

На правах рукописи

Трифонов Андрей Андреевич

**БИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ
РЕАБИЛИТАЦИИ С РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ УСТРОЙСТВОМ,
УПРАВЛЯЕМЫМ ПОСРЕДСТВОМ ДЕШИФРАЦИИ
ЭЛЕКТРОМИОСИГНАЛОВ**

Специальность 2.2.12. Приборы, системы и изделия
медицинского назначения
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2021

Работа выполнена в Юго-Западном государственном университете на кафедре биомедицинской инженерии

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Филист Сергей Алексеевич

Официальные оппоненты: **Чопоров Олег Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
Воронежский государственный технический университет, кафедра систем информационной безопасности, профессор (г. Воронеж)

Коржук Николай Львович,
кандидат технических наук, доцент,
Тульский государственный университет, кафедра приборов и биотехнических систем, профессор (г. Тула)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Волгоградский государственный технический университет**» (г. Волгоград)

Защита диссертации состоится «17» декабря 2021 года в 11⁰⁰ часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.029.03, созданного на базе Юго-Западного государственного университета, Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева, Белгородского государственного национального исследовательского университета, по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета и на сайте <https://swsu.ru/upload/iblock/c9f/u5obf60903riwaneo5cfnvucxwk3b23p/Dissertatsiya-Trifonov.pdf>

Автореферат разослан « » ноября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Милостная Наталья Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Моторная и сенсорная потеря или дисфункция, вызванные травмами головного мозга или неврологическими расстройствами, серьезно влияют на качество жизни и могут привести к неспособности выполнять простые повседневные дела. Эти нарушения также могут влиять на нижнюю конечность, нарушая, с разной степенью тяжести, сенсомоторные стратегии, используемые мозгом во время походки и контроля равновесия. При этом реабилитационные процедуры только примерно у 70% больных дают восстановление двигательных функций, достаточное для самостоятельного обеспечения их повседневных жизненных потребностей, остальные больные требуют постоянного ухода.

Одним из высокотехнологичных способов реабилитации нарушений двигательных функций является вертикализация, то есть переход из положения «сидя» в положение «стоя», с помощью экзоскелета. Клиническое применение вертикализации доказало высокую эффективность в проведении реабилитационной терапии при самых различных неврологических нарушениях.

При реабилитации целесообразен комбинированный режим управления экзоскелетом, при котором последний выступает в качестве ассистента (помощника). В этом случае необходима информация о состоянии пациента, которая бы позволила определить размер необходимой ему помощи при выполнении тестовых движений. Эта информация позволит управлять серводвигателями экзоскелета по командам, получаемым по результатам декодирования потенциалов двигательных единиц (ДЕ) – электромиографических сигналов (ЭМС). Таким образом, адаптация реабилитирующего экзоскелета к функциональному состоянию пациента посредством анализа и декодирования поверхностных ЭМС является актуальной и важной для практики задач.

Степень разработанности темы исследования. В последние десятилетия были разработаны инновационные роботизированные технологии, призванные эффективно помогать врачам в процессе нейрореабилитации. Тем не менее, большинство исследований в этой области было сосредоточено больше на разработке устройств, тогда как меньше усилий было направлено на максимизацию их эффективности для ускорения выздоровления.

Для повышения эффективности реабилитационных процедур используются дешифраторы сигналов центральной нервной системы (ЦНС), наиболее доступными из которых являются поверхностные ЭМС. Распознавание типа движения по ЭМС позволяет построить адаптивную системы управления экзоскелетом. Для стимуляции ЭМС создается стимулирующая виртуальная реальность (VR), которая возбуждает моторные нейроны, которые, в свою очередь, стимулируют потенциалы ДЕ мышц, адаптируемых к данной VR. Для этого создают базу данных тестовых движений (клиповых движений) и соответствующих им сигналов

потенциалов ДЕ.

По данным исследований, для классификации ЭМС применяются различные способы кодирования: спектральные коэффициенты, коэффициенты авторегрессии, вейвлет-коэффициенты. Однако, учитывая временные ограничения на дешифрацию команды, предпочтения отдаются способам кодирования ЭМС во временной области на основе анализа амплитуд сигналов. В качестве признаков используют следующие величины во временной области, измеренные как функции времени: интегральная ЭМГ; среднее арифметическое; среднее значение модуля; конечные разности; сумма элементарных площадей; дисперсия; среднееквадратичное отклонение; длина сигнала; максимальное значение ЭМГ-сигнала.

Основным требованием к медицинским экзоскелетам со стороны медицинского персонала является возможность их адаптации к конкретному пациенту. Однако на сегодняшний день нет эффективных алгоритмов, обеспечивающих адаптивное управление экзоскелетом в процессе вертикализации, поэтому вопросы адаптации системы управления экзоскелетом к пациенту требуют дальнейших исследований.

Таким образом, научно-технической задачей исследования является разработка биотехнической системы с робототехническим устройством с биотехническими и биологическими обратными связями для реабилитации постинсультных больных.

Цель работы. Повышение качества нейрофизиологической реабилитации постинсультных больных путем разработки биотехнической системы с робототехническим устройством с биотехническими и биологическими обратными связями.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ методов и средств нейрореабилитации постинсультных и посттравматических больных для биотехнических систем реабилитации с робототехническими устройствами.

2. Разработать метод дешифрации электромиосигналов, позволяющий адаптировать систему управления робототехнического реабилитационного устройства к функциональному состоянию пациента.

3. Разработать структурную схему биотехнической реабилитации в режиме «встать-сесть» с модулем нечеткого управления процессом реабилитации.

4. Разработать комплект алгоритмов для модулей нечеткого управления, предназначенных для управления процессом реабилитации постинсультных больных и позволяющих адаптировать программу реабилитации к функциональному состоянию пациента.

5. Разработать методы и алгоритмы вычисления мышечной силы и мышечной усталости по результатам анализа электромиосигналов.

6. Провести экспериментальные исследования по оценки эффективности биотехнической системы реабилитации с робототехническим устройством с нечетким модулем управления на постинсультных больных.

Научная новизна. В работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Метод дешифрации электромиосигналов, *закрывающийся* в считывании поверхностного электромиосигнала; его пошаговой сегментации на пересекающиеся или на не пересекающиеся окна; формирования для каждого сегмента, полученного на предыдущем шаге, набора дескрипторов, передаче набора дескрипторов каждого сегмента по каналу передачи данных на классификатор, осуществляющий управление контроллером серводвигателей, который выполнен в виде обучаемой нейронной сети; *отличающийся* тем, что формирование вектора информативных признаков для нейронной сети осуществляют посредством многоуровневого компаратора, число уровней которого определяется размерностью вектора дескрипторов, а компоненты вектора дескрипторов определяются путем усреднения выходов компараторов в скользящем окне, а в классификаторе используется вторая нейронная сеть, предназначенная для обобщения данных, получаемых при классификации вектора дескрипторов текущего окна, число входов которой определяется числом окон электромиосигнала, используемых классификатором при принятии решения о включении/выключении соответствующего серводвигателя, позволяющий адаптировать процесс управления процедурой реабилитации под функциональное состояние пациента.

2. Биотехническая система с робототехническим устройством реабилитации в режиме «встать-сесть», управление которым основано на анализе и классификации электромиосигналов, отличающаяся наличием трёх модулей нечёткого управления, позволяющая поддерживать три режима реабилитации и выбирать и переключать их в зависимости от функционального состояния пациента, тем самым подбирая оптимальный режим реабилитации для текущего функционального состояния пациента.

3. Метод оценки мышечной усталости, заключающийся в получении двух электромиосигналов пациента с мышц-синергистов, принимающих участие в реабилитационной процедуре, получении двух паттернов мышечной синергии и последующей их классификации для формирования управляющих команд серводвигателей экзоскелета, отличающийся тем, что паттерны мышечной синергии формируются посредством образования в каждом канале электромиосигнала частотного и амплитудного подканалов и определения показателя корреляции сигналов в частотных подканалах всех каналов электромиосигналов и показателя корреляции сигналов в амплитудных подканалах всех каналов электромиосигналов, и классификацией полученных паттернов синергии посредством блока нечеткого логического вывода, по результатам которой принимается решение о включении соответствующих серводвигателей экзоскелета с целью оказания помощи пациенту при выполнении реабилитационной процедуры.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что изложенные методы и алгоритмы построения и функционирования биотехнической реабилитационной системы с робототехническим устройством, управление которым осуществляется посредством модуля нечеткого управления с биотехническими и биологическими обратными связями, что позволило адаптировать процедуру реабилитации к функциональному состоянию пациента. Разработанные методы и алгоритмы составили основу биотехнической системы реабилитации постинсультных больных. Применение предложенных в диссертации методов и алгоритмов управления реабилитацией позволит использовать интерфейсы мозг-компьютер в программах нейрореабилитации и социальной реабилитации лиц с ограниченными возможностями здоровья.

Работа выполнена при поддержке РФФИ научный проект № 19-38-90112, регистрационный номер НИОКТР АААА-А19-119110190061-6 (2020-2021гг.) и в соответствии с научным направлением Юго-Западного государственного университета «Разработка медико-экологических информационных технологий».

Результаты диссертационной работы внедрены в учебном процессе Юго-Западного государственного университета при подготовке магистров по направлению подготовки 12.04.04 – Биотехнические системы и технологии, и прошли испытание в отделении медицинской реабилитации клинического научно-медицинского центра «Авиценна», г. Курск.

Методы и средства исследований. Для решения поставленных задач использовались теория биотехнических систем медицинского назначения, математический аппарат цифровой обработки сигналов, статистический анализ, теория нейронных сетей, теория нечеткого управления, методы экспертного оценивания и принятия решений. При разработке модулей классификации электромиосигналов и нечетких модулей управления экзоскелетом в качестве инструментария использовался MATLAB 2018b с графическим интерфейсом пользователя для Neural Network Toolbox и со встроенным пакетом Fuzzy Logic Toolbox.

Положения, выносимые на защиту. 1. Метод дешифрации электромиосигналов, построенный на основе трансформации одномерного вектора электромиосигнала в множество векторов дескрипторов, классификации этих векторов и последующей агрегацией решений классификаторов, позволяет адаптировать процесс управления процедурой реабилитации под функциональное состояние пациента и тем самым повысить эффективность реабилитации посредством робототехнического устройства. 2. Биотехническая система с робототехническим устройством реабилитации, управление которым осуществляется посредством модуля нечёткого управления, поддерживающего три режима реабилитации и выбирающего их в зависимости от функционального состояния пациента, позволяет повысить эффективность реабилитации по критерию максимумов составляющей опорной реакции R_z , как для подострых, так и для хронических постинсультных больных, до 20% по отношению к контрольной

группы пациентов, при реабилитации которых не использовалось адаптивное управление робототехническим устройством. 3. Метод оценки мышечной усталости, заключающийся в получении двух паттернов мышечной синергии и последующей их классификации для формирования управляющих команд серводвигателей экзоскелета, позволяет принимать управленческие решения о включении соответствующих серводвигателей экзоскелета с целью оказания помощи пациенту при выполнении реабилитационной процедуры.

Степень достоверности и апробация работы. Результаты исследования показали их воспроизводимость в различных условиях, непротиворечивость концепциям теории цифровой обработки и классификации электрофизиологических сигналов, а так же аналогичным результатам, полученным другими исследователями. Методы и алгоритмы классификации электромиосигналов построены на теории цифровой обработки сигналов и согласуются с ранее опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 14 международных и всероссийских конференциях: Горизонты биофармацевтики (Курск - 2019); Энергосбережение и эффективность в технических системах (Тамбов – 2019); «Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века» (Пермь –2019, 2020); «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (Владимир - Суздаль – 2020); “Zavalishin’s Readings” ER(ZR) (Уфа - 2020); «Цифровая трансформация в энергетике» (Тамбов – 2020); «Нейроинформатика, её приложения и анализ данных» (Красноярск – 2020); 14th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (Ташкент – 2020); «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте» (Новороссийск – 2020); «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы (Биомедсистемы)» (Рязань – 2020); «Медико-экологические информационные технологии» (Курск –2020); «Интеллектуальные информационные системы» (Воронеж - 2021), «Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития» (Тамбов -2021), на научно-технических семинарах кафедры биомедицинской инженерии ЮЗГУ (Курск –2018, 2019, 2020, 2021).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 19 научных работах, включающих 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников, включающего 39 отечественных и 64 зарубежных наименований. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 44 рисунка и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, определяются цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В первом разделе рассмотрены принципы построения и тенденции развития биотехнических систем с роботизированными устройствами для реабилитации постинсультных и посттравматических больных. Показано, что используемые в настоящее время биотехнические системы реабилитационного типа с робототехническими устройствами позволяют существенно повысить эффективность этого процесса. Выполненный аналитический обзор показал, что, несмотря на многочисленные исследования в области использования робототехнических устройств в процессе реабилитации лиц с ограниченными возможностями здоровья, достижения в этой области не удовлетворяют практикующих специалистов. Характерным недостатком известных методов и моделей реабилитации является отсутствие контроля влияния процесса реабилитации на текущее функциональное состояние пациента. Показано, что для повышения эффективности реабилитационного процесса необходимы биотехнические и биологические обратные связи, позволяющие адаптировать программу реабилитации к текущему функциональному состоянию пациента.

В заключение первого раздела формируются цель и задачи исследования.

Второй раздел посвящен разработке методов декодирования электрофизиологических сигналов двигательных единиц в системах управления экзоскелетами с виртуальной реальностью.

Разработан метод дешифрации электромиосигналов, *закрывающийся* в получении, по меньшей мере, одного ЭМГ сигнал пациента посредством миоэлектрического устройства считывания; обработку, по меньшей мере, одного ЭМГ-сигнала пациента посредством пошаговой сегментации ЭМГ-сигнала на пересекающиеся или на не пересекающиеся окна; формирования для каждого сегмента, полученного на предыдущем шаге, набора признаков ЭМГ-сигнала (вектора информативных признаков); передаче набора признаков ЭМГ-сигнала каждого сегмента по каналу передачи данных на классификатор, осуществляющий управление контроллером серводвигателей, который выполнен в виде обучаемой нейронной сети; *отличающийся* тем, что формирование вектора информативных признаков для нейронной сети осуществляют посредством многоуровневого компаратора, число уровней которого определяется размерностью вектора информативных признаков, определяемых путем усреднения выходов компараторов в скользящем окне, а в классификаторе используется вторая нейронная сеть, предназначенная для обобщения данных, получаемых при классификации вектора информативных признаков текущего окна, число входов которой определяется числом окон ЭМГ, используемых при принятии решения о включении/выключении соответствующего серводвигателя.

В предлагаемый метод дешифрации электромиосигналов, позволяющий минимизировать ошибки при позиционировании экзоскелета, состоит из следующих этапов:

- получение, по меньшей мере, одного ЭМГ сигнала пациента посредством миоэлектрического устройства считывания;
- обработка, по меньшей мере, одного ЭМГ-сигнала пациента посредством сегментации ЭМГ-сигнала на пересекающиеся или на не пересекающиеся окна;
- формирование для каждого сегмента, полученного на предыдущем шаге, набора признаков ЭМГ-сигнала (вектора информативных признаков) посредством многоуровневого компаратора, число уровней которого определяется размерностью вектора информативных признаков, а компоненты вектора информативных признаков вычисляются согласно выражению

$$FD_i = \frac{1}{TW} \sum_{\tau=1}^{TW} y_{\tau}, \quad (1)$$

где TW -ширина окна в отсчетах,

i – й номер уровня компаратора, $i = \overline{1, N}$;

τ -номер отсчета в i -м окне;

$$y_{\tau} = \begin{cases} 1, & \text{если } |x_{\tau}| \geq \Theta_i; \\ 0, & \text{если } |x_{\tau}| < \Theta_i; \end{cases} \quad (2)$$

Θ_i – величина i -го порога;

- передача набора признаков ЭМГ-сигнала каждого сегмента по каналу передачи данных на обучаемый классификатор, выполненный в виде нейронной сети, осуществляющий управление контроллером серводвигателей, в котором используется вторая НС, предназначенная для обобщения данных, получаемых при классификации вектора информативных признаков текущего окна, число входов которой определяется числом окон ЭМГ-сигнала, используемых при принятии решения о включении/выключении соответствующего серводвигателя.

Структурная схема дешифратора электромиосигналов для одного канала ЭМГ, которая реализована в бортовом процессоре на аппаратно-программном уровне, представлена на рисунке 1.

Сущность метода заключается в сегментации текущего сигнала ЭМГ на пересекающиеся или не пересекающиеся окна шириной TW с последующим формированием из отсчетов каждого окна информативного признака FD . С этой целью осуществляют переход от текущего дискретного отсчета ЭМГ x_{τ} к отсчету y_{τ} , получаемому путем сравнения текущего отсчета

с порогом Θ и вычисляемому согласно выражению (2.2). На основе отсчетов (2.2) вычисляют информативный признак в окне TW по формуле (2.1).

С целью адаптации процесса вертикализации к ФС пациента, в дешифраторе используются множество дублирующих каналов ЭМГ-сигналов, связанных с мышцей или группами мышц, контролирующих движение одного и того же сустава конечностей, в результате чего на выходе классификатора каждого канала получаем число, соответствующее уверенности в команде на вращение серводвигателя экзоскелета, а для агрегации решений по каналам классификаторов все выходы классификаторов каналов поступают на нечеткую нейронную сеть, дефuzziфикатор которой формирует управляющий сигнал на контроллер серводвигателя, в результате анализа которого контроллер определяет скорость и направление вращения.

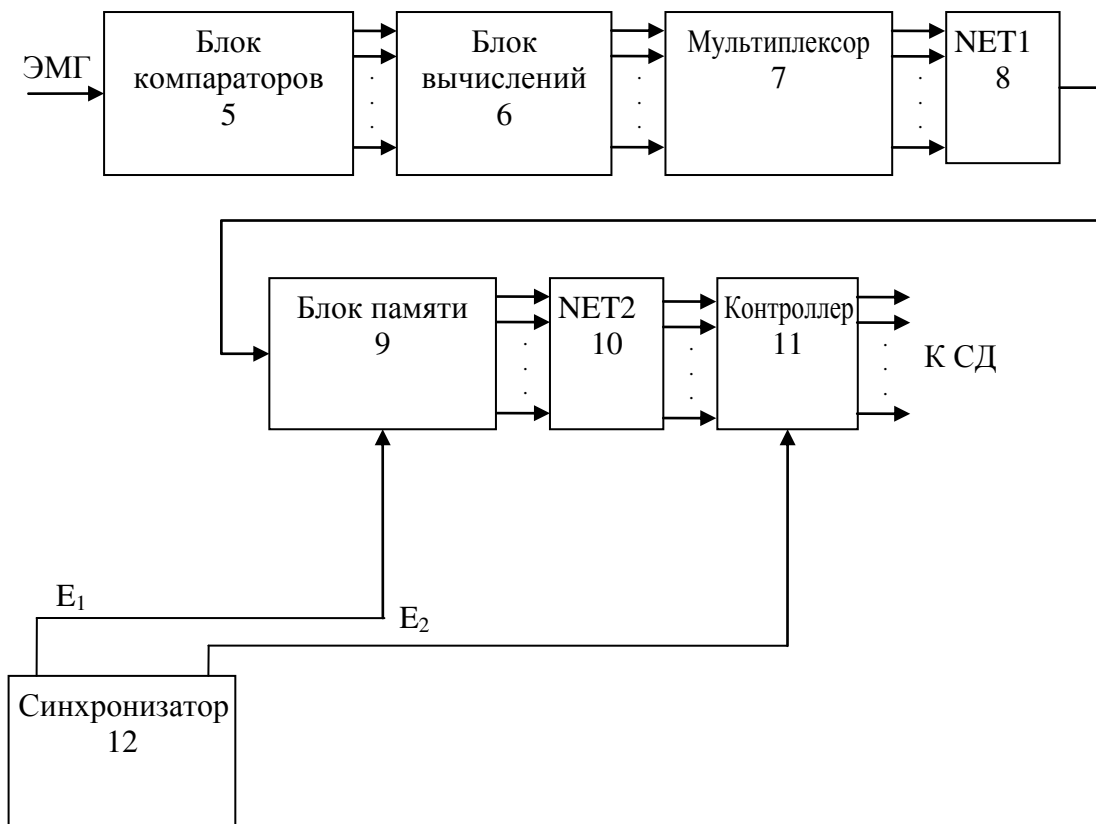


Рисунок 1– Структурная схема классификатора для одного канала электромиограммы

Устройство управления серводвигателями экзоскелета содержит последовательно соединенные миоэлектродное устройство считывания, блок обработки ЭМГ-сигнала, бортовой процессор, осуществляющий дешифрацию электромиосигналов посредством нейросетевого классификатора, и контроллер серводвигателей, отличающееся тем, что дешифратор электромиосигналов включает последовательно соединенные блок компараторов, блок вычисления информативных признаков, мультиплексор, первую нейронную сеть, блок памяти и вторую нейронную

сеть, выходы которой предназначены для подключения к контроллеру серводвигателей, и синхронизатор, выходом подключенный к входам управления мультиплексора, блока памяти и контроллера серводвигателей. В устройство введены дополнительные каналы, каждый из которых является классификатором ЭМГ-сигнала, связанного с определенной мышцей или группой мышц, контролирующей движение одного и того же сустава конечностей, и третья нейронная сеть, входами подключенная к выходам канальных классификаторов, а выходом - к контроллеру серводвигателей.

Разработан классификатор электромиосигналов, отличающийся использованием множества дублирующих каналов ЭМГ-сигналов, связанных с мышцей или группами мышц, контролирующей движение одного и того же сустава конечностей, в результате чего на выходе классификатора каждого канала получаем число, соответствующее уверенности в команде на вращение серводвигателя экзоскелета, все выходы классификаторов каналов поступают на нечеткую нейронную сеть, дефузификатор которой формирует управляющий сигнал на контроллер серводвигателя, в результате анализа которого контроллер определяет скорость и направление вращения. При этом по желанию ЛПР при классификации ЭМГ-сигнала на каждом шаге принятия решений данные с первой нейронной сети обновляются полностью, или обновляется только тот выход нейронной сети, который пришел первым, а все остальные компоненты вектора информативных признаков второй нейронной сети сдвигаются на один шаг.

В ходе работы написано программное приложение, способное управлять экзоскелетом при помощи анализа кодовых образов ЭЭГ. Его применение позволило сделать вывод, что предложенный метод может быть альтернативой ИМК, использующих довольно длительное обучение по биологической обратной связи, обеспечивает формирование дискретных управляющих команд и требует минимального времени обучения при достаточно высокой производительности.

В третьем разделе осуществлена разработка методов и моделей для биотехнических систем реабилитационного типа для восстановления двигательных функций.

Предложена структурно-функциональная модель биотехнической системы, предназначенной для реабилитации пациентов с нарушениями ДФ. Структурно-функциональная модель включает пациента, экзоскелет, систему управления экзоскелетом и блок виртуальной реальности. Модель отличается наличием комбинированных обратных связей, включающих биотехнические обратные связи, позволяющие осуществлять интерактивное управление звеньями экзоскелета, и биологические обратные связи, позволяющие связать программы реабилитации и функциональные системы пациента.

Разработана структурно-функциональная модель управления экзоскелетом в режиме «встать-сесть», предназначенная для биотехнической

системы реабилитации постинсультных больных, включающая три модуля нечёткого управления, первый из которых предназначен для реабилитации пациентов, у которых сигналы ЦНС не подходят на двигательные единицы (БОС не используется), второй режим предполагает тренинг, посредством виртуальной реальности, и третий режим предполагает работу экзоскелета в качестве ассистента при наличии мышечной усталости.

Структурная схема БТС реабилитации в режиме «встать-сесть» представлена на рисунке 2. Для управления экзоскелетом в режиме «встать-сесть» используется три модуля нечёткого управления (МНУ), активация каждого из которых определяется программой реабилитации. Каждый МНУ соответствует определённой программе реабилитации.

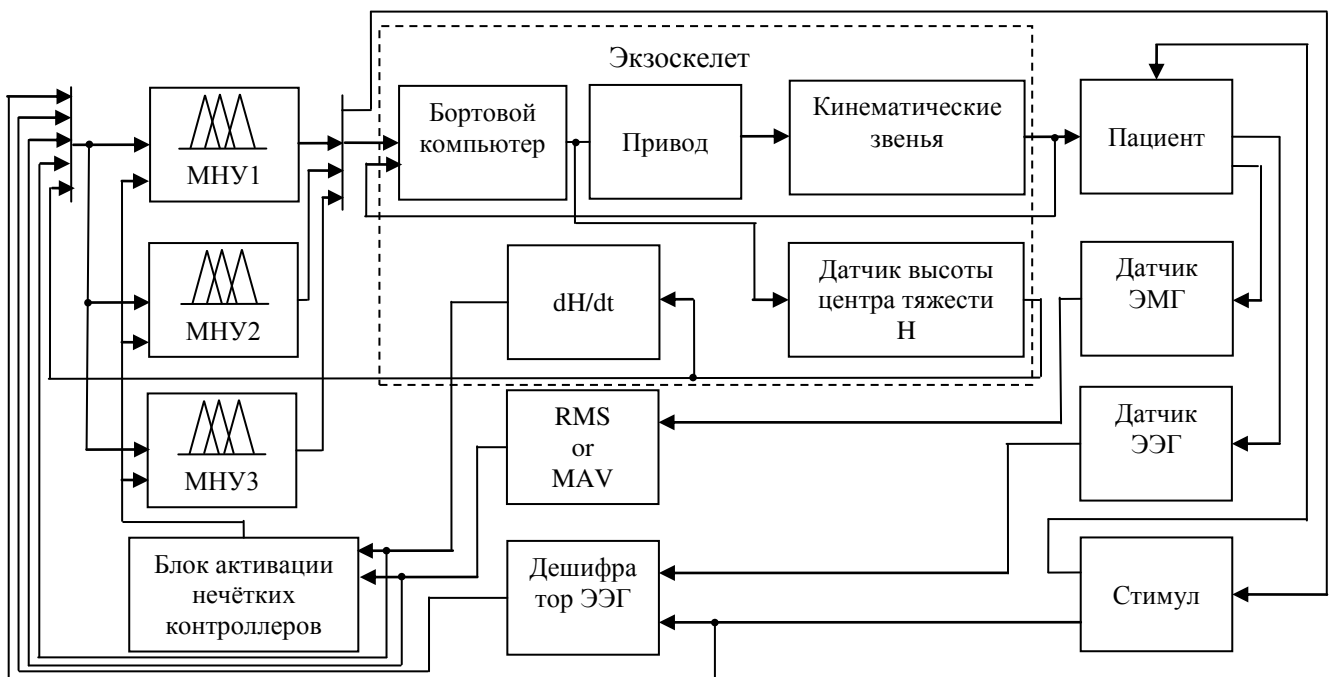


Рисунок 2 – Структурная схема биотехнической системы реабилитации в режиме «встать-сесть»

Разработан комплект алгоритмов для модулей нечеткого управления, предназначенных для управления процессом реабилитации постинсультных больных, включающий три автономных структурно-функционально связанных алгоритма, предназначенных для осуществления трех режимов реабилитации, позволяющий адаптировать программу реабилитации к функциональному состоянию пациента.

Разработана база знаний нечётких решающих правил для модуля нечёткого управления, структурированная согласно комплекту алгоритмов модуля нечеткого управления, позволяющая формировать управляющие сигналы на серводвигатели экзоскелета в трех режимах работы модуля нечеткого управления.

Разработан метод оценки мышечной усталости, заключающийся в получении двух электромиосигналов пациента с мышц-синергистов,

принимающих участие в реабилитационной процедуре, получении двух паттернов мышечной синергии и последующей их классификации для формирования управляющих команд серводвигателей экзоскелета, отличающийся тем, что паттерны мышечной синергии формируются посредством образования в каждом канале электромиосигнала частотного и амплитудного подканалов и определения показателя корреляции сигналов в частотных подканалах всех каналов электромиосигналов и показателя корреляции сигналов в амплитудных подканалах всех каналов электромиосигналов, и классификацией полученных паттернов синергии посредством блока нечеткого логического вывода, по результатам которой принимается решение о включении соответствующих серводвигателей экзоскелета с целью оказания помощи пациенту при выполнении реабилитационной процедуры.

Сущность метода заключается в получении двух паттернов мышечной синергии и их анализа, с последующей передачей результатов анализа в бортовой процессор экзоскелета. Устройство, реализующее этот метод, состоит из, не менее двух, миоэлектронных устройств считывания, и последовательно соединенных микроЭВМ, аналоговыми входами подключенной к выходам миоэлектронных устройств считывания, адаптера Bluetooth, адаптера Bluetooth, ЭВМ и бортового процессора экзоскелета.

В результате амплитудного и частотного детектирования канальных ЭМГ в блоках миоэлектронного считывания, образуются четыре подканала, сигналы в которых оцифровываются в микроЭВМ и через Bluetooth передаются в ЭВМ, в которой осуществляется их программная обработка в блоке нечеткого логического вывода, структурно-функциональная схема которого представлена на рисунке 3.

Цифровые сигналы $x_{a1}[t_i]$ и $x_{a2}[t_i]$ с подканалов амплитудных детекторов миоэлектронных устройств считывания 1 и 2 и цифровые сигналы $x_{c1}[t_i]$ и $x_{c2}[t_i]$ с подканалов частотных детекторов миоэлектронных устройств считывания 1 и 2 поступают на соответствующие входы блока корреляционных детекторов 17 блока нечеткого логического вывода 16, включающего умножители 18 и 19 и фильтры скользящего среднего 20 и 21. В результате на выходе блока корреляционных детекторов формируются два паттерна сигналов синергии

$$y_1[t_n] = \frac{1}{N} \sum_{i=n}^{n+N-1} x_{a1}[t_i] \cdot x_{a2}[t_i], \quad (3)$$

$$y_2[t_n] = \frac{1}{N} \sum_{i=n}^{n+N-1} x_{c1}[t_i] \cdot x_{c2}[t_i], \quad (4)$$

где N -ширина окна фильтров скользящего среднего 20, 21, n – текущий отсчет времени, i -апостериорные отсчеты времени.

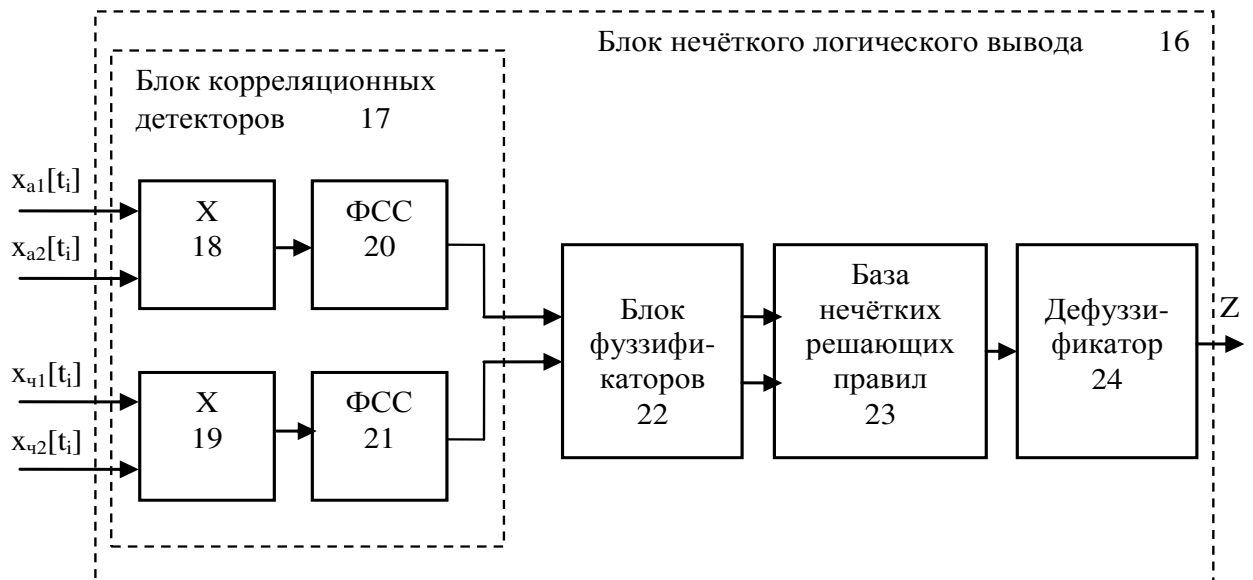


Рисунок 3 - Структурная схема блока нечёткого логического вывода

Два паттерна сигналов синергии поступают на вход фуззификатора, где они преобразуются, согласно нелинейным преобразованиям (функциям принадлежности). Число преобразований определяется числом нечетких термов для паттернов синергии.

Таким образом, разработанный метод позволяет управлять механическими моментами на серводвигателях экзоскелета адекватно тестовой мышечной нагрузки и функционального состояния мышц оператора. Метод позволяет осуществлять индивидуальную настройку блока нечеткого логического вывода и оптимизировать комбинированный режим работы экзоскелета.

В четвертом разделе описаны эксперименты по определению эффективности биотехнической системы реабилитации с модулем нечеткого управления. Для проведения экспериментальных исследований разработана структурная схема реабилитационной биотехнической системы с виртуальной реальностью, позволяющая модулю нечеткого управления осуществлять биологическую обратную связь путем сопоставления стимулирующих сигналов виртуальной реальности, электроэнцефалографических сигналов и электромиосигналов.

Предложена рекурсивная математическая модель планирования процедур реабилитации с использованием биологической обратной связи, основанная на понятии функций «обучения» и «забывания», позволяющая планировать сеансы тренинга и прогнозировать их результаты.

Разработано аппаратное и программное обеспечение биотехнической системы реабилитации постинсультных больных с модулем нечеткого управления экзоскелетом, позволяющее адаптировать программу реабилитации постинсультных больных с функциональным состоянием конкретного пациента.

Разработано программное обеспечение, реализующее методику прогнозирования эффективности реабилитационных процедур и позволяющее выбрать интервал между окончанием текущего курса и началом следующего с предсказанием базового уровня РФП.

Сформирована экспериментальная группа для оценки эффективности БТС-тренинга постинсультных больных с паретичными нижними конечностями. Контрольная группа формировалась виртуально на основе статистического анализа ретроспективных стратифицированных результатов реабилитации постинсультных больных посредством биотехнической системы с робототехническим устройством без использования модуля нечеткого управления.

На рисунке 4 показаны усредненные по группам сила реакции опоры до курса тренировок в экзоскелете и после тренировок в экспериментальной и контрольной группах. На паретичной ноге до тренировок среднее значение составляло только 60% от веса тела при норме 110. После курса тренировок в экзоскелете (два верхних графика) величины сил реакции выросла, что можно наблюдать по усредненным графикам до и после курса. В целом ходьба стала более энергичной и симметричной, о чем свидетельствуют увеличенные реакции опоры 1, 3 по сравнению с кривыми до курса 2.

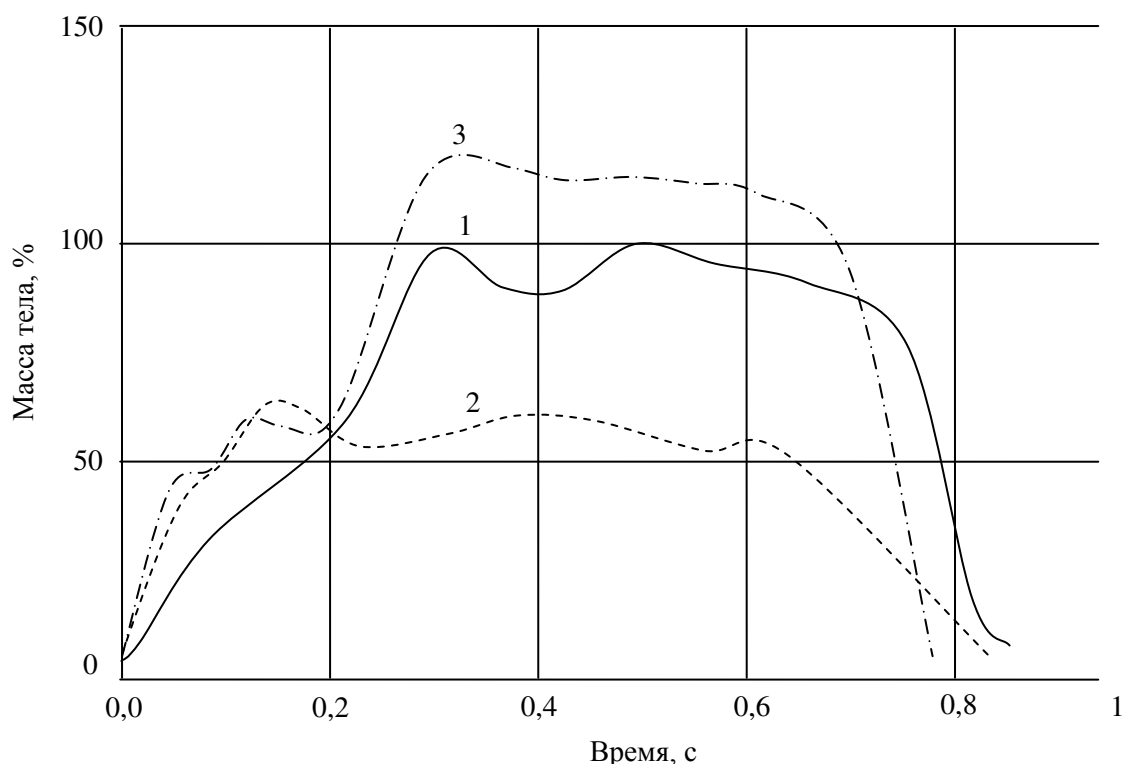


Рисунок 4 - Усредненные силы реакции опоры паретичной ноги (линия 2) и после (линия 1 – без использования адаптационных механизмов, 3 с использованием модуля нечеткого управления) курса реабилитации в экзоскелете

После курса тренировки отмечается значительное увеличение максимумов кривой Rz на пораженной ноге в экспериментальной группе по отношению к контрольной группе. Соответственно, амплитуда переднего толчка в экспериментальной группе возрастает на 62% (120%), заднего толчка – на 58% (115%), в то время как в контрольной группе прирост амплитуды составляет соответственно 40% (101%) и 41% (105%). При этом на паретичной ноге возникают отчетливые максимумы составляющей опорной реакции Rz. Однако форма кривой реакции опоры на левой ноге еще требует корректировки, поскольку не имеет отчетливой двугорбой формы.

Одиннадцать хронических пациентов были обследованы в t₀, t₁ и t₂. Пациенты с хроническим инсультом не так положительно реагируют на БТС-тренинг, как пациенты в подострой форме. В нашем исследовании статистическое улучшение функциональных способностей наблюдалось и у пациентов с подострым, и у пациентов с хроническим инсультом.

Результаты тренинга для хронических пациентов показали значительное увеличение максимумов кривой Rz на пораженной ноге в экспериментальной группе по отношению к контрольной группе. Соответственно, амплитуда переднего толчка в экспериментальной группе возрастает на 56% (120%), заднего толчка – на 52% (115%), в то время как в контрольной группе прирост амплитуды составляет соответственно 40% (101%) и 45% (105%). При этом на паретичной ноге возникают отчетливые максимумы составляющей опорной реакции Rz. Данная кривая приобретает двугорбую форму, практически исчезает динамическая асимметрия. Последнее означает, что фактически невозможно определить по динамическим параметрам, какая нижняя конечность является более пораженной.

Таким образом, исследование показало, что можно изменить показатели клинического исхода у пациентов с подострым и хроническим течением инсульта после 12 сеансов БТС-тренинга. Биотехническая система с нечетким управлением робототехническим устройством позволяет осуществлять индивидуальную стратегию реабилитации постинсультных больных (включая целенаправленную тренировку ходьбы).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты.

1. Проведен анализ методов и средств нейрореабилитации постинсультных больных в биотехнических системах, который показал, что повышение эффективности использования робототехнических устройств в реабилитационных процедурах требует адаптации управления робототехническим устройством к функциональному состоянию пациента.

2. Разработан метод дешифрации электромиосигналов, позволяющий адаптировать систему управления робототехнического реабилитационного устройства к функциональному состоянию пациента.

3. Предложена структурно-функциональная модель биотехнической системы, предназначенной для реабилитации пациентов с нарушениями двигательных функций. Структурно-функциональная модель включает пациента, экзоскелет, систему управления экзоскелетом и блок виртуальной реальности. Модель включает биотехнические обратные связи, позволяющие осуществлять интерактивное управление звеньями экзоскелета, и биологические обратные связи, позволяющие связать программы реабилитации и функциональные системы пациента.

4. Разработана структурно-функциональная модель управления экзоскелетом в режиме «встать-сесть», предназначенная для биотехнической системы реабилитации постинсультных больных, включающая три модуля нечёткого управления, первый из которых предназначен для реабилитации пациентов, у которых сигналы ЦНС не подходят на двигательные единицы (БОС не используется), второй режим предполагает тренинг, посредством виртуальной реальности, и третий режим предполагает работу экзоскелета в качестве ассистента при наличии мышечной усталости.

5. Разработаны комплект алгоритмов и базы знаний нечетких решающих правил для модулей нечеткого управления, предназначенных для управления процессом реабилитации постинсультных больных, и позволяющие адаптировать программу реабилитации к функциональному состоянию пациента.

6. Разработаны методы и алгоритмы вычисления мышечной силы и мышечной усталости по результатам анализа электромиосигналов, позволяющие осуществлять адаптивное управления серводвигателями робототехнического устройства биотехнической системы и поддерживать моменты на соответствующих звеньях робототехнического устройства в соответствии с мышечным тонусом пациента.

7. Проведена апробация предложенных методов, моделей и алгоритмов для биотехнической системы реабилитации постинсультных больных, которая показала, что предложенные в диссертационной работе технические и алгоритмические решения по адаптации процедуры реабилитации и функционального состояния пациента позволяют повысить эффективность реабилитации по критерию максимумов составляющей опорной реакции R_z , как для подострых, так и для хронических постинсультных больных, до 20% по отношению к контрольной группы пациентов, при реабилитации которых не использовалось адаптивное управление робототехническим устройством.

Рекомендации. Результаты исследования могут быть использованы для построения биотехнических систем с робототехническими устройствами при реабилитации пациентов с разной степенью нарушения двигательных функций.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Разработка биотехнических систем реабилитации лиц с ограниченными возможностями здоровья, позволяющих контролировать функциональное состояние пациента и корректировать процедуру реабилитации в соответствии с его динамикой.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

Минобрнауки России

1. Филист, С.А. Кодовые образы сигналов электроэнцефалограммы для управления робототехническими устройствами посредством интерфейса мозг-компьютер/ С.А. Филист, Е.В. Петрунина, **А.А. Трифонов**, А.В. Серебровский//Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал. – 2019. – Том 7. № 1. – С. 67-79. <http://moit.vivt.ru/>. doi: 10.26102/2310-6018/2019.24.1.025.

2. **Трифонов, А.А.** Биотехническая система с виртуальной реальностью в реабилитационных комплексах с искусственными обратными связями/ А.А. Трифонов, Е.В. Петрунина, С.А. Филист, А.А. Кузьмин, В.В. Жилин// Известия ЮЗГУ. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2019. – Т.9. № 4 – С.46-66.

3. **Трифонов, А.А.** Двухуровневая нейросетевая модель дешифратора электромиосигнала в системе управления вертикализацией экзоскелета/ А.А. Трифонов, С.А. Филист, А.А. Кузьмин, В.В. Жилин, Е.В. Петрунина//Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 4 (52) – С.99-111.

Публикации в изданиях, индексируемых в международной научометрической базе Scopus

4. **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). Ufa, Russia, 2020. – P. 237-247.

5. **Trifonov, A.A.** Neural network model in the exoscelete verticalization control system/ A A Trifonov, A A Kuzmin, S A Filist and E V Petrunina//Journal of Phisics: Conference Series/ 1679(2020) 032036.

6. **Trifonov, A.A.** Biotechnical System for Control to the Exoskeleton Limb Based on Surface Myosignals for Rehabilitation Complexes/ A A Trifonov, A A Kuzmin, S A Filist // Conference: IEEE 14th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). 2020. DOI:10.1109/AICT50176.2020.9368588.

Статьи и материалы конференций

7. **Трифонов А.А.** Современные биотехнические системы и методы двигательной реабилитации //В сборнике: Горизонты биофармацевтики сборник научных трудов по материалам V Международной научно-практической молодежной конференции. Курский государственный медицинский университет. – Курск: КГМ, 2019. – С. 108-111.

8. **Трифонов, А.А.** Метод дешифрации электроэнцефалограммы для управления робототехническими устройствами посредством интерфейса мозг-компьютер / А.А. Трифонов, О.Н. Гридасов, А.В. Серебровский // Энергосбережение и эффективность в технических системах: материалы VI Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Тамбов, 2019. – С.371-372.

9. Петрунина, Е.В. Модель формирования функциональных систем при бос-тренинге студентов с ограниченными возможностями здоровья/ Е.В. Петрунина, **А.А. Трифонов**, О.В. Шаталова// Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века: сборник статей по материалам Четвертой всерос. научн.-практ. конф. – Пермь, 2019. – 36-41.

10. **Трифонов, А.А.** Реабилитационная биотехническая система с электромиографическим контуром управления/ А.А. Трифонов, А.А. Кузьмин, М.Б. Мяснянкин, С.А. Филист // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2020: труды XIV Международной научной конференции. – Владимир-Суздаль, 2020. – С.128-133.

11. **Трифонов, А.А.** Биотехническая система управления экзоскелетом / А.А. Трифонов // Цифровая трансформация в энергетике: материалы Всероссийской научной конференции. – Тамбов: ТГТУ, 2020. – С.387-390.

12. **Трифонов, А.А.** Биотехническая система реабилитационного типа для восстановления двигательной активности / А.А. Трифонов // Медико-экологические информационные технологии-2020: сборник научных статей по материалам XIX Международной научно-технической конференции – Курск: ЮЗГУ, 2020. – С. 87-91.

13. **Трифонов А.А.** Нейросетевая модель дешифратора электромиосигнала с датчиком мышечной нагрузки/ А.А. Трифонов // Интеллектуальные системы в науке и технике: сборник статей по материалам Международной конференции. – Пермь, 2020. – С. 549-557.

14. **Трифонов, А.А.** Нейросетевая модель для управления вертикализацией экзоскелета в комбинированном режиме/А.А. Трифонов, А.А. Кузьмин, С.А. Филист, Е.В. Петрунина// Нейроинформатика, её приложения и анализ данных: материалы XXVIII Всероссийского семинара. – Красноярск. 2020. – С.110-115.

15. **Трифонов, А.А.** Нейросетевые модели формирования команд управления в биотехнической системе реабилитационного типа/ А.А. Трифонов, М.Б. Мяснянкин, С.А. Филист // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте: труды XXVIII Международной конференции. – Новороссийск, 2020. – С. 184-188.

16. **Трифонов, А.А.** Метод дешифрации электромиосигналов для биотехнической системы реабилитационного типа / А.А. Трифонов // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы (Биомедсистемы-2020): сборник

трудов XXXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2020. – С. 35-38.

17. **Трифонов, А.А.** Виртуальная реальность в реабилитационных комплексах с искусственными обратными связями / А.А. Трифонов, С.А. Филист, А.А. Кузьмин, М.Б. Мяснянкин // Интеллектуальные информационные системы: сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Воронеж: Издательство ВГТУ, 2021. – Ч. 2. – С. 98-102.

18. **Трифонов, А.А.** Средства оценки мышечной нагрузки и мышечного утомления для управления экзоскелетом в комбинированном режиме / А.А. Трифонов, А.А. Кузьмин, Е.В. Петрунина, С. Кадырова // Лазеры. Измерения. Информация. – 2021. – Т.1, № 1. – С. 55-66.

19. **Трифонов, А.А.** Беспроводная система регистрации сигналов электромиограммы для биотехнических систем реабилитационного типа / А.А. Трифонов, А.А. Кузьмин, А.В. Павленко // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития: сборник трудов Шестой Всероссийской молодежной научной конференции, посвященной Дню Радио. – Тамбов: ТГТУ, 2021. – С. 356-360.