

На правах рукописи



Ашапкина Мария Сергеевна

СПОСОБ И СИСТЕМА СОПРОВОЖДЕНИЯ
ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ
ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Специальность: 2.2.12. Приборы, системы и изделия
медицинского назначения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2023 г.

Работа выполнена на кафедре информационно-измерительной и биомедицинской техники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО «РГРТУ»).

Научный руководитель: **Мельник Ольга Владимировна**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «РГРТУ», профессор кафедры
информационно-измерительной и
биомедицинской техники, г. Рязань

Официальные оппоненты: **Лебедев Георгий Станиславович**,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Первый Московский
государственный медицинский университет
имени И.М. Сеченова» Минздрава России
(Сеченовский Университет),
директор Института цифровой медицины,
заведующий кафедрой информационных и
интернет-технологий, г. Москва

Бабич Михаил Владимирович,
кандидат технических наук,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»,
доцент кафедры радиоэлектроники и
телекоммуникаций, г. Екатеринбург

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Защита диссертации состоится «**25**» мая **2023** г. в **12 ч 00** мин на заседании диссертационного совета 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» и на официальном сайте университета <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «___»

2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.375.03
доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Заболевания опорно-двигательного аппарата (ОДА) остаются для современного человека серьезной проблемой. Статистика Всемирной организации здравоохранения показывает, что 80 % населения Земли страдает заболеваниями ОДА. Для лечения таких заболеваний требуется длительная физическая реабилитация. На амбулаторном этапе она осуществляется пациентом, главным образом, самостоятельно, однако в домашних условиях у пациента отсутствует возможность квалифицированного контроля правильности выполнения реабилитационных упражнений. Кроме того, вне стен медицинского учреждения врач не может отслеживать проведение физической реабилитации и оценивать ее эффективность у каждого пациента, что может привести к нарушению целостности и непрерывности процесса реабилитации. Объективно оценить состояние пациента в амбулаторный период позволит система дистанционного сопровождения. Такую дистанционную оценку состояния пациента можно осуществлять при помощи специализированных программно-технических средств. Однако готовые технические средства сложны в применении для обычного пользователя. Поэтому необходима простая в эксплуатации система, которая смогла бы повысить доступность реабилитационных услуг без использования дополнительного оборудования. В связи с этим создание системы сопровождения физической реабилитации в амбулаторный период с целью восстановления опорно-двигательного аппарата является актуальным.

Степень разработанности темы диссертационного исследования. Исследования по биомеханике изменения состояния опорно-двигательного аппарата человека начались в середине XX века, что позволило определить закономерности построения и управления движениями, выявить причины возникновения двигательных ошибок и найти пути их устранения, а также сконструировать технические средства регистрации движения. Использование подобных технических средств автоматизации способствовало созданию систем поддержки процессов физической реабилитации в виде стационарного оборудования. Развитие инфокоммуникаций, в свою очередь, позволило использовать современные технологии для обеспечения приема, регистрации и обработки сигналов биомедицинских экспериментов. Значительный вклад в развитие данных вопросов внесли такие отечественные и зарубежные ученые, как Бернштейн Н.А., Штеренгерц А.Е., Лебедев Г.С., Владзимирский А.В., Валиуллина С.А., Новосёлова И.Н., Скворцов Д.В., Труханов А.И., Бандаков М.П., Атьков О.Ю., Тюрликов А.М., Лядов К.В., Шаповаленко Т.В., Marey E.J., Weber W.E., Braune C.W., Fischer O., Inman V.T., Енока R.M., Lamoreux L.W., Russell T.G., Hill A.J., Hinman R.S.

Среди основных технических средств, в задачу которых входит контроль двигательной активности и определение положения тела в пространстве, выделяются системы захвата движений по данным видеофиксации и инерциальные измерительные системы (ИИС) на основе микроэлектромеханической технологии.

Использование систем захвата движения на основе видеофиксации имеет ограничение, связанное с проведением калибровки видеокамеры с учетом размера помещения, где будет происходить видеосъемки. По этой причине эксплуатация таких систем предполагает перемещение стационарного оборудования из клиники в дом пациента, выделение соответствующей площади, настройку программного обеспечения. Таким образом, подход на основе видеофиксации не решает вопрос о расширении доступности данной технологии и вызывает затруднения при массовом применении.

Преимуществом ИИС является возможность мониторинга двигательной активности в условиях повседневной жизнедеятельности без необходимости постоянного нахождения в зоне видеосъемки. Однако применение готовых систем для обычного пользователя могут представлять ряд сложностей, таких как: профессиональные ИИС – это сложный технический инструмент, возможности которых часто избыточны для нужд регистрации отдельных двигательных актов; без посторонней помощи пациенту затруднительно размещать на теле большое количество датчиков; профессиональные ИИС дорогостоящи и, как следствие, недоступны большинству пациентов для эксплуатации в домашних условиях.

Использование существующих легкодоступных ИИС, встраиваемых в современные гаджеты, в том числе смартфоны, для мониторинга двигательной активности в условиях повседневной жизни и без приобретения дополнительного оборудования для процесса восстановления мало изучено. Таким образом, актуальной представляется разработка системы сопровождения физической реабилитации на основе только одного инерциального датчика с целью повышения доступности медицинских услуг.

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является повышение эффективности физической реабилитации в амбулаторный период за счет разработки способа восстановления двигательной активности под аудиовизуальным самоконтролем и системы сопровождения физической реабилитации на основе использования инерциального датчика. Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

1. Разработать схему интеграции процесса дистанционной физической реабилитации в общие периоды физической реабилитации. Провести анализ методов и программно-технических средств объективного контроля изменения состояния опорно-двигательного аппарата в процессе физической реабилитации. Показать целесообразность применения одного инерциального датчика в интересах использования в системе сопровождения физической реабилитации.

2. Разработать алгоритм цифрового представления восстановительных упражнений в условиях ограничений, связанных с использованием одного инерциального датчика.

3. Разработать способ физической реабилитации под аудиовизуальным самоконтролем на основе алгоритма контроля правильности и балльной системы оценивания результатов выполнения восстановительных упражнений.

4. Разработать систему сопровождения физической реабилитации опорно-двигательного аппарата в амбулаторный период и провести ее клиническую апробацию для оценки эффективности предложенных решений.

Научная новизна результатов работы. В рамках диссертационной работы были получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан алгоритм цифрового представления восстановительных упражнений в условиях ограничений, связанных с использованием одного инерциального датчика, для получения траектории движения в точке его размещения.

2. Разработан и обоснован алгоритм оценки правильности выполнения восстановительных упражнений в процессе физической реабилитации на основе контроля перемещения конечности с использованием одного инерциального датчика.

3. Разработан способ физической реабилитации и восстановления двигательной активности под аудиовизуальным самоконтролем на основе предложенного алгоритма контроля правильности и балльной системы оценки качества выполнения восстановительных упражнений.

4. Разработана концепция построения системы сопровождения физической реабилитации в виде трех взаимосвязанных модулей, а именно: один инерциальный датчик, мобильное приложение и онлайн-кабинет врача.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложенные в диссертационной работе алгоритм цифрового представления восстановительных упражнений, алгоритм контроля правильности, балльная система оценки количественных показателей отклонения траектории выполнения восстановительных упражнений и основанный на них способ физической реабилитации и восстановления двигательной активности под аудиовизуальным самоконтролем могут быть использованы для теоретического обоснования принципа построения процесса физической реабилитации различных сегментов опорно-двигательного аппарата человека, при создании приборов, систем и аппаратно-программных комплексов для терапии, реабилитации и восстановления утраченных функций, а также при создании телемедицинских систем диагностики, контроля и коррекции состояния здоровья пациента.

Результаты диссертационной работы использованы в разработанной системе «Нефитнес», выполненной в рамках программ Фонда содействия инновациям «У.М.Н.И.К.» (НИР № 155ГУ1/2014, № 5890ГУ2/2015), «СТАРТ-1» (НИОКР № 1718ГС1/24356 от 05.12.2016 г.), «СТАРТ-2» (НИОКР № 2668ГС2/24356 от 11.09.2018 г.), внедрены в клиническую практику медицинских организаций НИИ «Неотложной детской хирургии и травматологии» (г. Москва) и ГБУ РО «Городская клиническая больница скорой медицинской помощи» (г. Рязань), а также в учебный процесс ФГБОУ ВО «РГРТУ» (г. Рязань) и ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России (г. Рязань), что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Методология и методы исследования. В работе использовались методы цифровой обработки сигналов, теории вероятностей, математической

статистики, вычислительной математики. Теоретические методы применялись в совокупности с экспериментальными исследованиями по съему и регистрации информации при проведении реабилитационных упражнений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм цифрового представления восстановительных упражнений в условиях ограничений, связанных с использованием одного инерциального датчика, сопряженного с конечностью, для получения траектории в точке его размещения, обеспечивающий определение углового перемещения с разбросом значений в пределах $\pm 1^\circ$.

2. Способ физической реабилитации на основе алгоритма оценки правильности выполнения упражнений с использованием данных об изменении угловых перемещений, характеризующих изменение положения конечности, позволяющий организовать канал обратной связи с пациентом для корректировки выполнения восстановительных упражнений.

3. Система сопровождения и поддержки процесса физической реабилитации опорно-двигательного аппарата на основе инерциального датчика, мобильного приложения и онлайн-кабинета, обеспечивающая повышение показателя выносливости мышц в среднем на 11% за полгода регулярных занятий по сравнению со стандартной реабилитационной методикой.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов диссертационной работы обосновывается корректным использованием математического аппарата, апробацией системы при проведении серии биомедицинских экспериментов, в том числе в организациях здравоохранения.

Результаты исследований, приведенные в диссертационной работе, докладывались на следующих конференциях: «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы» (Рязань, 2012-2022), «Современные проблемы отечественной медико-биологической и фармацевтической промышленности» (Пенза, 2012), «Актуальные вопросы биомедицинской инженерии» (Саратов, 2013), «Современные проблемы биомедицинской инженерии» (Саратов, 2015), «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине» (Саратов, 2015), «Математические методы в технике и технологиях» (Рязань, 2015), «Наука настоящего и будущего» (С-Петербург, 2016-2018), «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2016-2019, 2022), «Организационные и клинические вопросы оказания помощи больным в травматологии и ортопедии» (Воронеж, 2016), «Современные аспекты травматологии, ортопедии и реконструктивной хирургии» (Астрахань, 2017), «Наука будущего – наука молодых», (Нижний Новгород, 2017), «Mediterranean Conference on Embedded Computing» (Черногория, 2017-2021), «Физиотерапия. Лечебная физкультура. Реабилитация. Спортивная медицина» (Москва, 2017, 2018), «Естественнонаучные основы медико-биологических знаний» (Рязань, 2017, 2019, 2021), «ТРАВМА» (Воронеж, 2017), «Ломоносов» (Москва, 2018, 2019), «Форум проектов программ Союзного государства» (Минск, 2018),

«Современные технологии реабилитации и абилитации детей-инвалидов, детей с ограниченными возможностями здоровья и детей раннего возраста» (Ижевск, 2019), «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 2020, 2022), «Реабилитация 2.0» (Ульяновск, 2020), «Современные проблемы спортивной медицины и реабилитации в спорте» (Ижевск, 2021), «GraphiCon» (Рязань, 2022), «СпортМед–2022» (Москва, 2022).

Личный вклад автора. Основные научные результаты диссертационной работы и результаты экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль в разработке алгоритмов и анализе полученных результатов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 84 работы: 10 статей в научно-технических журналах, рекомендованных ВАК РФ, 7 статей в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science, 31 статья в журналах из перечня РИНЦ и 9 статей из перечня других научных изданий, 18 тезисов докладов на международных и всероссийских научно-технических конференциях, 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных, 1 патент РФ на изобретение и 1 международный патент на изобретение.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа содержит введение, четыре главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 234 наименований и 4 приложений. Общий объем работы составляет 291 страницу, в том числе 178 страниц основного текста, 80 рисунков и 27 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ особенностей процесса физической реабилитации. В целях обеспечения непрерывности этапов лечения разработана схема интеграции дистанционной физической реабилитации в общие периоды физической реабилитации. Схема интеграции представлена на рисунке 1.

Проанализированы методы оценки изменения состояния ОДА (ихнометрия, гониометрия, циклометрия и др.) и используемые для их реализации известные технические средства объективного контроля. Показано, что вне лабораторных или клинических условий возможно применение ИИС.

Сделаны выводы о целесообразности использования одного датчика ИИС в системе сопровождения физической реабилитации пациента с целью восстановления ОДА, позволяющего повысить доступность реабилитационных услуг и обеспечить непрерывность этапов лечения без необходимости использования дополнительного оборудования.

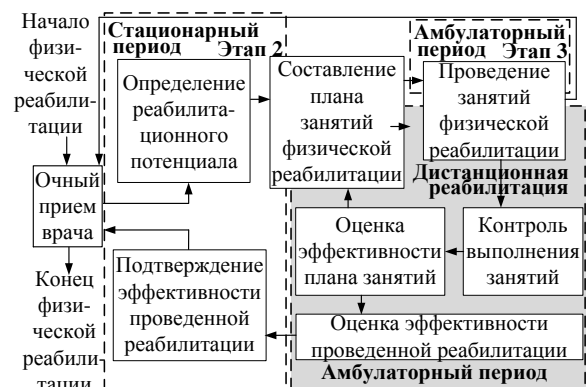
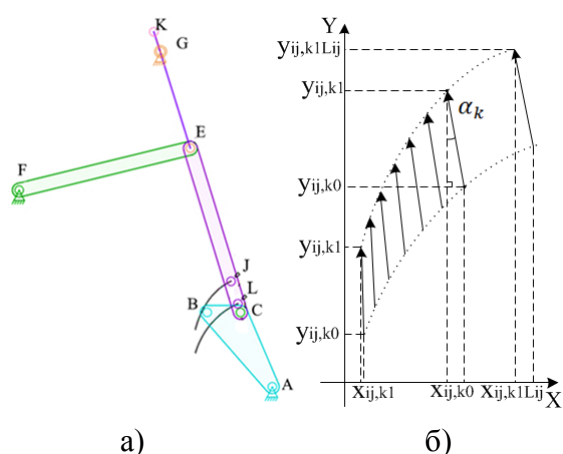


Рисунок 1 – Схема интеграции процесса дистанционной физической реабилитации

Во второй главе разработан алгоритм построения траекторий изменения положения ОДА, реализующий цифровое представление инструкций восстановительных упражнений при использовании датчика ИИС смартфона в одной точке крепления как основного средства контроля. Указано, что переход от известных систем, использующих два или более датчиков, к ИИС с одним датчиком – это ключевая особенность и преимущество предложенного в работе способа реабилитации. Алгоритм цифрового представления восстановительных упражнений содержит следующие действия: 1) формулировку критериев выбора восстановительных упражнений; 2) выбор сегмента ОДА в целях обоснования места размещения датчика; 3) построение кинематических моделей восстановительных упражнений в целях получения модельной траектории изменения состояния ОДА в точке размещения технического средства контроля движения при выполнении восстановительных упражнений (формирование шаблона).

Сформулированы критерии выбора упражнений. Основные из них: упражнения не должны содержать сложных движений и должны иметь циклический характер; подвижные соединения и костные звенья, не участвующие в движении, зафиксированы и являются неподвижной системой, число степеней свободы уменьшено до минимума; датчик должен быть размещен в месте, где наблюдается максимальная амплитуда движения.

Изменение положения ОДА в пространстве за период времени T характеризуется координатами (X, Y, Z) . Отсюда анализ процесса физической реабилитации может быть осуществлен на основе обработки множества координат $Nt = \{(X_i, Y_i, Z_i)\}$, $i = 1, \dots, N$, где (X_i, Y_i, Z_i) – i -й дискретный отсчет координат, N – количество отсчетов координат (X_i, Y_i, Z_i) положения выбранного сегмента ОДА в пространстве за период времени T . Последовательная обработка дискретных отсчетов координат (X_i, Y_i, Z_i) из множества Nt обеспечивает получение значений угловых перемещений.



а) кинематическая модель б) изменение координат точек движения щиколотки в декартовой плоскости

Формирование модельной траектории изменения положения ОДА на основе значений угловых перемещений рассмотрено на примере выполнения восстановительного упражнения «Сгибание стоп сидя», кинематическая модель которого представлена на рисунке 2 а). Данное упражнение задается в виде кинематической цепи: «тазобедренный сустав» (точка F) – «коленный сустав» (точка E) – «голеностопный сустав» (точка C). При этом тазобедренный сустав является неподвижной опорой с шаровым шарниром, а само движение инициируется в звене «коленный сустав» – «голеностопный сустав». Ограничение по движению коленного сустава накладывается в плоскости XOY

(сагиттальной плоскости), без учета фронтальных и горизонтальных перемещений. Изменение положения ОДА при перемещении из исходного положения в предельное определяется множеством координат Nt , в том числе, одной выбранной точки, где предполагается последующее размещение датчика ИИС. В соответствии с рисунком 2 б) изменению координат точки в пространстве соответствует угол α_k , который определяется как $\alpha_k = \arctg \frac{\Delta x_k}{\Delta y_k} = \arctg \frac{x_{ijk0} - x_{ijk1}}{y_{ijk0} - y_{ijk1}}$, $k = 1, \dots, L_{ij}$, $j = 1, \dots, L_i$, $i = 1, \dots, Kr$, где Δx_k – приращение координаты x вектора, $k = 1, \dots, L_{ij}$, Δy_k – приращение координаты y вектора, $k = 1, \dots, L_{ij}$, L_{ij} – количество точек координат для j -го повторения y_{ij} i -го упражнения Y_i , L_i – количество повторений i -го упражнения Y_i , Kr – число упражнений для реабилитации.

Зависимость изменения углов перемещения α_k от дискретного момента времени kT при $L_i = 1$, $Kr = 1$, $L_{ij} = 350$

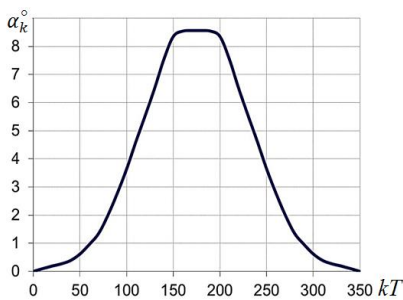


Рисунок 3 – Зависимость изменения углов α_k от дискретного момента времени

представлена на рисунке 3. Данная зависимость принята за модельную траекторию изменения состояния ОДА при выполнении восстановительного упражнения.

Проведено сравнение значений угловых перемещений, полученных с помощью ИИС, с соответствующими значениями, полученными при использовании независимых средств контроля, а именно: системы видеофиксации и цифрового

гониометра. Результаты сравнения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение значений угловых перемещений

Сопоставление усредненных максимальных значений угловых перемещений, полученных с помощью средств контроля	Разница показаний в % и числом выражении
Цифровой гониометр $8,23^\circ$ / Видеорегистрация $7,90^\circ$	4,01 % 0,0401
Цифровой гониометр $8,23^\circ$ / Инерциальный датчик $8,10^\circ$	1,58 % 0,0158
Цифровой гониометр $8,23^\circ$ / Кинематическая модель $8,56^\circ$	4,01 % 0,0401
Цифровой гониометр $8,23^\circ$ / Деревянный макет $7,80^\circ$	5,22 % 0,0522

В соответствии с таблицей 1 при сравнении значений угловых перемещений, полученных с помощью различных технических средств контроля, разница показаний усредненных максимальных значений угловых перемещений не превышает $\pm 1^\circ$. Кроме того, поскольку образцовым средством измерения углов сгибания – разгибания сустава является цифровой гониометр, результаты сравнения позволили подтвердить достоверность значений угловых перемещений, полученных с помощью ИИС.

Определено, что разработанный алгоритм построения траекторий изменения положения ОДА может быть масштабирован и применен в целях решения задач, связанных с цифровым представлением восстановительных упражнений для других сегментов ОДА.

Для достижения наилучших результатов физической реабилитации (в том числе восстановление утраченной функции подвижности) восстановительные упражнения сгруппированы в комплекс для сегмента ОДА. Комплекс

упражнений представлен в виде множества \mathbf{Fr} , заданного как $\mathbf{Fr} = \{Y_i, T_i\}$, $i = 1, \dots, Kr$, где Y_i – i -е упражнение для реабилитации, T_i – продолжительность i -го упражнения для реабилитации, Kr – число упражнений для реабилитации. При этом множество упражнений \mathbf{Fr} обеспечивает в полном объеме осуществление процесса физической реабилитации. Отсюда для каждого i -го и $(i - 1)$ -го упражнений Y_i и Y_{i-1} , $i = 2, \dots, Kr$ можно выделить интервал времени между выполнением данных упражнений $\Delta T_{i,i-1}$. В свою очередь, каждое Y_i из множества \mathbf{Fr} может быть представлено в виде множества $Y_i = \{y_{ij}, Am_{ij}, t_{ij}\}$, $j = 1, \dots, L_i$, где y_{ij} – j -е повторение упражнения Y_i , Am_{ij} – амплитуда j -го повторения y_{ij} упражнения Y_i , t_{ij} – продолжительность j -го повторения y_{ij} упражнения Y_i , L_i – количество повторений упражнения Y_i . Отсюда для каждого j -го и $(j - 1)$ -го повторений y_{ij} и y_{ij-1} , $j = 2, \dots, L_i$, упражнения Y_i множества \mathbf{Fr} можно выделить интервал времени между данными повторениями $\Delta t_{i,j(j-1)}$. Таким образом, наблюдается последовательное выполнение упражнений множества \mathbf{Fr} для идеального случая, то есть при отсутствии необходимости осуществления процесса физической реабилитации. При этом для каждого упражнения Y_i выполняются равенства $y_{ij} = y_{ij-1} \forall j \in [2, L_i]$, $\Delta t_{i,21} = \Delta t_{i,j j-1} = \Delta t_{i,L_i L_i-1}$. В реальных условиях, поскольку пациент может повторять движения в своем ритме, т.е. выполнять упражнение быстрее или медленнее, происходит изменение параметров каждого из упражнений Y_i из множества \mathbf{Fr} , что приводит к формированию множества \mathbf{Fr}' с соответствующими элементами и параметрами. Поэтому цель процесса физической реабилитации определяется как систематическое выполнение комплекса упражнений индивидуального плана восстановительных занятий, при котором множество \mathbf{Fr}' стремится к множеству \mathbf{Fr} , то есть $\mathbf{Fr}' \rightarrow \mathbf{Fr}$.

Сделаны выводы о необходимости разработки способа физической реабилитации, при котором анализируется процесс перехода $\mathbf{Fr}' \rightarrow \mathbf{Fr}$.

В третьей главе указано, что для создания способа физической реабилитации необходимо решить задачу объективного контроля правильности выполнения восстановительных упражнений, а также задачу соответствующей оценки. Предложена последовательность этапов решения задачи объективного контроля правильности выполнения восстановительных упражнений, которая изображена на рисунке 4. Согласно рисунку 4 первым этапом проведения объективного контроля является проверка факта выполнения упражнения Y_i . При этом должно выполняться условие $\forall Am_{ij} \in Y_i$, $i = 1, \dots, Kr$, $j = 2, \dots, L_i$, $\max_j (Am_{ij} - Am_{ij-1}) > e$, где e – минимальный порог флуктуаций (движения) в условно неподвижном состоянии ($\approx 0,10$). Вторым этапом проведения объективного контроля является проверка регулярности (цикла) выполнения упражнений. При этом должно выполняться условие $\forall Y_i \in \mathbf{Fr}$, $Y_i = \{y_{ij}, Am_{ij}, t_{ij}\}$, $i = 1, \dots, Kr$, $j = 1, \dots, L_i$, $L_{ij} > 1$. Третьим этапом проведения объективного контроля является выполнение блока «Нормирование», которое заключается в приведении значений модельного α_k и

экспериментального α'_k дискретных временных рядов к нормированному значению. Нормированные временные ряды подвергаются сравнению для определения степени идентичности изменения угловых перемещений от дискретного момента времени при выполнении упражнения.

Четвертым этапом проведения объективного контроля является оценка меры схожести траектории выполненного упражнения Y'_i из множества Fr' и заранее известной модельной траектории соответствующего упражнения Y_i множества Fr , для чего проанализированы известные метрики схожести траекторий, а именно: расстояние Хэмминга, взвешенное евклидово расстояние, расстояние Чебышева, корреляция, относительное среднеквадратичное отклонение ошибки, модифицированное расстояние Хаусфорда, коэффициент ранговой корреляции Спирмена, метрика на основе кросс-корреляции, метрика алгоритма динамической трансформации временной шкалы (DTW). Показано, что наиболее информативной метрикой для практической реализации автоматизированного определения правильности выполнения упражнений в процессе физической реабилитации по критерию инвариантности к деформациям формы траектории и времени выполнения, а также по критерию минимального расстояния между значениями модельного и экспериментальных дискретных временных рядов угловых перемещений соответствующих траекторий является метрика алгоритма DTW. Однако метрика алгоритма DTW не позволяет учесть расхождения экспериментальной траектории с модельной на различных стадиях построения движения итерации упражнения. Указанные особенности обуславливают необходимость разработки дополнительных метрик к алгоритму DTW. Предложены следующие метрики:

1. Метрика начальной диагонали σL (отражает флуктуацию разницы пар индексов пути относительно диагонали в начале), которая определяется как $\sigma L = \sigma (k_k - k_d)$, $k = [1, K/2]$, где k_d – индекс диагонали.

2. Метрика конечной диагонали σR (отражает флуктуацию разницы пар индексов пути относительно диагонали в конце движения), которая определяется как $\sigma R = \sigma (l_k - l_d)$, $k = [K/2, K]$, где l_d – индекс диагонали.

3. Доля горизонтальных и вертикальных переходов индексов относительно диагональных PL_k (отражает правильность траектории в начальном акте движения), которая вычисляется согласно правилу:

$$PL_k = \begin{cases} 0, & D_{kl}(k-1, l-1) < D_{kl}(k, l-1), \\ 1, & D_{kl}(k-1, l-1) \geq D_{kl}(k, l-1), \end{cases} \quad PL = \frac{\sum_0^{K/2} PL_k}{K/2} \cdot 100\%.$$

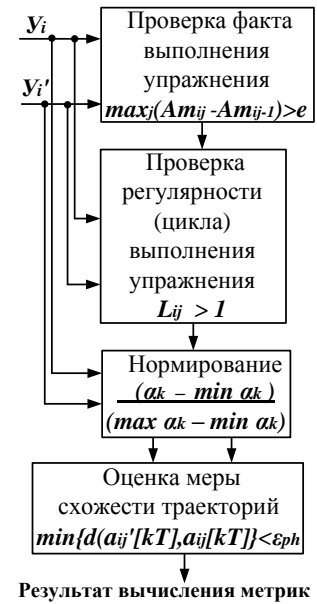


Рисунок 4 – Этапы решения задачи объективного контроля

4. Доля горизонтальных и вертикальных переходов индексов относительно диагональных PR_k (отражает правильность траектории на завершающем акте движения), которая вычисляется согласно правилу:

$$PR_k = \begin{cases} 0, & D_{kl}(k-1, l-1) < D_{kl}(k, l-1), \\ 1, & D_{kl}(k-1, l-1) \geq D_{kl}(k, l-1), \end{cases} \quad PR = \frac{\sum_K^{K/2} PR_k}{K/2} \cdot 100\%.$$

Для использования предложенных метрик в целях расширения возможности применения алгоритма DTW в интересах контроля правильности выполнения восстановительных упражнений разработана балльная система оценивания качества выполнения упражнений. При этом были определены следующие характеристики j -го повторения y_{ij} i -го упражнения Y_i из множества \mathbf{Fr} : 1) относительная разница амплитуды Δ_A , 2) форма траектории ρ – продолжительность t_{ij} повторения y_{ij} упражнения Y_i и продолжительность T_i i -го упражнения 3) количество повторений L_i .

С целью реализации системы оценивания для каждой из вышеуказанных характеристик j -го повторения y_{ij} , $j = 1, \dots, L_i$ упражнения Y_i из множества \mathbf{Fr} предложено вычислить пороговую балльную оценку Sc_r как $Sc_r = \sum_{r=1}^{NP} v_r$, $v_r = \begin{cases} 0, & P_r < e_p \\ 1, & P_r > e_p \end{cases}$, где v_r – значение балльного коэффициента r -ой метрики характеристики, P_r – значение r -ой метрики характеристики, NP – количество метрик характеристики, e_p – пороговое значение для параметра w_p (выбирается эмпирически) метрики характеристики.

Относительная разница амплитуды Δ_A (значений угловых перемещений) – это относительная разница между средними значениями амплитуд Am_{ij} j -го повторения y_{ij} упражнения Y_i экспериментальной и модельной траекторий и соответствующих им значений угловых перемещений $\alpha_{ij}'[lT]$ и $\alpha_{ij}[kT]$ при выполнении упражнения. Для исключения влияния случайных выбросов и шумов данные усреднялись. Также при анализе результатов осуществлена оценка выхода за предварительно установленный порог. Относительная разница амплитуды Δ_A в ведущей плоскости движения определена как: $\Delta_A = \frac{|\overline{Am'_{lj}}| - |\overline{Am_{lj}}|}{|\overline{Am_{lj}}|} \cdot 100\%$, где $\overline{Am'_{lj}}$ – среднее значение амплитуд Am_{ij} j -го повторения y_{ij} упражнения Y_i экспериментального дискретного временного ряда угловых перемещений $\alpha_{ij}'[lT]$, соответствующих траектории изменения положения конечности, $\overline{Am_{lj}}$ – среднее значение амплитуд Am_{ij} j -го повторения y_{ij} упражнения Y_i модельного дискретного временного ряда угловых перемещений $\alpha_{ij}[kT]$.

Согласно параметру формы траектории ρ определено, что в идеальном случае два измеряемых параметра должны изменяться во времени одинаково по амплитуде и фазе. При этом должен быть проведен расчет вышеуказанных предложенных метрик.

Для балльного коэффициента относительной разницы амплитуды и балльного коэффициента формы траектории ρ были заданы ранги Sc_1 и Sc_2 с ранговыми шкалами:

$$Sc_{\beta 1} = \begin{cases} 0; & \Delta_A \geq 30, \text{ очень высокая,} \\ 1; & 10 \leq \Delta_A < 30, \text{ завышенная,} \\ 2; & -10 \leq \Delta_A < 10, \text{ нормальная,} \\ 1; & -30 \leq \Delta_A < -10, \text{ заниженная} \\ 0; & < -30, \text{ очень низкая.} \end{cases} \quad Sc_{\beta 2} = \begin{cases} 3; & 6 \leq Sc_{r2} < 8, \text{ отлично,} \\ 2; & 3 \leq Sc_{r2} < 6, \text{ хорошо,} \\ 1; & 1 \leq Sc_{r2} < 3, \text{ средне,} \\ 0; & Sc_{r2} = 0, \text{ неправильно.} \end{cases}$$

которые были установлены эмпирически на основе экспертной оценки специалиста в области медицины.

Характеристика количества повторений L_i введена для отслеживания перехода тренда от нисходящего (уменьшение значений изменений угловых перемещений) к восходящему (увеличение значений изменений угловых перемещений) и подсчета количества данных переходов. Для пороговой балльной оценки Sc_{r3} задан ранг Sc_3 с ранговой шкалой $Sc_{\beta 3} = \begin{cases} 1, & Sc_{r3} \geq 2, \text{ поворот был,} \\ 0, & Sc_{r3} < 2, \text{ поворота не было.} \end{cases}$ Далее вычислялась итоговая ранговая

оценка Sc в виде $Sc = \sum_{ir=1}^3 Sr_{ir}$. Затем определялась итоговая балльная оценка правильности выполнения упражнения, усредненная по плоскостям движения, Sc_{Σ} как: $Sc_{\Sigma} = \frac{1}{C_{pl \cdot NP}} \sum_{i=1}^{C_{pl}} Sc_i$, где C_{pl} – количество плоскостей движения.

С учетом предложенных дополнительных метрик и балльной системы оценивания разработан алгоритм оценки правильности выполнения восстановительных упражнений в процессе физической реабилитации на основе контроля перемещения конечности с использованием одного инерциального датчика. Схема алгоритма представлена на рисунке 5. Алгоритм состоит из следующих действий: 1) ввод экспериментального дискретного временного ряда угловых перемещений $\alpha_{ij}'[LT]$; 2) применение метода наименьших квадратов для устранения линейных трендов для экспериментального дискретного временного ряда угловых перемещений $\alpha_{ij}'[LT]$; 3) расчет матрицы расстояний; 4) расчет матрицы деформаций; 5) расчет минимального пути деформации W ; 6) расчет значения итоговой метрики DTW; 7) расчет значения метрики относительной разницы амплитуды Δ_A и балльных коэффициентов; 8) расчет метрик параметра формы траектории ρ и балльных коэффициентов; 9) расчет метрики количества повторений L_i и балльных коэффициентов; 10) расчет итоговой балльной оценки; 11) сравнение рассчитанных значений балльных оценок с порогом; 12) вывод о результатах сравнения рассчитанных значений балльных оценок с порогом.

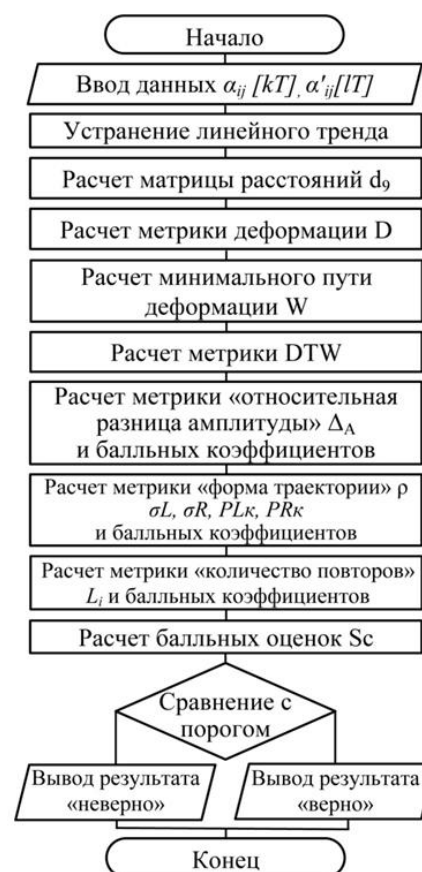


Рисунок 5 - Схема алгоритма оценки правильности

На основе предложенного алгоритма контроля правильности и балльной системы оценки качества выполнения восстановительных упражнений разработан способ физической реабилитации и восстановления двигательной активности под аудиовизуальным самоконтролем, который содержит следующие пункты: наличие канала обратной связи с пациентом для информирования об отклонении траектории упражнения от заданной на основе текстового, визуального и вербального сопровождения каждого упражнения; формирование шаблона упражнений, пороговых коэффициентов для оценки степени отклонения от заданной траектории выполнения упражнений; осуществление калибровки исходного положения; оповещение пациента с целью корректировки восстановительных движений в реальном времени; информирование пациента о результатах текущего выполнения упражнения; использование смартфона в качестве модуля регистрации двигательной активности.

В четвертой главе разработана система сопровождения физической реабилитации, реализующая алгоритм цифрового представления восстановительных упражнений, алгоритм контроля правильности, балльную систему оценки количественных показателей отклонения траектории выполнения восстановительных упражнений и основанный на них способ физической реабилитации и восстановления двигательной активности под аудиовизуальным самоконтролем.

Функциональная схема системы сопровождения физической реабилитации, представленная на рисунке 6, имеет комплексный характер и включает три основных взаимосвязанных функциональных элемента:

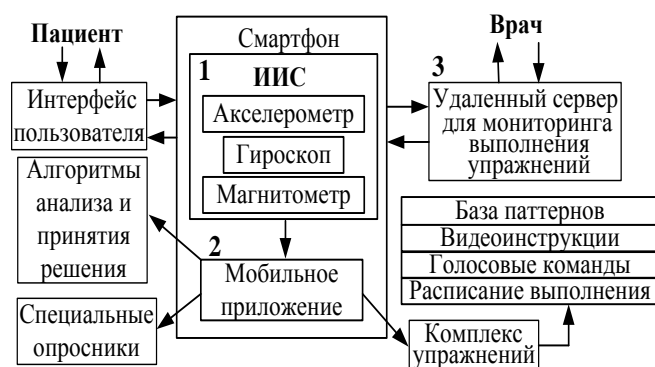


Рисунок 6 – Функциональная схема системы сопровождения

1. ИИС смартфона (жестко сопряженного с конечностью пациента), которая осуществляет контроль правильности выполнения восстановительных упражнений.

2. Мобильное приложение для анализа параметров движения с ИИС смартфона во время выполнения упражнения. В мобильном приложении реализованы следующие функции:

структурированный комплекс восстановительных упражнений, тестирование на уровень боли согласно клинически валидированным тестам, отправка данных в онлайн-кабинет врача.

3. Удаленный сервер (онлайн-кабинет врача) для дистанционного мониторинга выполнения упражнений, который обеспечивает: формирование и корректировку индивидуального комплекса упражнений, отображение результатов выполненных упражнений и контроль за соблюдением плана занятий физической реабилитации, назначенного на очном приеме врача.

Проведена апробация разработанной системы сопровождения физической реабилитации в медицинском учреждении НИИ НДХиТ в рамках проекта

«Цифровая физическая реабилитация детей и подростков с проблемами опорно-двигательного аппарата», который стал победителем в номинации «От сердца к сердцу» ежегодной премии «Общественное признание – 2020». В данном проекте участвовали 250 пациентов в возрасте от 7 до 17 лет, прошедших курс реабилитации. Пациенты были разделены на две группы по 125 человек: одна группа занималась в домашних условиях по стандартной методике реабилитации с перечнем упражнений в бумажном виде, а другая группа – с использованием разработанной системы сопровождения физической реабилитации (пациенты, установившие разработанное приложение «Нефитнес», которое размещено в магазине приложений App Store и доступно для скачивания) в которой содержатся те же самые восстановительные упражнения, применяемые в стандартной методике реабилитации. В начале амбулаторного периода пациенты выполнили упражнение на силовую выносливость мышц. На протяжении всего периода реабилитации пациенты несколько раз (через 1, 3 и 6 месяцев) выполняли данное упражнение с целью контроля динамики увеличения выносливости мышц. В конце реабилитации из каждой группы были отобраны по 25 девочек и мальчиков в возрастной группе от 10 до 14 лет (всего 100 пациентов). По итогам выполнения теста на силовую выносливость было рассчитано усредненное значение данного показателя, определяемого по времени удержания положения ОДА в заданном состоянии. По результатам сопоставления усредненных значений установлено, что применение разработанной системы обеспечивает повышение показателя выносливости мышц на 11 % по сравнению со стандартной реабилитационной методикой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Разработана и проанализирована схема интеграции процесса дистанционной физической реабилитации в общие периоды физической реабилитации. Проведен анализ методов и программно-технических средств объективного контроля изменения состояния опорно-двигательного аппарата в процессе физической реабилитации. Показана целесообразность применения одного инерциального датчика в интересах использования в системе сопровождения физической реабилитации.

2 Разработан алгоритм цифрового представления восстановительных упражнений в условиях ограничений, связанных с использованием одного инерциального датчика для получения траектории в точке его размещения, обеспечивающий определение углового перемещения с разбросом значений в пределах $\pm 1^\circ$.

3 Проведен анализ количественных метрик, которые возможно применить для оценки определения степени схожести траекторий движения опорно-двигательного аппарата и соответствующих им шаблонов. Предложен и обоснован алгоритм оценки правильности на основе дополнительных метрик и балльной системы. На основе алгоритма контроля правильности и балльной системы оценки качества выполнения восстановительных упражнений с использованием данных об изменении угловых перемещений, характеризующих изменение положения конечности, разработан способ

физической реабилитации под аудиовизуальным самоконтролем, позволяющий организовать канал обратной связи с пациентом для корректировки выполнения восстановительных упражнений.

4 Разработана система сопровождения и поддержки процесса физической реабилитации опорно-двигательного аппарата на основе инерциального датчика, мобильного приложения и онлайн-кабинета, реализующая способ физической реабилитации под аудиовизуальным самоконтролем. Проведена клиническая апробация системы для оценки эффективности предложенных решений. По результатам апробации, система обеспечивает повышение показателя выносливости мышц в среднем на 11% за полгода регулярных занятий по сравнению со стандартной реабилитационной методикой.

**ВСЕГО ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО 84 РАБОТЫ,
НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ ИЗ КОТОРЫХ
В рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ**

1. Ашапкина М.С. Методы дистанционного сопровождения физической реабилитации в мобильных системах // Международный научно-прикладной журнал «Биомедицинская радиоэлектроника», Т. 25, № 4. 2022. С. 71-78.

2. Ашапкина М.С., Алпатов А.В., Мельник О.В. Разработка мобильного приложения для постковидной физической реабилитации с контролем двигательной активности, ритма сердца и глубины дыхания // Международный научно-прикладной журнал «Биомедицинская радиоэлектроника», Т. 25, № 4. 2022. С. 46-53.

3. Ашапкина М.С., Алпатов А.В., Валиуллина С.А., Новосёлова И.Н. Дистанционная физическая реабилитация в позднем периоде для подростков после травм позвоночника на основе смартфона // Международный научно-прикладной журнал «Биомедицинская радиоэлектроника», Т. 23, № 3. 2020. С. 75-84.

4. Ашапкина М.С., Алпатов А.В., Чекушин А.А., Федосеев А.В. Удалённый мониторинг реабилитации пациентов травматолого-ортопедического профиля // Наука молодых (Eruditio Juvenium). Рязань: РязГМУ им. И.П. Павлова. 2020. С. 269-302.

5. Ашапкина М.С., Алпатов А.В., Чекушин А.А., Федосеев А.В. Система удаленной физической реабилитации на основе мобильных технологий // Международный научно-прикладной журнал «Биомедицинская радиоэлектроника», Т. 22, № 5. 2019. С. 82-88.

6. Ашапкина М.С., Алпатов А.В. Разработка метрик для распознавания физических упражнений в системах удаленной реабилитации // Вестник РГРТУ. 2018. № 66. Часть 1. С. 139-146.

7. Ашапкина М.С., Алпатов А.В., Чекушин А.А. Система поддержки выполнения реабилитационных упражнений для коленного сустава на базе смартфона // Международный научно-прикладной журнал «Биомедицинская радиоэлектроника» № 8. 2018. С. 45-53.

8. Ашапкина М.С., Алпатов А.В., Чекушин А.А. Применение метода флуктуационного анализа относительно тренда для сигнала двигательной

активности человека // Международный научно-прикладной журнал «Биомедицинская радиоэлектроника» № 7. 2017. С. 67-72.

9. Ашапкина М.С., Алпатов А.В., Чекушин А.А. Алгоритм определения типов двигательной активности человека // Международный научно-прикладной журнал «Биомедицинская радиоэлектроника» № 6. 2016. С. 82-88.

Публикации в изданиях, индексированных в WoS и Scopus

10. Ashapkina M.S., Alpatov A.V., Sablina V.A., Melnik O.V. Vibro-tactile Portable Device for Home-base Physical Rehabilitation // Proceedings 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2021, Budva, 2021. pp. 536-539.

11. Ashapkina M.S., Alpatov A.V., Sablina V.A. Online System for Involving Patients in Home-Base Rehabilitation Programs for the Knee Joint // Proceedings 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2020, Budva, 2020. pp. 730-733.

12. Ashapkina M.S., Alpatov A.V., Sablina V.A. Smartphone-based Systems for Knee Joint Physical Rehabilitation // Proceedings 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2020, Budva, 2020. pp. 726-729.

13. Ashapkina M.S., Alpatov A.V., Sablina V.A., Chekushin A.A. Remote Monitoring of Rehabilitation of Patients of Traumatology and Orthopedic // Proceedings 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2019, Budva, 2019. pp. 672-675.

14. Ashapkina M.S., Alpatov A.V., Sablina V.A., Kolpakov A.V. Metric for Exercise Recognition for Telemedicine Systems // Proceedings 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2019, Budva, 2019. pp. 668-671.

15. Ashapkina M.S., Alpatov A.V., Sablina V.A., Chekushin A.A. Quantitative Parameters Developing for Estimation of Rehabilitation Exercising on The Basis of IMU Sensor Device // Proceedings 2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2018, Budva, 2018. pp. 541-544.

16. Ashapkina M.S., Alpatov A.V. Fluctuation Analysis of Human Locomotor System // Proceedings 2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2017 - Including ECYPS 2017, Bar, Montenegro, 2017. pp. 231-233.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

17. Патент на изобретение RU № 2692535 С1, МПК А61В 5/11, Способ реабилитации и восстановления двигательной активности под аудиовизуальным самоконтролем / Ашапкина М.С., Алпатов А.В. // Зарегистр. в реестре изобретений РФ 25.06.2019 г.

18. Патент на изобретение WO 2020209743, Method for rehabilitating and restoring physical activity under audiovisual self-control / Ashapkina M.S., Alpatov A.V. // Зарегистр. в реестре всемирной организации интел.собств. 15.10.2020 г.

19. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ KZ 6152, Программа регистрации динамики восстановления двигательной функции коленного сустава после травм / Ашапкина М.С. // Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 30.10.2019 г.

20. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022662901, Программа обработки массивов данных пациентов при восстановлении

подвижности суставов / Ашапкина М.С., Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В., Трусов Е.П. // Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 07.07.2022 г.

21. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021668518, НЕФИТНЕС – здоровая спина – упражнения для позвоночника / Ашапкина М.С., Алпатов А.В. // Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 17.11.2021 г.

22. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020661539, НЕФИТНЕС – зарядка для колена / Ашапкина М.С., Алпатов А.В., Чекушин А.А. // Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 24.09.2020 г.

23. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018666402, Программа регистрации динамики восстановления опорно-двигательных функций после неврологических нарушений в резидуальный период / Ашапкина М.С., Ермачихин А.В., Поличевская А.В. // Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 17.12.2018 г.

24. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018611577, Программа регистрации сигнала датчика ускорения и определение положения конечностей человека в пространстве / Ашапкина М.С., Ермачихин А.В., Алпатов А.В. // Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 02.02.2018 г.

25. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016612513, Программа для вычисления показателей опорно-двигательного аппарата человека / Ашапкина М.С., Ермачихин А.В. // Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 29.02.2016 г.

Прочие публикации в других изданиях и материалы конференций:

26. Ашапкина М.С., Алпатов А.В., Мельник О.В. Метод контроля правильности выполнения упражнений на основе видеорегистрации // Материалы XXXV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – БИОМЕДСИСТЕМЫ-2022». Рязань: РГРТУ, 2022. С. 370-373.

27. Ашапкина М.С., Алпатов А.В., Мельник О.В. Разработка и продвижения технологии мобильной реабилитации на базе смартфона // Материалы XXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – БИОМЕДСИСТЕМЫ-2021». Рязань: РГРТУ, 2021. С. 10-16.

28. Ashapkina M.S., Alpatov A.V., Melnik O.V. Remote monitoring of rehabilitation of patients of traumatology and orthopedic profile // Proceedings of the International Youth Forum «Rehabilitation 2.0». Ulyanovsk: USU, 2021. pp. 7-10.

29. Ашапкина М.С. Разработка системы контроля правильности выполнения лечебно-профилактических упражнений в амбулаторный период // Материалы Международной научно-технической и научно-методической конференции СТНО-2017. Рязань: РГРТУ, 2017. С. 73-77.

30. Ашапкина М.С. Система мониторинга двигательной деятельности человека // Материалы Всероссийской школы-семинара «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2015». Саратов: Саратовский источник, 2015. С. 74-75.

31. Ашапкина М.С. Система контроля двигательной активности // Материалы Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные вопросы биомедицинской инженерии». Саратов: СГТУ им. Ю.А. Гагарина, 2013. С. 299-302.

32. Ашапкина М.С. Разработка программно-аппаратного комплекса для мониторинга двигательной активности человека // Материалы XXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – БИОМЕДСИСТЕМЫ-2013». Рязань: РГРТУ, 2013. С. 49-51.

А ш а п к и н а Мария Сергеевна

СПОСОБ И СИСТЕМА СОПРОВОЖДЕНИЯ
ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ
ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать . Формат бумаги 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.