M, Volpe B. Robot-Aided Neurorehabilitation. *IEEE transactions on rehabilitation engineering: IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.* 1998; 6: 75–87. DOI: 10.1109/86.662623.
- Belova AN, Borzenkov VV, Kuznetsov AN, Rukina NN. Robotic devices in neurorehabilitation: the state of the question. *Bulletin of Restorative Medicine.* 2018; 2: 94–107. Russian.
- Koroleva ES, Alifirova VM, Latypova AV, Cheban SV, Ott VA, Brazovsky KS, et al. Principles and experience of using robotic rehabilitation technologies in patients after stroke. *Bulletin of Siberian Medicine.* 2019; 18 (2): 223–33. Russian.
- Aksenova EI, Gorbatov SYu, Maklakova YuA. *Jekspertnyj obzor: Industrija reabilitacionnyh tehnologij v Rossii i mire.* M.: GBU «NIIOZMM DZM», 2020; 64 p. Russian.
- Service roboty ot Promobot. *Primenenie v meditsine.* [cited 2023 Sept 5]. Available from: <https://evercare.ru/news/service-roboty-ot-promobot-primenenie-v-medicine>. Russian.
- Mehrholz J, Pohl M, Platz T, Kugler J, Elsner B. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving activities of daily living, arm function, and arm muscle strength after stroke. *Cochrane Database Syst Rev.* 2018; 9 (9): CD006876. DOI: 10.1002/14651858.CD006876.pub5. PMID: 30175845. PMCID: PMC6513114.
- GOST R 60.0.0.2 – 2016. *Roboty i robototekhnicheskie ustroystva.* Klassifikatsiya. M.: Standartinform, 2016; 15 p. Russian.
- Klamroth-Marganska V. Stroke rehabilitation: therapy robots and assistive devices. In: P Kerckhof LM, Miller VM, editors. *Sex-specific analysis of cardiovascular function.* Springer International Publishing AG, 2018; p. 579–87. DOI: 10.1007/978-3-319-77932-4_35.
- Fukuda H, Morishita T, Ogata T, Saita K, Hyakutake K, Watanabe J, et al. Tailor-made rehabilitation approach using multiple types of hybrid assistive limb robots for acute stroke patients: A pilot study. *Assist Technol.* 2016; 28 (1): 53–6. DOI: 10.1080/10400435.2015.1080768. PMID: 26478988.
- Park JH, Park G, Kim HY, Lee JY, Ham Y, Hwang D, et al. A comparison of the effects and usability of two exoskeletal robots with and without robotic actuation for upper extremity rehabilitation among patients with stroke: a single-blinded randomised controlled pilot study. *J Neuroeng Rehabil.* 2020; 17 (1): 137. DOI: 10.1186/s12984-020-00763-6. PMID: 33076952. PMCID: PMC7574181.
- Xie L, Yoon BH, Park C, You JSH. Optimal intervention timing for robotic-assisted gait training in hemiplegic stroke. *Brain Sci.* 2022; 12 (8): 1058. DOI: 10.3390/brainsci12081058. PMID: 36009121. PMCID: PMC9405763.
- GOST R 51079-2006 (ISO 9999:2002). *Tekhnicheskie sredstva reabilitatsii lyudey s ogranicheniyami zhiznedeyatel'nosti.* Klassifikatsiya. M.: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2007; 114 p. Russian.
- GOST R 51819-2022. *Protezirovaniye i ortezirovaniye verkhnikh i nizhnikh konechnostey. Terminy i opredeleniya.* M.: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2022; 20 p. Russian.
- GOST R 59181-2022. *Sredstva individual'noy zashchity oporno-dvigatel'nogo apparata. Ekzoskelety promyshlennyye.* Klassifikatsiya. Terminy i opredeleniya. M.: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2022; 8 p. Russian.
- Zhang H, Li X, Gong Y, Wu J, Chen J, Chen W, et al. Three-Dimensional Gait Analysis and sEMG measures for robotic-assisted gait training in subacute stroke: a randomized controlled trial. *Biomed Res Int.* 2023; 2023: 7563802. DOI: 10.1155/2023/7563802. PMID: 37082189. PMCID: PMC10113045.
- Gassert R, Dietz V. Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: a neurophysiological perspective. *J Neuroeng Rehabil.* 2018; 15 (1): 46. DOI: 10.1186/s12984-018-0383-x. PMID: 29866106. PMCID: PMC5987585.

29. Baniqued PDE, Stanyer EC, Awais M, Alazmani A, Jackson AE, Mon-Williams MA, et al. Brain-computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review. *J Neuroeng Rehabil.* 2021; 18 (1): 15. DOI: 10.1186/s12984-021-00820-8. PMID: 33485365. PMCID: PMC7825186.
30. Du Plessis T, Djouani K, Oosthuizen C. A review of active hand exoskeletons for rehabilitation and assistance. *Robotics.* 2021; 10: 42. DOI: 10.3390/robotics10010040.
31. Sun Y, Yuntao T, Zheng J, Dong D, Chen X, Bai L. From sensing to control of lower limb exoskeleton: a systematic review. *Annual Reviews in Control.* 2022; 53. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2022.04.003.
32. Wu H, Li L, Li L, Liu T, Wang J. Review of comprehensive intervention by hand rehabilitation robot after stroke. *Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi.* 2019; 36 (1): 151–6. DOI: 10.7507/1001-5515.201711024. PMID: 30887790. PMCID: PMC9929888.
33. Spencer J, Wolf SL, Kesar TM. Biofeedback for post-stroke gait retraining: a review of current evidence and future research directions in the context of emerging technologies. *Front Neurol.* 2021; 12: 637199. DOI: 10.3389/fneur.2021.637199. PMID: 33859607. PMCID: PMC8042129.
34. Ang K, Chin Z, Zhang H, Guan C. Filter Bank Common Spatial Pattern (FBCSP) in brain-computer interface. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks; 2008 June 1–8; Hong Kong, China; p. 2390–7.* DOI: 10.1109/IJCNN.2008.4634130.
35. Osokin AA. Submodulyarnaya relaksatsiya v zadache minimizatsii energii markovskogo sluchaynogo polya [dissertation]. M., 2014. Russian.
36. Thomas BE, John SK, Abe S. Power Spectral Density (PSD) Computation using Modified Welsh Method. *Int J Sci Technol Engeneer.* 2015; 2 (4): 145–52.
37. Kostenko EV, Petrova LV, Pogonchenkova IV, Neprintseva NV, Shurupova ST, Kopysheva VD, et al. Innovative technologies and multimodal correction in medical rehabilitation of motor and neuropsychiatric disorders due to stroke. *Questions of balneology, physiotherapy and physical therapy.* 2022; 99 (6): 67–78. DOI: 10.17116/kurort20229906167. Russian.
38. Assis G, Brandao A, Corrêa AG, Castellano G. Characterization of functional connectivity in chronic stroke subjects after augmented reality training. *Virtual Worlds.* 2023; 2 (1): 1–15. DOI: 10.3390/virtualworlds2010001.
39. Sota K, Uchiyama Y, Ochi M, Matsumoto S, Hachisuka K, Domen K. Examination of factors related to the effect of improving gait speed with functional electrical stimulation intervention for stroke patients. *PM R.* 2018; 10 (8): 798–805. DOI: 10.1016/j.pmrj.2018.02.012. PMID: 29518588.
40. Jaqueline da Cunha M, Rech KD, Salazar AP, Pagnussat AS. Functional electrical stimulation of the peroneal nerve improves post-stroke gait speed when combined with physiotherapy. A systematic review and meta-analysis. *Ann Phys Rehabil Med.* 2021; 64 (1): 101388. DOI: 10.1016/j.rehab.2020.03.012. PMID: 32376404.
41. Cardoso LRL, Bochekezanian V, Forner-Cordero A, Melendez-Calderon A, Bo APL. Soft robotics and functional electrical stimulation advances for restoring hand function in people with SCI: a narrative review, clinical guidelines and future directions. *J Neuroeng Rehabil.* 2022; 19 (1): 66. DOI: 10.1186/s12984-022-01043-1. PMID: 35773733. PMCID: PMC9245887.
42. Zulauf-Czaja A, Al-Taleb MKH, Purcell M, Petric-Gray N, Cloughley J, Vuckovic A. On the way home: a BCI-FES hand therapy self-managed by sub-acute SCI participants and their caregivers: a usability study. *J Neuroeng Rehabil.* 2021; 18 (1): 44. DOI: 10.1186/s12984-021-00838-y. PMID: 33632262. PMCID: PMC7905902.
43. Meng Q, Zeng Q, Xie Q, Fei C, Kong B, Lu X, et al. Flexible lower limb exoskeleton systems: A review. *NeuroRehabilitation.* 2022; 50 (4): 367–90. DOI: 10.3233/NRE-210300. PMID: 35147568.
44. Hussain F, Goecke R, Mohammadian M. Exoskeleton robots for lower limb assistance: A review of materials, actuation, and manufacturing methods. *Proc Inst Mech Eng H.* 2021; 235 (12): 1375–85. DOI: 10.1177/09544119211032010. PMID: 34254562.
45. Su D, Hu Z, Wu J, Shang P, Luo Z. Review of adaptive control for stroke lower limb exoskeleton rehabilitation robot based on motion intention recognition. *Front Neurobot.* 2023; 17: 1186175. DOI: 10.3389/fnbot.2023.1186175. PMID: 37465413. PMCID: PMC10350518.
46. Klochkov AS, Zimin AA, Khizhnikova AE, Suponeva NA, Piradov MA. Effect of robot-assisted gait training on biomechanics of ankle joint in patients with post-stroke hemiparesis. *Bulletin of RSMU.* 2020; 5: 47–57. DOI: 10.24075/vrgmu.2020.066. Russian.
47. Suarez-Escobar M, Rendon-Velez E. An overview of robotic/mechanical devices for post-stroke thumb rehabilitation. *Disabil Rehabil Assist Technol.* 2018; 13 (7): 683–703. DOI: 10.1080/17483107.2018.1425746. PMID: 29334274.