



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-105-115>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 615.47

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ МЕДИЦИНСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В. М. БОНДАРИК, М. И. ВАШКЕВИЧ, М. В. ДАВЫДОВ, Н. С. ДАВЫДОВА,
О. Б. ЗЕЛЬМАНСКИЙ, П. В. КАМЛАЧ, М. М. МЕЖЕННАЯ, А. Н. ОСИПОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 21.02.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Дан краткий обзор результатов работ по направлению «Приборы, системы и технологии медицинского назначения», полученных с непосредственным участием авторов статьи. Изложены результаты разработки и исследования в области моделирования воздействия физических факторов на организм человека и цифровой обработки биомедицинских сигналов. Приведены принципиальные аспекты оригинальных систем длительного мониторинга состояния человека и контроля опорно-двигательного аппарата.

Ключевые слова: системы длительного мониторинга, цифровая обработка биомедицинских сигналов, моделирование, методы и устройства воздействия на организм человека.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Методы проектирования приборов и систем медицинской электроники / В. М. Бондарик [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 105–115. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-105-115>.

METHODS FOR DESIGNING DEVICES AND SYSTEMS OF MEDICAL ELECTRONICS

VASILY M. BANDARYK, MAKSIM I. VASHKEVICH, MAKSIM V. DAVYDOV,
NADEZHDA S. DAVYDOVA, OLEG B. ZELMANSKI, PAVEL V. KAMLACH,
MARINA M. MEZHENNAYA, ANATOLIY N. OSIPOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 21.02.2024

Abstract. A brief overview of the results of work in the field of “Devices, systems and technologies for medical purposes”, obtained with the direct participation of the authors of the article, is given. The results of the development and research in the field of modeling the effects of physical factors on the human body and digital processing of biomedical signals are presented. The principal aspects of the original systems of long-term monitoring of the human condition and control of the musculoskeletal system are presented.

Keywords: long-term monitoring systems, digital processing of biomedical signals, modeling, methods and devices for influencing the human body.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation. Bandaryk V. M., Vashkevich M. I., Davydov M. V., Davydova N. S., Zelmanski O. B., Kamlach P. V., Mezhenaya M. M., Osipov A. N. (2024) Methods for Designing Devices and Systems of Medical Electronics. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 105–115. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-105-115> (in Russian).

Введение

Научное направление «Медицинская электроника» начало интенсивно развиваться в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники (БГУИР) с открытием в 1995 г. на кафедре электронной техники и технологии подготовки инженеров по специальности «Медицинская электроника». Ряд устройств и программных средств, разработанных в университете, были внедрены в клиническую практику. Университет совместно с организациями здравоохранения, Белорусской медицинской академией последипломного образования, Белорусским государственным медицинским университетом, начиная с 2002 г., явился организатором регулярной Международной научно-технической конференции «Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии». В исследованиях, проводимых в БГУИР, по различным аспектам теории и практики проектирования электронных медицинских аппаратов, систем и комплексов принимали участие сотрудники университета: академик А. П. Достанко; доктора медицинских наук, профессора Л. М. Лыньков и Т. В. Борботько; доценты А. Н. Осипов, С. К. Дик, М. В. Давыдов, В. М. Бондарик, П. В. Камлач, Н. С. Давыдова, М. М. Меженная, О. В. Бойправ и многие другие, а также ведущие специалисты здравоохранения – академики В. С. Улащик и В. А. Кульчицкий; лауреат Государственной премии Республики Беларусь Э. С. Кашицкий; доктора медицинских наук, профессора В. П. Сиваков и С. А. Лихачев. В 2021 г. открыта отраслевая лаборатория «Приборы, системы и технологии медицинского назначения» (научный руководитель – А. Н. Осипов).

Новый этап развития данного направления связан, с одной стороны, с обострением мировой проблемы охраны здоровья – ростом продолжительности жизни в развитых странах и демографическим взрывом в странах третьего мира, ограниченными кадровыми ресурсами здравоохранения, увеличением уровня доходов и более высоким уровнем жизни, обострением экологической ситуации и глобальной пандемией, вызванной коронавирусом COVID-19. С другой стороны, этому способствовало развитие информационно-коммуникационных технологий, основанных на технологиях 5G, анализа больших данных, искусственного интеллекта и интернета вещей, что предоставляет обширные возможности для развития медико-технического оснащения здравоохранения. Цифровое (электронное) здравоохранение должно охватить первичную и скорую помощь, профилактику заболеваний и стационарное лечение, лекарственное обеспечение, повышение информированности граждан, подготовку врачей, научную деятельность и управление отраслью. В связи с этим в статье представлены результаты исследований специалистов БГУИР, полученные за период 2011–2024 гг., по разработке методов и средств цифровой медицинской электроники.

Системы длительного дистанционного мониторинга жизненных параметров человека на основе беспроводных нательных сетей

В триаду исследовательских приоритетов, значимых для электронного здравоохранения, входят программно-аппаратные носимые медицинские электронные средства. Такие устройства используются для мониторинга, анализа и регистрации метаболических изменений в организме и позволяют измерять температуру тела, артериальное давление, частоту сердечбиения, отслеживать состояние организма во время сна и т. д. Одним из катализаторов расширения рынка носимой электроники специалисты считают сахарный диабет, который требует постоянного контроля. По данным Международной федерации диабета (IDF), в 2019 г. этой болезнью страдали 463 млн человек по всему миру, или 9,3 % населения планеты. Ожидается, что к 2030-му данный показатель увеличится до 10,2 %. В связи с этим значительный интерес направлен на разработку систем мониторинга жизненно важных (витальных) параметров, позволяющих решить следующие задачи: регистрация сигналов биомедицинской информации, идентификация предкризовых и критических состояний (гипертонический криз, инфаркт миокарда, нарушение сердечного ритма, инсульт, сахарная кома, внезапная сердечная смерть и т. д.) и выработка тревожной сигнализации как для пациента, так и для медицинского персонала с целью принятия неотложных мер.

Архитектура прототипа системы длительного мониторинга, разработанная в БГУИР, имеет трехуровневую систему, включающую датчики биомедицинских сигналов (биосенсоры) и носимый мобильный блок (первый уровень). В качестве шлюзового устройства связи (второй уровень) между сенсорной сетью и сетью третьего уровня используется смартфон. Сеть третьего

уровня обеспечивает хранение и обработку данных, коммуникацию с различными пользователями (больницей, скорой помощью, врачами, близкими родственниками, аптеками и т. д.).

В [1] контроль параметров исследуемых сигналов предложено осуществлять на основе регистрации и реагирования процессов, характерных для танатогенеза. Такой подход позволяет исключить проблему определения индивидуальных порогов предкризовых состояний пациента. Кроме того, в [1] сформулированы и реализованы в разработанной системе принципы проектирования систем дистанционного мониторинга, позволяющие обеспечить значительное снижение энергопотребления и объемов передаваемой и хранимой диагностической информации, увеличение длительности автономной работы носимых блоков, диагностической информации. Как следствие, повышаются быстродействие системы и оперативность разрешения медперсоналом критических ситуаций [2], а именно:

- 1) контроль и анализ параметров биосигналов, используемых для оценки состояния витальных функций, которые в крайне критических ситуациях отражают процесс танатогенеза;
- 2) выделение основных и дополнительных сигналов и, соответственно, параметров для анализа;
- 3) организация обратной связи путем формирования запроса к пациенту;
- 4) распределение функций мониторинга на различных уровнях с учетом вычислительных ресурсов системы.

В [3] описан алгоритм распознавания критических ситуаций состояния пациента. Регистрация и предварительная обработка контролируемых сигналов, вычисление на их основе диагностических параметров выполняются в носимом блоке в режиме реального времени со скоростью, сопоставимой с изменениями контролируемых физиологических процессов пациента. Контролируемые сигналы предлагается разделить на два типа – основные и дополнительные. Соответственно распознавание физиологического состояния человека выполняется в два этапа. Постоянно мониторятся основные биомедицинские сигналы. Если анализируемый параметр находится в норме, то система реагирует пассивно: с требуемой периодичностью информация пересылается на медицинский сервер хранения и обработки данных. При превышении пороговых значений параметров основных биосигналов выполняется второй этап распознавания степени критичности ситуации путем считывания и анализа дополнительных (коррелирующих) сигналов. Алгоритм предусматривает также организацию обратной связи: в автоматическом режиме формируются, при необходимости, запросы пациенту, с учетом ответа на которые (или отсутствия ответа) система корректирует уровень тревоги. С одной стороны, двухэтапный алгоритм позволяет повысить достоверность распознавания ситуации, классифицировать возникающие тревоги. С другой, это дает возможность снизить технические требования к системе – уменьшить скорость обмена данными между составными частями систем мониторинга, объем диагностической информации, хранимой в медицинском сервере, уменьшить вероятность ложных срабатываний. Таким образом, согласование вычислительных ресурсов, имеющихся на различных уровнях системы, со степенью сложности выполняемых функций обеспечивает повышение энергоэффективности и производительности систем мониторинга.

Цифровая обработка речевых сигналов в задачах детектирования, мониторинга и скрининга патологий голоса

Существует широкий спектр заболеваний, которые негативным образом влияют на состояние речевого аппарата человека и, в конечном итоге, ухудшают качество коммуникации, понижают уровень жизни. Сюда относятся дисфонии, дизартрии, охриплость, парезы и проч. Часто на голос оказывают влияние и неврологические заболевания: болезни Паркинсона и Альцгеймера, боковой амиотрофический склероз (БАС) и проч. Для проведения медицинской диагностики, своевременного выявления изменений голоса и речи требуются специальные инструментальные средства, основанные на акустическом анализе голосового сигнала. Обычно для проведения медицинского анализа голоса применяют специальные аппаратные комплексы, как, например, lingWAVES (Германия), который в настоящее время используется в РНПЦ оториноларингологии (г. Минск). Однако эти комплексы имеют высокую стоимость, требуют обученного персонала и дороги в обслуживании и ремонте. В настоящее время появляется все больше работ, в которых

указывается, что детектирование и скрининг голосовых патологий можно проводить с помощью обычного смартфона. Например, в [4] показано, что параметры голоса, полученные на основе сигналов, записанных смартфоном, могут быть использованы для скрининга голосовых патологий. Согласно исследованиям последних лет [5, 6], смартфон может применяться для детектирования речевых/голосовых аномалий (с точностью 90–94 %), связанных с развитием различных неврологических заболеваний. Типовая структура системы детектирования речевой патологии представлена на рис. 1.

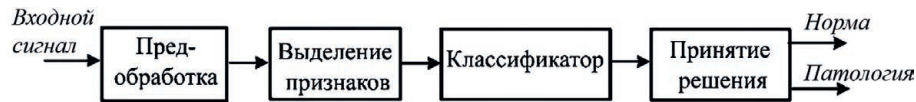


Рис. 1. Система анализа и классификации для выявления патологии речи/голоса
Fig. 1. An analysis and classification system for detecting speech/voice pathology

Поступающий речевой/голосовой сигнал вначале предварительно обрабатывается, после чего из него выделяют информативные признаки. Далее вектор признаков попадает в блок классификации, который выдает вероятностную оценку отнесения вектора к одному из возможных классов. Блок принятия решения отвечает за присвоение метки класса полученному характеристическому вектору. Часто блок принятия решения является составной частью классификатора.

В период с 2019 по 2023 год сотрудники кафедры электронных вычислительных средств БГУИР активно работали над задачей детектирования неврологического заболевания БАС. За это время создан ряд методов и алгоритмов, которые относятся к этапам предобработки выделения признаков (рис. 1). Например, предложен метод сегментации голосового сигнала на периоды частоты основного тона, который использует информацию о контуре частоты основного тона. Применение такого метода сегментации позволяет более точно рассчитать параметры джиттера и шиммера голосового сигнала, что, в свою очередь, повысило точность детектирования заболевания. В [7] также предложен метод извлечения из голосового сигнала параметра патологичности вибрато, учитывающий особенности изменения голоса у пациентов с БАС. Использование данного параметра обеспечивает повышение точности классификации голосового сигнала.

В [8] предложен метод анализа модуляционного спектра звукового сигнала на основе неравнополосного банка фильтров с фазовым преобразованием, применение которого повышает правильность классификации патологии голосового аппарата по сравнению с общепринятым методом анализа на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) с объединением энергий в субполосах. В [9] рассмотрен метод вычисления барк-частотных кепстральных коэффициентов (БЧКК) голосового сигнала, основанный на использовании неравнополосного ДПФ-модулированного банка фильтров, применение которого совместно с пертурбационными параметрами голоса позволяет строить эффективные системы классификации пациентов с заболеванием БАС. Точность системы классификации, использующей БЧКК, находится на уровне 96,7 %, что на 2,6 % больше, чем у систем, использующих признаки на основе широко применяемых мел-частотных кепстральных коэффициентов.

На базе представленных выше результатов сотрудниками кафедры электронных вычислительных средств разработано мобильное приложение ALS Expert [10], которое выполняет функции анализа голосового сигнала (вычисление пертурбационных параметров голоса и индекса патологичности вибрато) и предварительного детектирования наличия признаков заболевания БАС с использованием линейного дискриминантного анализа. Мобильное приложение тестировалось в РНПЦ неврологии и нейрохирургии. Предварительные результаты показали, что разработанная система обладает высокой эффективностью.

Разработка систем анализа голоса и речи продолжает оставаться актуальным направлением исследований и является частью так называемой цифровой медицины. В настоящее время для анализа и выявления патологических изменений наметился сдвиг в сторону применения методов на основе глубокого обучения, при этом методы статистического обучения также сохраняют свою актуальность, поскольку обладают важным качеством – интерпретируемостью. В свою очередь, перспективное направление – разработка интерпретируемых моделей глубокого обучения.

Физико-математическое моделирование энергетического воздействия на различные типы тканей организма

Проектированию современных приборов медицинского назначения должно предшествовать физико-математическое моделирование воздействия на различные типы тканей организма с учетом их свойств. Решению этой важной задачи во многом способствует использование современных систем программного обеспечения (ПО), которые задействуют различные модели при решении поставленных задач. Однако для их реализации следует знать о возможностях и об алгоритмах работы программных платформ, а также определить, какие физические формулы будут применяться [11].

Комплексная платформа моделирования Sim4Life представляет собой мощную среду 3D-проверенного биологического и анатомического моделирования для оптимизации эффективности и производительности медицинских устройств, повышения безопасности пациентов и поиска потенциальных новых методов лечения. Sim4Life включает в себя полноволновые решатели для электромагнетизма, квазистатические электромагнитные решатели, решатели термодинамики, решатели гидродинамики, решатели акустики, модели нейронной динамики.

В [12] предложена модель воздействия электромагнитного поля на биологические ткани. При моделировании рассчитаны параметры отклика в биологических тканях (амплитуда отклика в ткани и максимальное значение тока в ней) в платформе Sim4Life. С целью проверки математической модели был разработан лабораторный макет для измерений электрических характеристик биологической ткани. Исследования проводили с тремя образцами биологических тканей: соединительная ткань (жировая), мышечная ткань и кожа [13, 14]. Построены зависимости амплитуды отклика в биологических образцах от мощности выходного сигнала. Полученные результаты показывают возможность использования предложенного алгоритма в комплексе на ПО Sim4Life и моделирования электромагнитного поля с биологическим объектом, оптимальным для создания и экспертизы технологий и приборов электромагнитотерапии и индукторов экстракорпорального воздействия.

На платформе Sim4Life также разработана модель магнитотаргетинга лекарственных средств [15], которая позволяет производить точный расчет параметров электромагнитного поля лекарственными средствами с наночастицами ферромагнетика. Расчет показателя локального удельного коэффициента поглощения является наиболее важным при реализации магнитотаргетинга в практике. При вычислениях с наноструктурами с точки зрения классической электродинамики справедливо квазистатическое приближение. Получена альтернативная система зависимых от времени уравнений для поляризации заряда, поляризации тока и электрического поля. Поскольку вычисления необходимы для контроля транспорта наночастиц с ферромагнетиком в составе капсул, моделирование и расчеты для магнитотаргетинга необходимо проводить в нескольких точках транспорта лекарственных средств в проекции сосудов с помощью решателя LF – Magneto-Quasi-Static FDTD. Sim4Life позволяет моделировать различные типы источников (акустические, электромагнитные и др.), элементы приборов и реализовать возможности их применения на цифровых моделях экспериментальных животных и людей с базой данных всех электростатических и биоэлектрических характеристик тканей.

Методы и устройства сочетанного воздействия активирующих факторов различной физической природы с целью повышения эффективности физиотерапевтических процедур

В современной медицине все активнее применяются различные методы неинвазивного лечения без использования химических препаратов. Такие методы требуют наличия технического обеспечения лечебных процедур. Физиотерапевтические процедуры с применением лазерного излучения, поляризованного и неполяризованного света, магнитного поля, электрического тока, ультразвукового излучения, вибрационного воздействия и т. п. позволяют повысить эффективность и сократить сроки восстановления организма. Однако чрезвычайная сложность и высокая адаптивность человеческого организма со временем снижают эффективность физиотерапевтических процедур из-за наличия биологических обратных связей. Для повышения результативности физиотерапевтических процедур предложено использовать методы сочетанного воздействия активирующих факторов различной физической природы [11].

Совместное воздействие ультразвука и электрофореза на биологические ткани. Электрофорез позволяет свести к минимуму побочное действие лекарственного препарата, так как в ткани вводятся только необходимые его составляющие. Однако процедура электрофореза достаточно длительная (до 30 минут на одну процедуру, на курс лечения – до 30 процедур). Совместное воздействие ультразвука (УЗ) и электрофореза значительно ускоряет процесс введения лекарственного вещества, увеличивает глубину проникновения и тем самым повышает эффективность действия.

Предложена модель суммарного потока вводимого лекарственного вещества под сочетанным воздействием УЗ-энергии и электрического тока при допущении, что доля переноса лекарственных средств за счет диффузии составляет доли процента. Такое сочетанное воздействие увеличивает суммарный поток ионов лекарственного вещества в зоне взаимодействия, скорость и глубину диффузии. Проведены исследования, доказывающие, что при совместном воздействии УЗ и постоянного тока вводится большее количество действующего вещества (на 12–15 %) и на большую глубину, чем при обычном электрофорезе.

Сочетанное воздействие ультразвуковых и магнитных полей высокой интенсивности. Влияние сочетанного воздействия ультразвуковых и магнитных полей на организм человека позволяет улучшить кровообращение, обмен веществ, что повышает эффективность физиотерапевтических процедур и уменьшает их количество.

Предложена математическая модель влияния ультразвуковых и магнитных полей на скорость периферийного кровотока. Рассмотрен метод сочетанного воздействия ультразвуковых и магнитных полей высокой интенсивности, использование которого позволяет повысить скорость периферийного кровотока на 108–111 %. Однако практическому применению данного метода препятствует отсутствие аппаратов, способных воздействовать различными факторами. Поэтому представляется перспективной разработка оборудования для сочетанного воздействия ультразвуковыми и магнитными полями.

Сочетанное воздействие светотерапии и физических нагрузок высокой интенсивности на параметры физиотерапевтических процедур. В условиях высокого уровня конкуренции современных спортсменов остро стоит вопрос повышения эффективности восстановительного этапа подготовки как после ежедневного тренировочного цикла, так и в промежутке между физическими упражнениями в течение тренировки.

Предложен метод сочетанного воздействия светотерапии и физических нагрузок высокой интенсивности на восстановительный процесс дельтовидной мышцы человека [16]. Разработана методика исследования влияния светотерапии на эффективность физических нагрузок, включающая программу физических нагрузок, для дальнейшего исследования их влияния на электрические параметры тканей организма человека при сочетанном воздействии светотерапии. Установлено, что проведение процедур светотерапии оказывает существенное влияние на окислительно-восстановительные процессы внутри мышечной ткани, повышает выносливость и резистивность к нагрузкам после проведения высокоинтенсивных физических упражнений. Процедуры светотерапии положительно сказываются на электрических показателях дельтовидной мышцы испытуемых, полученных путем миографического исследования. Это доказывает перспективность совместного использования светотерапии с тренировками для ускорения восстановительного периода у спортсменов. Дополнительное применение процедур светотерапии во время тренировок поможет профессиональным спортсменам достигать более высоких спортивных результатов.

Системы структурно-функционального анализа и контроля опорно-двигательного аппарата человека

Структурно-функциональный анализ движений человека. Структурная и функциональная диагностика двигательных действий человека востребована не только в области двигательной реабилитации и протезирования, но также и в области спортивной медицины и биомеханики спорта. Группой разработчиков БГУИР предложен метод структурно-функционального анализа движений человека на базе оценки электромиографического паттерна двигательной деятельности [17]. Электромиографический паттерн движения показывает уровень активности и последова-

тельность включения мышц, задействованных в движении. Реализацией данного подхода к анализу движений человека стала техническая система структурно-функциональной диагностики двигательных навыков.

Предложенное устройство осуществляет регистрацию в реальном масштабе времени многоканальных электрофизиологических (интерференционная электромиография) и биомеханических (подография, гониометрия, акселерометрия) сигналов движения, беспроводную передачу данных и синхронизированную запись видеоизображения. Структурно-функциональный анализ движений человека осуществляется с учетом его индивидуальных характеристик, выбранных для диагностики мышц и типа движения. Система позволяет оценить согласованность работы мышц при выполнении движения, определить стабильность результата двигательного действия и оценить уровень физической подготовленности человека. Конструкция устройства предполагает минимизацию размеров и веса, а также удобство крепления для уменьшения влияния на естественные движения человека. Стандарт беспроводного канала передачи данных должен обеспечивать максимальное расстояние и скорость передачи данных, при этом иметь минимальное энергопотребление. Предложенная система может использоваться для исследования движений человека в клинической и спортивной медицине, а также в тренировочном процессе спортсменов.

Контроль и формирование движений человека. Движение человека представляет собой результат согласованной работы различных систем организма (опорно-двигательного аппарата, нервной системы, сердечно-сосудистой системы и т. д.). Сегодня актуальными для медицины и спорта являются задачи формирования у человека эффективного двигательного стереотипа, а также адаптации сформированного двигательного навыка в соответствии с заданными параметрами.

Предложена техническая система управляемого изменения двигательного навыка человека на основе многоканальной электростимуляции (рис. 2) [18]. На первом этапе на основании многоканальной электромиографии техническая система осуществляет структурно-функциональный анализ двигательного стереотипа человека (блок диагностики). На втором происходит построение индивидуальной программы многоканальной электростимуляции (блок выделения окон стимуляции) и корректирование выделенных окон стимуляции на базе эталонных программ (блок эталонных программ стимуляции). Система позволяет задавать критерии выделения окон стимуляции (вид интерполяции электромиографического сигнала, границы значимости временных интервалов, ширина окна стимуляции), а также параметры стимулирующего сигнала (вид, частота, амплитуда и проч.). На третьем этапе на основании разработанной программы многоканальной электростимуляции осуществляется формирование сигналов стимуляции для каждого канала (блок стимуляции). При этом для каждого канала электростимуляции учитываются временная организация окон стимуляции и амплитуда сигнала в окне стимуляции. Следует отметить, что электромиография и электростимуляция проводятся посредством одних и тех же пар электродов (блок электродов), коммутируемых либо к блоку стимуляции, либо к блоку диагностики.

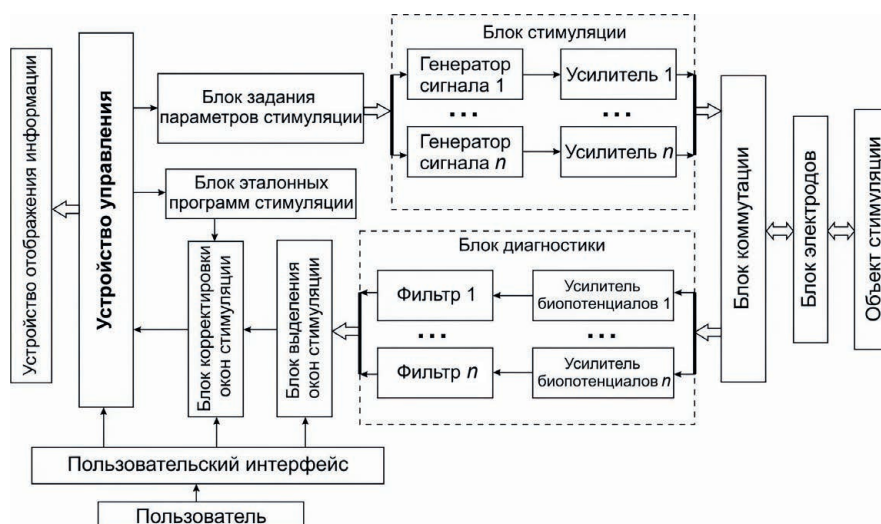


Рис. 2. Схема технической системы для контроля и формирования двигательного навыка человека
Fig. 2. The scheme of the technical system for the control and formation of human motor skills

Предложенная система может использоваться в клинической и спортивной медицине для формирования у человека эффективного двигательного стереотипа или адаптации уже сформированного двигательного навыка в соответствии с заданными параметрами. В рамках данного направления разработан лечебно-диагностический комплекс для анализа и контроля динамики функционального состояния опорно-двигательного аппарата человека на основе частотно-временного анализа суммарной электромиограммы. Технический комплекс включает электромиограф с частотно-временной обработкой интерференционной электромиограммы, а также электромиостимулятор, формирующий сигнал на базе анализа биоэлектрической активности мышц. Предложенный комплекс может использоваться для реабилитации и лечения опорно-двигательного аппарата человека.

Применение кислорода в медицине при лечении различных заболеваний

Перспективность применения кислорода в медицине при различных заболеваниях, сопровождающихся острой и хронической дыхательной недостаточностью, была признана практически сразу после его открытия немецко-шведским химиком Карлом Вильгельмом Шееле в 1771 г. Сегодня респираторная поддержка, традиционно тесно связанная с интенсивной терапией и реанимацией, активно внедряется и во многие другие направления медицины ввиду актуальности проблемы гипоксии, в том числе в условиях последствий пандемии COVID-19, поиска немедикаментозных методов лечения, а также благодаря разработке новых технологий получения и применения кислорода.

Предложена методика оперативной коррекции скорости подачи кислорода пациенту в ходе терапии дыхательной недостаточности на основе мониторинга значений частоты дыхания, сатурации и пульса с целью оптимизации расхода кислорода и повышения эффективности терапии. Данная методика реализована в оригинальном медицинском устройстве [19], которое может работать как с концентраторами кислорода, так и со стационарной кислородной сетью учреждения здравоохранения или с кислородными баллонами [20]. При отсутствии кислородной терапии происходит снижение сатурации до 78 % и соответствующее повышение пульса. Подача кислорода посредством предлагаемого устройства позволила нормализовать значения сатурации (до 94 %) и пульса, сократив расход кислорода с 5 до 1 л/мин [21]. Доказанную эффективность в терапии заболеваний кардиологического, неврологического и пульмонологического профилей показал аппарат для проведения кислородно-гелиевой терапии, который позволяет выполнять ингаляции подогретой до 35–99 °С кислородно-гелиевой смесью (30 % кислорода и 70 % гелия). Высокая эффективность обуславливается низкой плотностью, высокой теплопроводностью и диффузионной способностью гелия.

Актуальная задача – предупреждение и своевременное выявление заболеваний, в том числе на базе санаторно-курортных и оздоровительных учреждений. С такой целью разработан программно-аппаратный комплекс, осуществляющий раннее выявление заболеваний органов дыхания, а при необходимости – адаптивную контролируемую кислородную и/или СИПАП-терапию [22]. Данный комплекс в режиме реального времени выполняет мониторинг и анализ таких параметров пациента, как частота дыхания, сатурация гемоглобина артериальной крови, пульс, дыхательные усилия грудной клетки и живота, положение тела, храп. Применение комплекса в оздоровительных и санаторно-курортных учреждениях позволяет осуществлять во время первичного приема терапевта скрининг 100 % отдыхающих, фиксировать факты отклонения значений параметров от нормальных показателей, проводить суточное и/или ночное мониторинг при необходимости уточнить диагноз, а также осуществить подбор режима и параметров СИПАП- или кислородной терапии и ее проведение в контролируемом автоматическом режиме посредством аппарата респираторной поддержки для создания положительного давления в дыхательных путях [23], концентратора кислорода [24] и устройства для измерения насыщения кислородом артериального гемоглобина крови человека и частоты сердечных сокращений [25], входящих в его состав.

Принимая во внимание тот факт, что гипоксия также является одним из патогенетических звеньев алкоголизма, с целью терапии как основного наркологического, так и сопутствующих терапевтических и неврологических заболеваний, была разработана портативная система окси-

генации под избыточным давлением [26]. Данная система позволяет реализовать предложенный метод лечения синдрома отмены алкоголя с использованием нормоксической лечебной компрессии (НЛК). В ходе внедрения системы было доказано, что в комплексном лечении НЛК имеет более высокую, чем гипербарическая оксигенация, эффективность в отношении снижения тяжести патологического влечения к алкоголю, обусловленную вегетативным компонентом [27], и позволяет сократить время пребывания пациентов в стационаре [28].

С целью дистанционного контроля уровня содержания алкоголя в крови водителей транспортных средств, а также операторов технологического оборудования разработана система удаленного мониторинга и управления мобильными и стационарными объектами [29]. Система посредством спутниковой и радиосвязи принимает данные от устройства определения уровня содержания алкоголя в крови человека и отправляет команды на устройство блокировки исполнительного механизма, расположенные на удаленном объекте, осуществляя тем самым дистанционный контроль и управление данным объектом.

Заключение

1. Разработана трехуровневая система длительного дистанционного мониторинга жизненных параметров человека на основе беспроводных нательных сетей. Система позволяет осуществлять мониторинг жизненно важных параметров посредством регистрации биомедицинских сигналов, идентификации предкризовых и критических состояний (гипертонический криз, инфаркт миокарда, инсульт и т. д.) и выработки тревожной сигнализации как для пациента, так и для медицинского персонала с целью принятия неотложных мер.

2. Создано мобильное приложение ALS Expert, которое выполняет функции анализа голосового сигнала (вычисление пертурбационных параметров голоса и индекса патологичности вибрата) и предварительного детектирования наличия признаков широкого спектра заболеваний с использованием линейного дискриминантного анализа. Мобильное приложение тестировалось в РНПЦ неврологии и нейрохирургии: предварительные результаты показали, что оно обладает высокой эффективностью.

3. Разработана математическая модель воздействия электромагнитного поля на биологические ткани, учитывающая их удельную электропроводность и относительную диэлектрическую проницаемость. На основе модели в платформе Sim4Life рассчитаны параметры отклика в биологических тканях. Программа позволяет моделировать различные типы источников, элементов приборов электромагнитного излучения и реализовать возможности их применения на цифровых фантомах экспериментальных животных и людей с базой данных всех электростатических и биоэлектрических характеристик тканей. Полученные результаты могут быть использованы при проведении пилотных и клинических исследований.

4. Предложено для повышения эффективности физиотерапевтических процедур использовать методы сочетанного воздействия активирующих факторов различной физической природы: ультразвука и электрофореза, ультразвуковых и магнитных полей высокой интенсивности, светотерапии и физических нагрузок высокой интенсивности.

5. Представлена техническая система многоканальной электростимуляции с программным управлением параметрами стимулирующих сигналов. Разработаны лечебно-диагностический аппаратно-программный комплекс, содержащий электромиограф с частотно-временной обработкой суммарной электромиограммы, и электромиостимулятор с формированием стимулирующего сигнала различной сократительной способности на основе анализа биоэлектрической активности мышц.

6. Создана методика оперативной коррекции скорости подачи кислорода пациенту в ходе терапии дыхательной недостаточности на основе мониторинга значений частоты дыхания, сатурации и пульса. Методика реализована в оригинальном медицинском устройстве, которое может работать как с концентраторами кислорода, так и со стационарной кислородной сетью учреждения здравоохранения или с кислородными баллонами. Разработана система удаленного мониторинга и управления мобильными и стационарными объектами с целью дистанционного контроля уровня содержания алкоголя в крови водителей транспортных средств, а также операторов технологического оборудования.

Список литературы / References

1. Osipov A. N., Rolich O. C., Kluev A. P., Vladymtsev V. D., Migalevich S. A., Khazanovsky I. O. (2023) Heart Rate Measurement Algorithm in the Monitoring System of Human Body Condition. *Digital Transformation*. 29 (4), 66–72. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-4-66-72> (in Russian).
2. Osipov A. N., Patseev A. V., Patseev S. V. (2023) Analysis Algorithm of Biomedical Signals in Remote Monitoring Systems of Human Health. *Doklady BGUIR*. 21 (1), 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-5-11> (in Russian).
3. Patseev A. V., Patseev S. V., Osipov A. N. A Method for Remote Monitoring of the Human Condition. *The Decision to Grant a Patent under EA Application No 202390206*.
4. Uloza V., Padervinskis E., Vegiene A., Pribuisiene R., Saferis V., Vaiciukynas E., et al. (2015) Exploring the Feasibility of Smart Phone Microphone for Measurement of Acoustic Voice Parameters and Voice Pathology Screening. *European Archives of Otorhinolaryngology*. 272, 3391–3399.
5. Rusz J., Hlavnička J., Tykalová T., Novotný M., Dušek P., Šonka K., et al. (2018) Smartphone Allows Capture of Speech Abnormalities Associated with High Risk of Developing Parkinson's Disease. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 26 (8), 1495–1507.
6. Lauraitis A., Maskeliūnas R., Damaševičius R., Krilavičius T. (2020) A Mobile Application for Smart Computer-aided Self-administered Testing of Cognition, Speech, and Motor Impairment. *Sensors*. 20 (11), 1–22.
7. Vashkevich M., Petrovsky A., Rushkevich Y. (2019) Bulbar ALS Detection Based on Analysis of Voice Perturbation and Vibrato. *IEEE Intern. Conf. on Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications, Poznan, Poland, 18–20 Sept.* 267–272.
8. Vashkevich M. I., Azarov I. S. (2020) Determination of the Pathology of the Vocal Apparatus Based on the Analysis of the Modulation Spectrum of Speech in Critical Bands. *Proceedings of SPIIRAN*. (2), 249–276.
9. Vashkevich M. I., Likhachov D. S., Azarov I. S. (2022) Voice Analysis and Classification System Based on Perturbation Parameters and Cepstral Presentation in Psychoacoustic Scales. *Doklady BGUIR*. 20 (1), 73–82. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-1-73-82> (in Russian).
10. Likhachov D., Vashkevich M., Azarov E., Malhina K., Rushkevich Y. (2021) A Mobile Application for Detection of Amyotrophic Lateral Sclerosis Via Voice Analysis. *Speech and Computer. SPECOM 2021. Lecture Notes in Computer Science*. Springer. 12997, 372–383.
11. Ulashchik V. S., Molchanova A. Yu., Zhavoronok I. P., Melik-Kasumov T. B., Schastnaya N. I., Voichenko N. V., et al. (2018) *Electromagnetic Therapy: New Data and Technologies*. Minsk, Belaruskaya Navuka.
12. Kamlach P. V., Hroda D. S., Churakov A. V., Kamlach V. I., Bondarik V. M., Madveika S. I., et al. (2020) Model of Electromagnetic Field Effect on Biological Tissues. *Doklady BGUIR*. 18 (8), 46–52. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-8-46-52> (in Russian).
13. Kamlach P. V., Sidorovich A. Y., Kulikov N. I., Kamlach V. I., Bondarik V. M., Churakov A. V., et al. (2018) Simulator of Electrical Characteristics of Adipose Tissue. *Doklady BGUIR*. (7) (in Russian).
14. Kamlach P., Sidorovich A., Kulikov M., Kamlach V., Davydova N. (2020) Simulator of Electrical Characteristics of Muscle Tissue. *Journal of Engineering Science*. (3). DOI: 10.528.
15. Churakov A. V., Kamlach P. V., Ongarbayeva A. I. (2023) Simulation of Magnetotargeting of Medicines Based on the Calculation of Permeability of Human Tissues by the Electromagnetic Field. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 118–123. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-118-123> (in Russian).
16. Gorokh P. I., Semenchik I. N., Bondarik V. M., Voitov V. V. (2022) Study of the Effect of Quantum Radiation on the Restoration Process of the Human Deltoid Muscle. *Medelectronics-2022. Medical Electronics and New Medical Technologies: Collection of Scientific Articles of the XIII International Scientific and Technical Conference, Minsk, Dec. 8–9*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 219–224 (in Russian).
17. Davydova N. S. (2011) Structural and Functional Diagnostics of Human Motor Skills Based on the Construction and Analysis of an Electromyographic Portrait of Movement. *News of Biomedical Sciences*. 4 (4), 178–186.
18. Davydova N. S., Osipov A. N., Davydov M. V., Mezhennaya M. M. (2012) Method and Technical Means of Controlled Change Human Motor Skill Based on Multichannel Electrical Stimulation. *Bulletin of the Polish State University. Series C. Fundamental Sciences*. (4), 10–15 (in Russian).
19. Zelmansky O. B., Zelmansky B. V. (2015) Automated Oxygen Delivery System to the Patient. *Pat. 10536 Rep. Belarus, MPK8 A61M 16/00, B01D 53/04; Applicant Borlen LLC. No u20140236; Published on 26.06.2014; Published on 28.02.2015*. Afitsyny Bul. National Center of Intellectual Property. (1), 131–132.
20. Zelmansky O. B., Davidovskaya E. I. (2016) Apparatus for the Long-Term Oxygen Therapy. *Doklady BGUIR*. (7), 226–230 (in Russian).
21. Zelmansky O. B., Davidovskaya E. I., Dubrovsky A. S. (2020) Respiratory Failure: Technical Means for Diagnosis and Respiratory Support. *Doklady BGUIR*. 18 (8), 29–36 (in Russian).
22. Zelmansky O. B., Zelmansky B. V. (2019) Therapeutic and Diagnostic Complex for Early Detection and Therapy of Respiratory Diseases, Aggravated by Respiratory and Heart Failure, Apnea/Hypopnea Syndrome. *Pat. 11984 Rep. Belarus, u20180333; Declared on 29.11.2018; Published on 15.02.2019*. Afitsyny Bul. National Center of Intellectual Property. (2).

23. Zelmansky O. B. (2019) Respiratory Support Device for Creating Positive Pressure in the Respiratory Tract. *Pat. 4305 Rep. Belarus, f20190113; Declared on 18.04.2019; Published on 01.10.2019.* Afitsyny Bul. National Center of Intellectual Property. (6).
24. Zelmansky O. B. (2020) Oxygen Concentrator. *Pat. 4411 Rep. Belarus, f20190242; Application on 03.09.2019; Published on 16.12.2019.* Afitsyny Bul. National Center of Intellectual Property. (1).
25. Zelmansky O. B. (2017) Device for Measuring Oxygen Saturation of Arterial Hemoglobin in Human Blood and Heart Rate. *Pat. 3721 Rep. Belarus, f20160156; Announcement on 13.09.2016; Published on 16.01.2017.* Afitsyny Bul. National Center of Intellectual Property. (2).
26. Zelmansky O. B. (2023) Technical Support for the Application of the Method of Normoxic Therapeutic Compression in Narcological Practice. *Medicine and High Technologies.* (4), 34–39.
27. Капытаў Д. А., Кудін Л. І., Капытаў А. В., Зельманскі О. В. (2020) Dynamics of Lipid Status in Alcohol Withdrawal Syndrome Against the Background of Complex Treatment. *Medical Journal.* (3), 75–83 (in Russian).
28. Капытаў Д., Кудін Л., Капытаў А., Зельманскі О. В. (2020) Estimation of Efficiency of Complex Treatment Alcohol Withdrawal Syndrome Taking into Account Markers of Hepato-Biliary System. *Military Medicine.* (3), 32–43 (in Russian).
29. Zelmansky O. B., Zelmansky B. V. (2011) The System of Remote Monitoring and Management of Mobile and Stationary Facilities and Control of Alcohol Content in the Blood of Personnel of These Facilities. *Pat. 7487 Rep. Belarus, u20110066; Application on 11.02.2011; Published on 06.05.2011.* Official Website. National Center of Intellectual Property. (4), 220–221.

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Бондарик В. М., канд. техн. наук, доц., декан факультета доуниверситетской подготовки и профессиональной ориентации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Вашкевич М. И., д-р техн. наук, проф., проф. каф. электронных вычислительных средств, БГУИР

Давыдов М. В., канд. техн. наук, доц., первый проректор БГУИР

Давыдова Н. С., канд. техн. наук, доц., доц. каф. инфокоммуникационных технологий, БГУИР

Зельманский О. Б., канд. техн. наук, доц., доц. каф. защиты информации, БГУИР

Камлач П. В., канд. техн. наук, доц., зам. декана факультета компьютерного проектирования, БГУИР

Меженная М. М., канд. техн. наук, доц., доц. каф. инженерной психологии и эргономики, БГУИР

Осипов А. Н., канд. техн. наук, доц., зав. лаб. Центра междисциплинарных исследований, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-85-40
E-mail: osipov@bsuir.by
Осипов Анатолий Николаевич

Information about the authors

Bandaryk V. M., Cand. of Sci., Associate Professor, Dean of the Faculty of Pre-University Preparation and Occupational Guidance, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Vashkevich M. I., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Electronic Computing Facilities, BSUIR

Davydov M. V., Cand. of Sci., Associate Professor, First Vice-Rector, BSUIR

Davydova N. S., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information and Communication Technologies, BSUIR

Zelmanski O. B., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Information Security Department, BSUIR

Kamlach P. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Deputy Dean of the Faculty of Computer Engineering, BSUIR

Mezhennaya M. M., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics, BSUIR

Osipov A. N., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Laboratory of the Center for Interdisciplinary Research, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University of Informatics
and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-85-40
E-mail: osipov@bsuir.by
Osipov Anatoliy Nikolaevich