

На правах рукописи

Алавси Хайдер Али Хуссейн

**Мультимодальный классификатор риска кардиореспираторных
заболеваний с учетом сопутствующих заболеваний
и эффекта синергии**

Специальность 2.2.12 – Приборы, системы и изделия
медицинского назначения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2024

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Кузьмин Александр Алексеевич

Официальные оппоненты: **Бодин Олег Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
Пензенский государственный технологический университет, кафедра технического управления качеством, профессор кафедры (г. Пенза)

Алексанян Грайр Каренович
кандидат технических наук, доцент,
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, кафедра информационных и измерительных систем и технологий, доцент кафедры (г. Новочеркасск)

Ведущая организация: Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина (г. Рязань)

Защита диссертации состоится «27» сентября 2024 года в 14⁰⁰ часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.029.03, созданного на базе Юго-Западного государственного университета, Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева, Белгородского государственного национального исследовательского университета, по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета и на сайте <https://swsu.ru/upload/iblock/d2e/2a8i2gl30zyzqxvr4mp1m1fjiu7hjtw/Dissertatsiya-KH.A.KH.-Alavsi.pdf>

Автореферат разослан « » августа 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Милостная Наталья Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Респираторные заболевания (РЗ) занимают лидирующее положение среди всех заболеваний и причин потери трудоспособности во всем мире. В структуре причин смерти РЗ постоянно занимают 3-4 место, и их вклад продолжает расти. Болезни органов дыхания также занимают 3-5 место в списке причин инвалидности. В Российской Федерации пневмонией ежегодно заболевают до 1,5 миллиона человек, социально-экономический ущерб от заболеваний органов дыхания составляет до 10% внутреннего валового продукта (ВВП) страны. Одним из ключевых факторов успешного лечения и профилактики осложнений бронхолегочных заболеваний является точная и своевременная диагностика. Использование системы поддержки клинических рекомендаций (СППКР) становится всё более востребованным решением, позволяющим повысить точность и скорость диагностики, а также эффективность последующего лечения. Тем не менее, на рынке отсутствуют готовые решения для СППКР по оценке риска РЗ. Поэтому разработка СППКР для диагностики заболеваний органов дыхания является актуальной задачей и сможет стать важным инструментом для поддержки медицинских специалистов в принятии решений и снижении заболеваемости РЗ в целом.

Многочисленные исследования в области профилактики и диагностики РЗ показывают, что наличие сопутствующих сердечнососудистых заболеваний (ССЗ) вносит существенный вклад в кумулятивную выживаемость, а кумулятивный риск наступления неблагоприятных событий выше для каждого типа конечной точки (КТ). Наиболее распространенным ССЗ и фактором риска основных причин смерти является артериальная гипертония (АГ), распространенность которой в России составляет около 40% у взрослых людей. Сочетание АГ и РЗ может приводить к взаимовлиянию болезней и ухудшать прогноз. Поэтому целесообразны дальнейшие исследования в области изучения коморбидности АГ и РЗ с целью разработки СППКР для профилактики и диагностики этих заболеваний с учетом синергии их взаимовлияния.

Степень разработанности темы исследования. В основу построения новых технологий получения данных и новых компьютерных методов обработки данных для интеллектуальной поддержки дифференциальной диагностики РЗ и коморбидных заболеваний в виде АГ положены исследования в области кардиореспираторной синхронизации, получившие развитие при мониторинге апноэ [Ingrid Daubechies, с соавторами, 2009], а также исследования в области анализа синхронности системных ритмов, извлекаемых из кардиосигналов [Петрова Т.В., 2017 и Мяснянкин М.Б., 2022]. Анализ биоритмов живой системы (ЖС) позволяет оценить функциональное состояние (ФС) кардиореспираторной системы (КРС) в целом, особенно на этапах переходных состояний, связанных с обострением одного из коморбидных заболеваний.

Для формирования дескрипторов для классификаторов ФС КРС используют электрофизиологические сигналы, обеспечивающие управление движением грудной клетки (ГК) - электромиосигналы (ЭМС), и кардосигналы, которые модулируются сигналом дыхательных движений (СДД) ГК. Для формирования дескрипторов используется спектральный анализ этих сигналов или анализ их взаимных спектров [Yu-Chen Huang с соавторами, 2021]. При этом наиболее информативные показатели проявляются в области медленных волн, что требует длительного мониторинга сигналов [А. Р. Romanchuk с соавторами, 2019]. Мониторинг кардосигналов и ЭМС позволяет получить комплексную информацию о КРС [О.В. Гришин с соавторами, 2012].

Таким образом, научно-технической задачей исследования является разработка мультимодального классификатора риска кардиореспираторных заболеваний с учетом сопутствующих заболеваний и эффекта синергии.

Цель работы. Повышение качества диагностики кардиореспираторных заболеваний посредством мультимодальных классификаторов медицинского риска, учитывающих наличие коморбидных заболеваний, а также синхронизм сердечнососудистой системы и системы дыхания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ методов интеллектуальной поддержки заболеваний системы дыхания с учетом оценки показателей синхронизма кардиореспираторной системы.

2. Разработать метод формирования дескрипторов для классификатора заболеваний системы дыхания с учетом кардиореспираторного синхронизма.

3. Разработать метод классификации функционального состояния системы дыхания, в котором показатели синхронизма кардиореспираторной системы используются в качестве дескрипторов.

4. Разработать мультимодальный классификатор с иерархической структурой для классификации риска коморбидных заболеваний, предназначенный для системы поддержки принятия клинических решений при диагностике заболеваний кардиореспираторной системы.

5. Разработать структуру системы поддержки принятия клинических решений при диагностике заболеваний системы дыхания с учетом коморбидных заболеваний.

6. Провести экспериментальные и статистические исследования показателей качества классификатора риска заболеваний системы дыхания на примере диагностики степени тяжести внебольничной пневмонии (ВБП) с фоновой артериальной гипертензией.

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

1. Метод оценки синхронизма кардиореспираторной системы, основанный на сравнении мощностей спектров ритма дыхания, полученных из поверхностной электромиограммы дыхательных мышц и кардиосигнала, отличающийся технологией оценки распределения векторов, полученных в пространстве вейвлет-коэффициентов поверхностной электромиограммы дыхательных мышц и кардиосигнала, дислоцируемых на вейвлет-плоскостях в области ритма дыхания, и позволяющий формировать дескрипторы для обучаемых классификаторов функционального состояния системы дыхания.

2. Метод классификации функционального состояния системы дыхания, заключающийся в параллельной записи электромиосигнала дыхательных мышц $x(t)$ и кардиосигнала $y(t)$ на апертуре 60...120 секунд и определения их дискретных оконных преобразований Фурье, отличающийся тем, что дискретные оконные преобразования Фурье определяются в $N-m1$ окнах этих сигналов, где N -число дискретных отсчетов на апертуре наблюдения сигналов, $m1$ -число отсчетов в окне, амплитудные спектры X_i и Y_i дискриминируются по частоте путем удаления из спектров отсчетов частот, которые лежат ниже или выше полосы частот, занимаемой ритмом дыхания. Над селектированными частотными отсчетами оконного преобразования Фурье осуществляют амплитудную дискриминацию, заключающуюся в том, что спектральные коэффициенты, величина которых ниже заданного порога, обнуляются, а затем для каждой пары отсчетов оконного преобразования Фурье с номером n определяется коэффициент синхронизма, после чего определяют функциональное состояние системы дыхания посредством классификатора, построенного на основе логистической модели, в котором коэффициенты синхронизма используются в качестве дескрипторов.

3. Метод синтеза мультимодального классификатора риска коморбидных заболеваний, отличающийся учетом синергетического эффекта коморбидности, основанном на использовании полносвязной нейронной сети Хопфилда с многосвязной структурой и двумя задержками на один такт, управляемыми парафазным генератором, обеспечивающими запись в регистры задержек рисков коморбидных заболеваний с выходов нейронной сети Хопфилда, который позволяет учесть влияние синергетического эффекта коморбидности на суммарный медицинский риск.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что изложенные методы и алгоритмы построения и функционирования интеллектуальной системы поддержки принятия клинических решений при диагностике заболеваний КРС, основанные на анализе синхронности системных ритмов, которые апробированы при дифференциальной диагностике больных ВБП и АГ.

Разработано программное обеспечение для интерактивного создания модели нейронной сети - NetModel (Свидетельство о государственной регистрации №2023685902 от 30.11.2023).

Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» и в соответствии с научным направлением Юго-Западного государственного университета «Разработка медико-экологических информационных технологий».

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Юго-Западного государственного университета при подготовке магистров по направлению подготовки 12.04.04 – Биотехнические системы и технологии.

Методы и средства исследований. Для решения поставленных задач использовались теория биотехнических систем медицинского назначения, математический аппарат цифровой обработки сигналов, статистический анализ, теория нейронных сетей, теория спектрального анализа, теория вейвлет-анализа, методы экспертного оценивания и принятия решений. При разработке модулей мультимодального классификатора в качестве инструментария использовался MATLAB 2018b с графическим интерфейсом пользователя Neural Network Toolbox.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод оценки синхронизма кардиореспираторной системы, основанный на сравнении мощностей спектров ритма дыхания, полученных из поверхностной электромиограммы дыхательных мышц и кардиосигнала, позволяющий формировать дескрипторы для обучаемых классификаторов функционального состояния кардиореспираторной системы и учитывать синергетический эффект коморбидных заболеваний.

2. Метод классификации функционального состояния системы дыхания, заключающийся в параллельной записи электромиосигнала дыхательных мышц $x(t)$ и кардиосигнала $y(t)$ на апертуре 60...120 секунд и определения их дискретных оконных преобразований Фурье, отличающийся выбором значимых отсчетов спектра Фурье этих сигналов, позволяющий получить дескрипторы для классификации риска внебольничной пневмонии при наличии коморбидности в виде артериальной гипертензии с показателями качества не ниже 0,80.

3. Мультимодальный классификатор степени тяжести внебольничной пневмонии с синергетическими классификаторами риска коморбидного заболевания на примере артериальной гипертензии позволил повысить показатели качества классификации более чем на 12% по сравнению с мультимодальным классификатором с выключенным синергетическим каналом.

Степень достоверности и апробация работы. Результаты исследования показали их воспроизводимость в различных условиях, непротиворечивость концепциям теории цифровой обработки и классификации электрофизиологических сигналов, а также аналогичным результатам, полученным другими исследователями. Методы и алгоритмы

классификации кардиосигналов и электромиосигналов построены на теории цифровой обработки сигналов и согласуются с ранее опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 11 международных и всероссийских конференциях: «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2021» (Рязань – 2021); «Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века» (Пермь – 2022); «Моделирование и прогнозирование развития отраслей социально-экономической сферы» (Курск – 2022); Завалишинские чтения'23 (Санкт-Петербург-2023); Биотехнология и биомедицинская инженерия (Курск – 2023); «Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития» (Тамбов – 2023); «Лазерно-информационные технологии» (Новороссийск – 2023); Актуальные проблемы медицинской науки и образования (АПМНО-2023) (Пенза – 2023); «Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике» (Пенза-2023); Proceedings of the 2023 International Conference on Systems and Technologies of the Digital HealthCare (STDH – 2023) (Ташкент-2023); «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии - ФРЭМЭ» (Владимир–Суздаль – 2024); «Медицинские приборы и технологии» (Тула – 2024); на научно-технических семинарах кафедры биомедицинской инженерии ЮЗГУ (Курск – 2020-2024).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 16 научных работах, из них 5 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, 1 статья в Международной наукометрической базе Scopus и одно Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы, включающего 103 российских и 49 зарубежных наименований. Работа изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 49 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе рассмотрена роль интеллектуальных систем поддержки принятия врачебных решений в дифференциальной диагностике кардиореспираторных заболеваний. Очерчены связанные с коморбидностью проблемы диагностики этих заболеваний и проведен анализ методов диагностики коморбидных заболеваний при патологии кардиореспираторной системы. Из анализа научно-технической литературы по этому направлению установлено, что проблемы коморбидности заболеваний дыхательной системы могут быть решены посредством анализа синхронности ритмов в дыхательной и сердечнососудистой системах. С этой целью могут быть использованы частотно-временные преобразования, в частности, вейвлет-

преобразование. Установлено, что на его основе могут быть построены системы поддержки принятия врачебных решений.

В заключение первого раздела формируются цель и задачи исследования.

Второй раздел посвящен методам классификации функционального состояния системы дыхания на основе анализа кардиореспираторного синхронизма (КС). Метод оценки синхронизма КРС основан на сравнении мощностей спектра ритма дыхания (РД), полученных из поверхностной электромиограммы (пЭМГ) дыхательных мышц и кардиосигнала. Так как и тот, и другой сигналы являются нестационарными, то для исследования их спектральных характеристик используем вейвлет-преобразование.

Так как РД представлен в виде цуга гармоник, то показатель синхронности определяется на каждой частоте РД в виде множества точек в координатах

$$[W_x(\omega_i, t_j), W_y(\omega_i, t_j)], \quad (1)$$

где $W_x(\omega_i, t_j)$ и $W_y(\omega_i, t_j)$ - значения вейвлет-коэффициентов (действительные или комплексные) пЭМГ и кардиосигнала, соответственно, на частоте ω_i в момент времени t_j .

Учитывая, что сигнал пЭМГ сложен для обработки ввиду его зашумленности и хаотичности, то вместо него будем использовать регуляризованный сигнал *RMS*, определяемый по формуле

$$RMS_m = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=m-n}^m x_k^2}, \quad (2)$$

где n – это ширина окна, т.е. число дискретных отсчетов x_k пЭМГ, которые накапливаются микроконтроллером до текущего отсчета m .

Если пЭМГ и кардиосигнал оцифровывать синхронно, то на каждой частоте ω_i может быть получено множество (1) для $t_j \in [t_1, t_N]$, где N -число отсчетов на апертуре наблюдения этих сигналов. На рисунке 1 представлены эти два множества для $N=32768$, полученные при частоте дискретизации этих сигналов 630 Гц. Сигнал пЭМГ представлен в виде отсчетов *RMS*, вычисляемых согласно (2). Кардиосигнал представлен фотоплетизмосигналом, а пЭМГ – *RMS*, постоянная составляющая у обоих сигналов удалена.

Посредством выражения (1) можно получить множество векторов на плоскости, положения которых зависит не только от показателя синхронности КРС, но и от особенностей сигналов различных индивидуумов. Множество таких векторов приведено на рисунке 2.

С учетом того, что процессы, определяющие нестационарность сигналов по времени и по частоте одинаковы, как для кардиосигнала, так и для пЭМГ, отношение их вейвлет-коэффициентов является менее зависимым

от помех и более коррелированным с синхронизмом КРС. Поэтому дислокацию этих векторов можем оценить одной скалярной величиной

$$\varphi(\omega_i) = (\arctg(W_y / W_x))_{max} - (\arctg(W_y / W_x))_{min}. \quad (3)$$

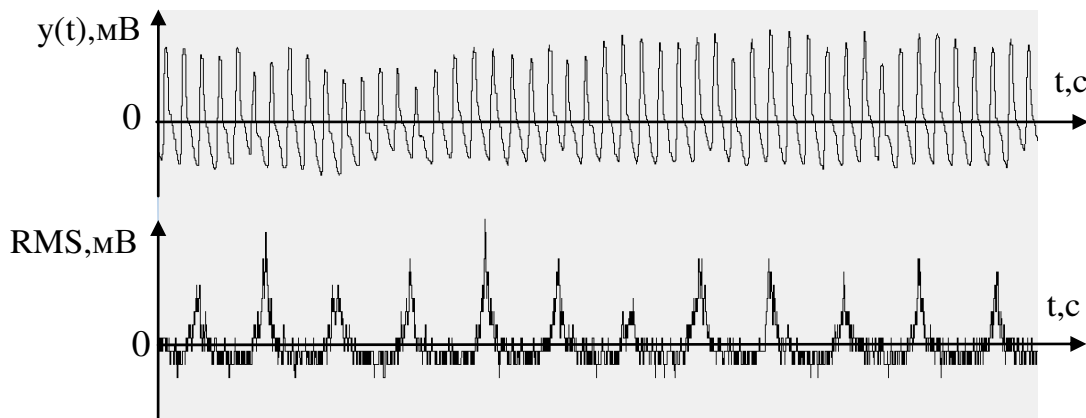


Рисунок 1 – Отсчеты кардиосигнала (а) и пЭМГ (б) при $N=32768$ и частоте дискретизации 630 Гц

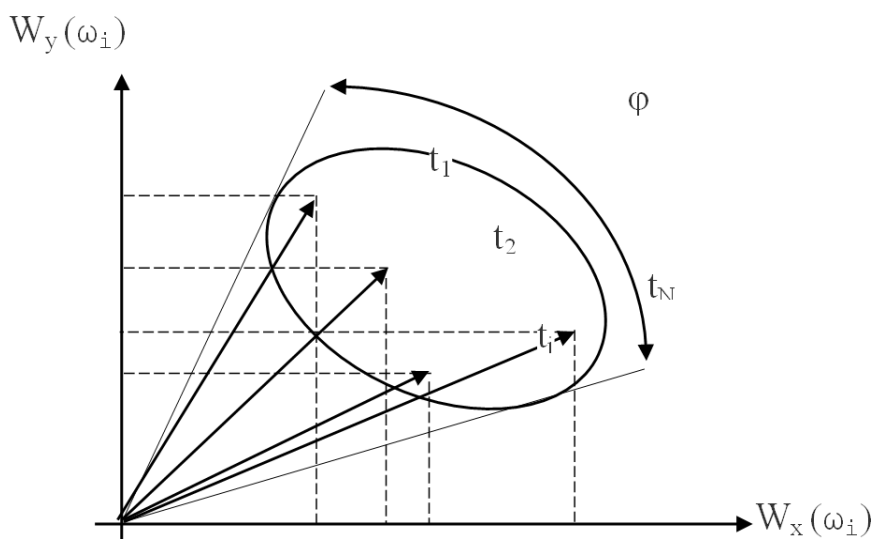


Рисунок 2 – Множество векторов t_1, t_2, \dots, t_i , характеризующих синхронизм кардиореспираторной системы на частоте ω_i

Определив множество частот $\{\omega_i\}, i=\overline{1, M}$, где M – число анализируемых частот на вейвлет-плоскости, получаем вектор информативных признаков для обучаемого классификатора показателя синхронизма КРС. Для определения числа анализируемых частот на вейвлет-плоскости, а также их количества, использовались спектры Фурье кардиосигнала (фотоплетизмосигнала) и пЭМГ. Для формирования дескрипторов использовался программно-аппаратный комплекс (ПАК), предназначенный для синхронной обработки и анализа двух сигналов: пЭМГ ($x(t)$) и

фотоплетизмограммы ($y(t)$). Если сигнал $y(t)$ поступает непосредственно на модуль вычисления вейвлет-преобразования, то сигнал $x(t)$ нуждается в предварительной обработке.

Сначала $x(t)$ преобразуется согласно (2). Так как это нелинейное преобразование, то после него сигнал пропускается через фильтр нижних частот (ФНЧ) с частотой среза 30 Гц. Затем в дециматоре осуществляется понижение частоты дискретизации пЭМГ до частоты дискретизации кардиосигнала. Таким образом, индексы вейвлет-плоскости, построенной по пЭМГ, становятся эквивалентными индексам вейвлет-плоскости, построенной по кардиосигналу. Каждая частота соответствует строке вейвлет-коэффициентов на вейвлет-плоскости. На формирователь дескрипторов (ФД) поступают пары вейвлет-коэффициентов, с одинаковыми временными и частотными координатами, но взятыми из разных вейвлет-плоскостей. Каждый ФД формирует один дескриптор, интегрирующий фазовые углы по определенной частоте из цуга РД. Количество ФД определяется числом анализируемых частот в цуге РД. В качестве обучаемого классификатора использовалась многослойная нейронная сеть (NET).

Метод классификации функционального состояния системы дыхания (СД), заключается в одномоментной записи электромиосигнала дыхательных мышц $x(t)$ и кардиосигнала $y(t)$ на апертуре 60...120 секунд и определения их дискретных оконных преобразований Фурье. Дискретные оконные преобразования Фурье определяются в $N-m1$ окнах этих сигналов, где N -число дискретных отсчетов на апертуре наблюдения сигналов, $m1$ -число отсчетов в окне, амплитудные спектры X_i и Y_i дискриминируется по частоте путем удаления из спектров отсчетов частот, которые лежат ниже или выше полосы частот, занимаемой ритмом дыхания. Над селектированными частотными отсчетами оконного преобразования Фурье (ОПФ) осуществляют амплитудная дискриминация, которая заключается в том, что спектральные коэффициенты, величина которых ниже заданного порога, обнуляются, а затем для каждой пары отсчетов ОПФ с номером n определяется коэффициент синхронизма, после чего определяют функциональное состояние системы дыхания посредством классификатора, построенного на основе логистической модели, в котором коэффициенты синхронизма используются в качестве дескрипторов.

Структурная схема преобразования сигналов при классификации функционального состояния СД представлена на рисунке 3.

Амплитудные спектры ОПФ X_i и Y_i дискриминируется по частоте и амплитуде. Частотная дискриминация заключается в том, что из спектра отчетов удаляются все отчеты, которые лежат выше и ниже полосы частот ритма дыхания. Амплитудная дискриминация спектра ОПФ заключается в том, что спектральные коэффициенты, величина которых ниже заданного порога, обнуляются. Затем для каждого ОПФ с номером n определяется коэффициент синхронизма по формуле

$$k_n = \frac{m2}{\sum_{i \in \theta_n} X_{in} \cdot \sum_{i \in \theta_n} Y_{in}} \sum_{i \in \theta_n} X_{in} \cdot Y_{in}, \quad (4)$$

где $m2$ - ширина окна в отсчетах, в котором определяется ОПФ, X_{in} и Y_{in} – отсчеты спектральных составляющих фотоплетизмосигнала и электромиосигнала в окне с номером n .

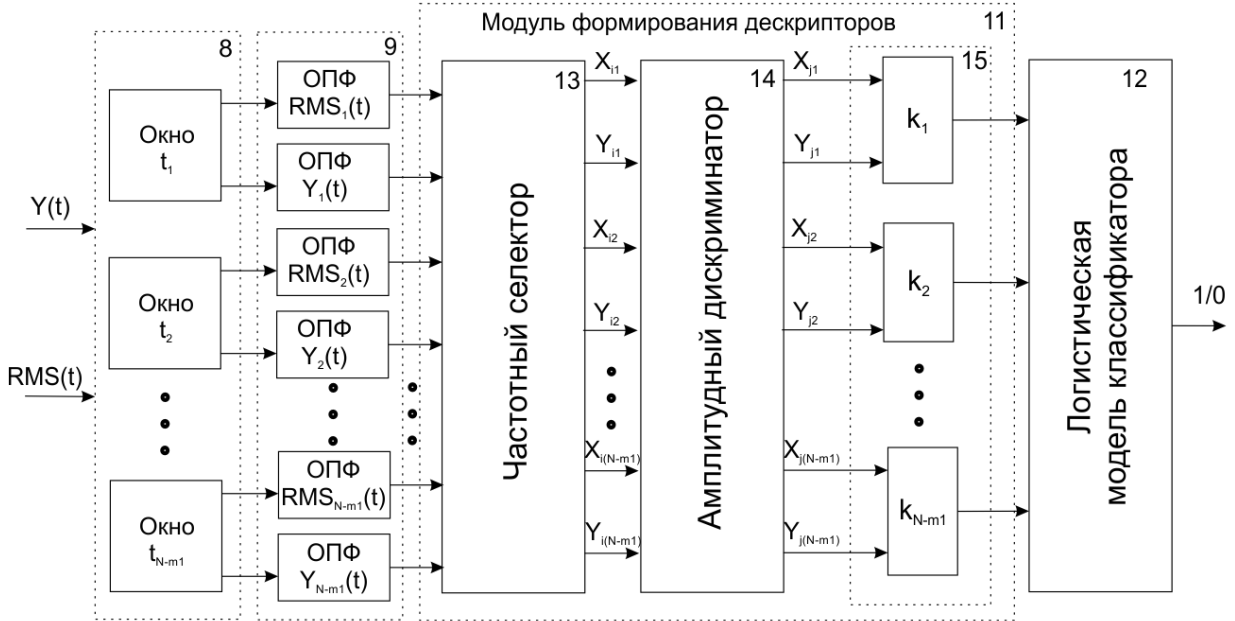


Рисунок 3 - Структурная схема преобразования сигналов при классификации функционального состояния системы дыхания

Функциональное состояние системы дыхания определяют на основе логистической модели

$$R = \frac{\exp(z)}{1 + \exp(z)}, \quad (5)$$

где $z = a_0 + a_1 k_1 + a_2 k_2 + \dots + a_n k_n + \dots + a_{N-m1} k_{N-m1}$; $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, \dots, a_{N-m1}$ – настраиваемые параметры.

Селектированные по частоте дискретные спектральные отсчеты ритма дыхания X_i и Y_i поступают на пороговые устройства θ_1 и θ_2 амплитудного дискриминатора 14 рисунка 3. В пороговых устройствах отчеты спектров X_{in} и Y_{in} преобразуются согласно выражениям

$$X_{jn} = \begin{cases} X_{in} & \text{при } X_{in} > \theta_1; \\ 0 & \text{при } X_{in} \leq \theta_1. \end{cases} \quad (6)$$

$$Y_{jn} = \begin{cases} Y_{in} & \text{при } Y_{in} > \theta_2; \\ 0 & \text{при } Y_{in} \leq \theta_2. \end{cases} \quad (7)$$

В каждой паре окон ОПФ с номером n определяется коэффициент синхронизма по формуле

$$k_n = \frac{m2}{\sum_{j \in \theta_{1n}} X_{jn} \cdot \sum_{j \in \theta_{2n}} Y_{jn}} \sum_{i \in \theta_n} X_{jn} \cdot Y_{jn} \cdot \quad (8)$$

где $m2$ - ширина окна ОПФ в отсчетах после частотной селекции, X_{jn} и Y_{jn} – отсчеты спектральных составляющих фотоплетизмосигнала и RMS электромиосигнала на выходе амплитудного дискриминатора 14 рисунка 3.

Функциональное состояние системы дыхания определяют классификатором 12 (рисунок 3), построенным на основе логистической модели (5):

$$P(R = 1|K) = \frac{\exp(z)}{1 + \exp(z)}, \quad (9)$$

где $P(R = 1|K)$ - вероятность того, что бинарный результат R (риск) равен 1 при заданном векторе синхронизма K ; K – вектор информативных признаков, компоненты которого равны выходам вычислителей 15 (рисунок 3); $z = a_0 + a_1 k_1 + a_2 k_2 + \dots + a_n k_n + \dots + a_{N-m1} k_{N-m1}$; $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, \dots, a_{N-m1}$ – настраиваемые параметры модели, которые определяются в ходе обучения.

Для оценки влияния риска одного заболевания на риск другого заболевания используется тот факт, что коморбидные заболевания не только усиливают взаимные медицинские риски (МР), но и имеют ряд одинаковых факторов риска (ФР). Поэтому наличие коморбидности приводит к изменению влияния ФР на МР коморбидного заболевания. Такой подход позволяет учитывать синергетический эффект на входе классификатора МР.

Формально синергетический эффект может быть учтен вводом M дополнительных (виртуальных) ФР в виде некоторых функций (моделей) от реальных ФР: $f_1(X_1, X_2, \dots, X_N), f_2(X_1, X_2, \dots, X_N), \dots, f_m(X_1, X_2, \dots, X_N), \dots, f_M(X_1, X_2, \dots, X_N)$. Здесь X_1, X_2, \dots, X_N - множество реальных факторов риска количеством N . В качестве моделей виртуальных ФР используем частные функции влияния Z_{ij} и Z_{ji} i -го ФР на j -й ФР и наоборот, определяемые по формулам

$$\begin{aligned} Z_{ij} &= a_{ii} X_i + a_{ij} X_j + b_{ij} X_i X_j; \\ Z_{ji} &= a_{ji} X_i + a_{jj} X_j + b_{ji} X_i X_j. \end{aligned} \quad (10)$$

На основе этих формул разработан метод синтеза классификатора риска внебольничной пневмонии с учетом коморбидности. Метод отличается вводом дополнительного фактора риска, представленного двухконтурной нелинейной моделью реальных факторов риска, с последующим синтезом слабых классификаторов на ее основе. Метод позволяет построить мультимодальный классификатор риска внебольничной

пневмонии, который учитывает взаимное влияние коморбидных заболеваний на суммарный медицинский риск.

Второй подход учета влияния коморбидности на МР предусматривает учет синергии на выходах слабых классификаторов МР. При этом риск коморбидных заболеваний описывается математическими моделями (линейными или нелинейными), например, моделями многомерной линейной регрессии, в которых МР коморбидных заболеваний $R1$ и $R2$ входят в виде скалярных составляющих:

$$\begin{cases} R1 = [A1] \cdot [X1]^T + [B1] \cdot [X3]^T + c1 \cdot R2 \\ R2 = [A2] \cdot [X2]^T + [B2] \cdot [X3]^T + c2 \cdot R1 \end{cases} \quad (11)$$

где $X1$ и $X2$ – векторы специфических ФР для МР $R1$ и $R2$, $X3$ – вектор общих ФР для МР $R1$ и $R2$, $A1$, $A2$, $B1$, $B2$ – матрицы коэффициентов многомерной линейной модели рисков коморбидных заболеваний, $c1$ и $c2$ – коэффициенты, учитывающие взаимное влияние на МР коморбидных заболеваний.

Учитывая, что в системе уравнений (11) независимыми являются коэффициенты при предикторах риска, то есть $A1$, $A2$, $B1$, $B2$ и $c1$ и $c2$, то система алгебраических уравнений (11) является нелинейной. В наиболее простом варианте, когда векторы ФР $X1$, $X2$, $X3$ являются скалярами, запишем:

$$\begin{cases} R1 = \frac{a1}{1 - c1 \cdot c2} \cdot x1 + \frac{a2 \cdot c1}{1 - c1 \cdot c2} \cdot x2 + \frac{b1 + b2 \cdot c1}{1 - c1 \cdot c2} \cdot x3 \\ R2 = \frac{a2}{1 - c1 \cdot c2} \cdot x2 + \frac{a1 \cdot c2}{1 - c1 \cdot c2} \cdot x1 + \frac{b2 + b1 \cdot c2}{1 - c1 \cdot c2} \cdot x3 \end{cases} \quad (12)$$

В третьем разделе разработан мультимодальный классификатор, в основе которого положена гибридная нейронечеткая сеть, содержащая три макрослоя, построенных на парадигме вероятностных нейронных сетей и на парадигме нечеткого логического вывода.

Для классификации риска АГ у пациентов с заболеваниями СД предложен гибридный классификатор с иерархической структурой, на нижнем иерархическом уровне которого включены четыре «слабых» классификатора, построенных на основе нечеткого логического вывода. На верхнем иерархическом уровне гибридного классификатора включена полносвязная нейронная сеть с дополнительным входом, полученным посредством модели виртуального потока. Апробация гибридного классификатора риска АГ позволяет рекомендовать его использовать в мультимодальном классификаторе для определения степени тяжести заболеваний СД у больных с коморбидной артериальной гипертензией.

Для учета синергетического эффекта при наличии коморбидности разработана концептуальная модель классификатора медицинского риска с учетом синергетического эффекта на основе структуры сети Хопфилда

(рисунок 4). Модель отвечает системе уравнений (12). Характерной особенностью этой модели является наличие задержек на один такт Z^{-1} . Задержки управляются парафазным генератором, на выходах которого присутствуют противофазные импульсы, управляющие записью данных с выходов классификатора рисков в регистры задержек. Формально модель рисунка 4 можно рассматривать как одну нейронную сеть (НС) со структурой Хопфилда или как две НС с многосвязной структурой. И в том и в другом случае в структуре НС должна быть предусмотрена задержка на один такт и проведена проверка условия на устойчивость сети. Под устойчивостью НС здесь понимается процесс обучения сети, в результате выполнения которого приращения переменных на ее выходах по каждому примеру стремятся к нулю. На рисунке 5 показан процесс изменения (динамика) показателей риска $R1$ и $R2$ на выходе синергетических классификаторов от эпохи к эпохе при устойчивой НС.

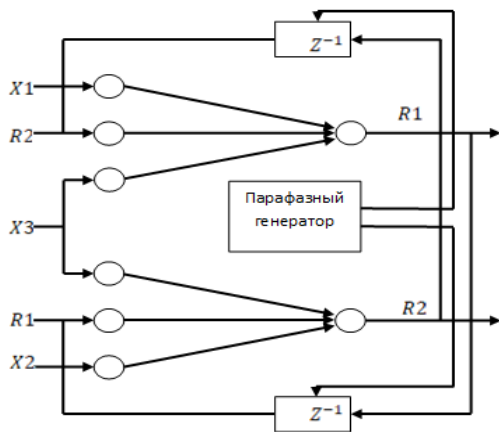


Рисунок 4 – Концептуальная модель классификатора медицинского риска с учетом синергетического эффекта на основе структуры сети Хопфилда

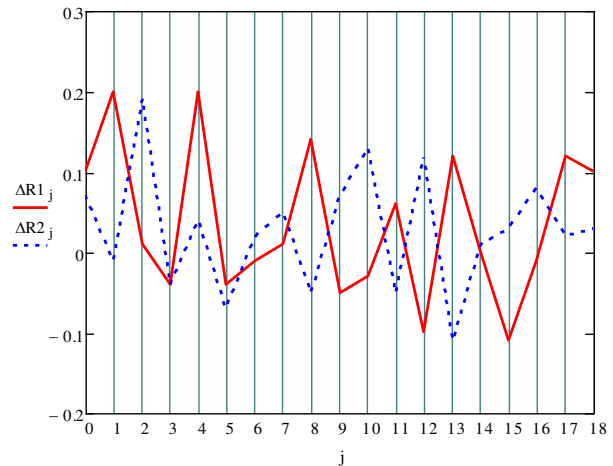


Рисунок 5 – Эпюры динамики показателей риска на выходе синергетических классификаторов от эпохи к эпохе

Для обучения классификаторов с нейронной сетью Хопфилда разработан алгоритм, позволяющий обеспечить заданные показатели точности классификации и заданные показатели устойчивости нейронной сети.

Структурная схема мультимодального классификатора (ММК) риска заболевания СД, предназначенная для СППКР, учитывающая синергетический фактор, представлена на рисунке 6. Среди ФР заболеваний СД выделяют более ста показателей. К наиболее значимым из них относят характер начала заболевания; степень дыхательной недостаточности; показатели артериального давления (АД); индекс массы тела (ИМТ), показатели рентгенографических исследований; показатели клинического анализа крови, возраст и т.д. К основным значимым ФР АГ были отнесены: возраст, курение, показатели АД, стресс, уровень холестерина, ИМТ, наследственность, атеросклероз и другие хронические заболевания.

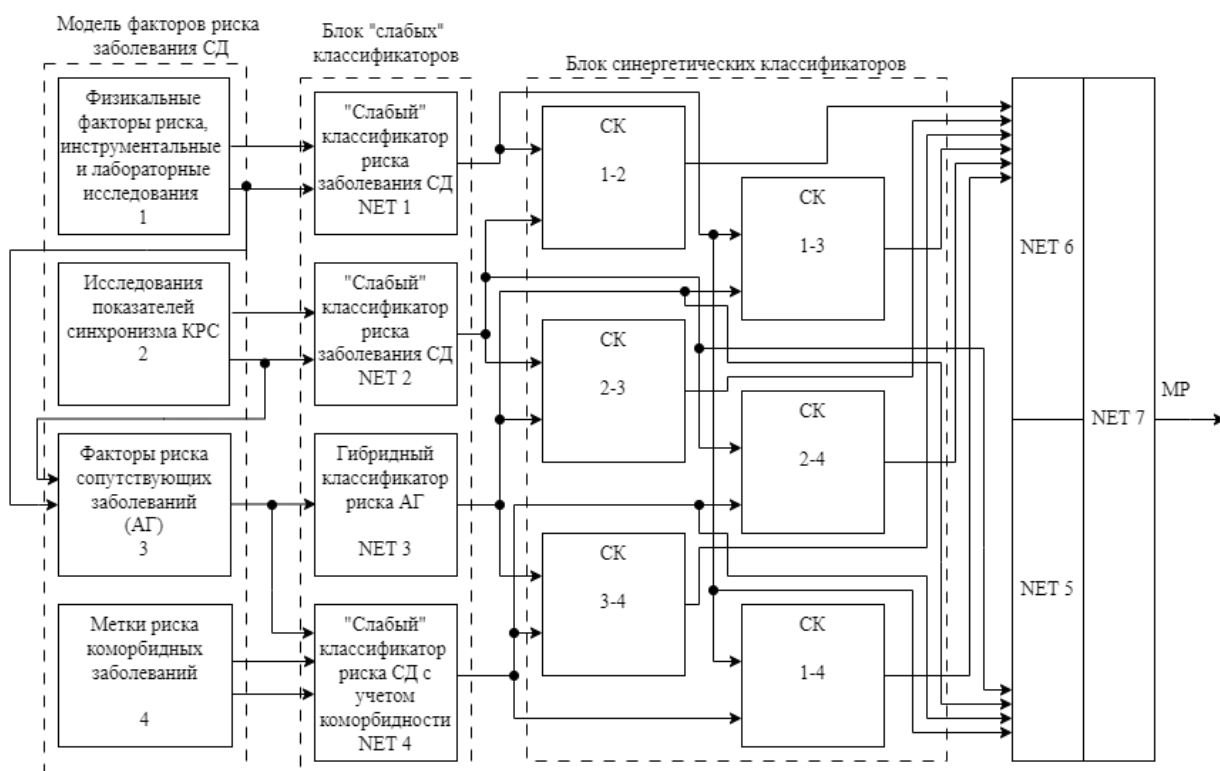


Рисунок 6 – Базовая структурная схема модели мультимодального классификатора риска заболеваний системы дыхания

В связи с этим, в пространстве ФР было выделено четыре сегмента. Они разделены на «неизменяемые» (эти ФР в процессе лечения или реабилитации остаются постоянными и не влияют на динамику риска заболевания) - сегменты 1..3, и оперативные, которые могут «мгновенно» реагировать на изменение функционального состояния (ФС) - сегмент четыре. В первый сегмент ФР включены традиционные ФР заболеваний СД: физикальные, результаты СД инструментальных и лабораторных исследований. Во второй сегмент ФР включены предикторы, полученные по результатам анализа синхронизма КРС. В третий сегмент включены ФР коморбидного заболевания, в данном случае АГ. Четвертый сегмент включает маркеры риска заболевания СД и коморбидного заболевания (АГ) и формирует дескрипторы для классификатора МР, модель которого построена с учетом синергетического эффекта на основе структуры сети Хопфилда.

В четвертом разделе разработана структурная схема СППКР для диагностики заболеваний системы дыхания с учетом эффекта коморбидности, включающая ПЭВМ с программными модулями обработки и анализа данных и ряд вспомогательных технических средств, позволяющих измерять и оцифровывать электрофизиологические сигналы, а также формировать дескрипторы и обучать классификаторы, агрегированные в мультимодальный классификатор.

Проведены экспериментальные и статистические исследования показателей качества модели мультимодального классификатора при двухальтернативной классификации риска ВБП и ОРВИ, использующего

дескрипторы, полученные на основе метода оценки синхронизма кардиореспираторной системы. Основные статистические показатели качества классификатора не были ниже 80% с доверительными интервалами, не превышающими 3% от среднего значения, что позволяет рекомендовать его для использования в СППКР по диагностике заболеваний системы дыхания.

Проведена сравнительная оценка показателей качества классификации моделей ММК, использующих классификаторы, основанные на методе оценки синхронизма кардиореспираторной системы (NET2), и классификатор риска коморбидного заболевания - АГ (NET3). В таблице 1 приведены сравнительные показатели для двух моделей ММК для двух классов степени тяжести ВБП: $n_{\omega_0}=49$ (тяжелая форма ВБП) и $n_{\omega_1}=31$ (нетяжелая форма ВБП).

Таблица 1 - Экспериментальные данные по классификации степени тяжести ВБП на контрольных выборках ВБП + АГ различными моделями классификаторов

Обследуемые	Классификатор NET2+ NET3			Классификатор NET2		
	ДЧ	ДС	ДЭ	ДЧ	ДС	ДЭ
$n_{\omega_0} = 20$	75	85	81	65	68	66
$n_{\omega_1} = 20$	85	75		68	65	

Эксперименты показали, что учет риска коморбидного заболевания на примере АГ при определении степени тяжести ВБП позволил повысить показатели качества классификации степени тяжести ВБП не менее чем на 10% по всем показателям качества классификации степени тяжести ВБП по сравнению с классификатором, не использующем данные о риске коморбидного заболевания.

Экспериментальные исследования ММК риска кардиореспираторных заболеваний с учетом сопутствующих заболеваний и эффекта синергии проводились на основе результатов ретроспективного анализа историй болезни пациентов лечебных учреждений г. Курска с диагнозом ВБП при наличии коморбидности в виде АГ. Ввиду того, что экспериментальная группа формировалась по результатам ретроспективных исследований, классификатор NET2 в ММК не использовался.

В таблице 2 приведены показатели качества ММК, полученные на контрольной выборке. В знаменателе указаны те же результаты, полученные на шкале PSI. ММК формировался из трех слабых классификаторов NET1, NET3 и NET4.

Таблица 2 - Экспериментальные данные по классификации риска внебольничной пневмонии на контрольной выборке

Обследуемые	ДЧ	ДС	ДЭ
$n_{\omega_1} = 40$ (<i>высокий риск</i>)	87/68	91/89	89/73
$n_{\omega_2} = 40$ (<i>средний риск</i>)	84/74	85/74	85/74
$n_{\omega_3} = 60$ (<i>низкий риск</i>)	88/81	92/88	91/81
Всего	39/34	42/46	48/50

В ходе экспериментальных исследований ММК риска ВБП с тремя сегментами факторов риска в экспериментальной выборке группы больных с коморбидностью ВБП и АГ было установлено, что при классификации степени тяжести ВБП используемые показатели качества классификации превышают величину 0,8 по всем группам наблюдения. Сравнительный анализ показателей качества оценки степени тяжести пневмонии известной шкалы PSI показал, что показатели качества оценки риска предложенной модели ММК превосходят аналогичные показатели шкалы PSI на тех же контрольных выборках, в среднем, на 14%.

Таким образом, модель ММК по всем показателям качества классификации на всех экспериментальных и контрольных группах пациентов достигает величины не менее 0,8; что позволяет рекомендовать ее для использования в системах мониторинга и контроля эффективности терапии и реабилитации пациентов с кардиореспираторными заболеваниями при наличии коморбидности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена **научно-техническая задача** разработки мультимодального классификатора риска кардиореспираторных заболеваний с учетом сопутствующих заболеваний и эффекта синергии, имеющая существенное значение для здравоохранения.

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ методов и средств интеллектуальной поддержки диагностики заболеваний системы дыхания, который показал, что повышение эффективности их диагностики может быть достигнуто путем включения в пространство информативных признаков показателей синхронизма кардиореспираторной системы и показателей риска сопутствующих сердечно-сосудистых заболеваний.

2. Разработан метод оценки синхронизма кардиореспираторной системы, основанный на сравнении мощностей спектров ритма дыхания, полученных из поверхностной электромиограммы дыхательных мышц и кардиосигнала, позволяющий формировать дескрипторы для мультимодальных классификаторов риска кардиореспираторных заболеваний.

3. Разработан метод классификации функционального состояния системы дыхания, основанный на одномоментном анализе записей электромиосигнала дыхательных мышц и кардиосигнала, позволяющий классифицировать функциональное состояние системы дыхания посредством логистической модели машинного обучения, в которой коэффициенты синхронизма используются в качестве дескрипторов.

4. Разработан классификатор медицинского риска с учетом коморбидности, основанный на методе ввода в классификационную модель дополнительного фактора риска (виртуального потока), и полносвязной нейронной сети Хопфилда, с алгоритмом обучения, позволяющим обеспечить заданные показатели точности классификации и заданные показатели устойчивости нейронной сети.

5. Разработана базовая структура мультимодального классификатора риска кардиореспираторных заболеваний, учитывающая влияние на их риски показателей синхронизма кардиореспираторной системы и синергию, обусловленную наличием коморбидности, позволяющая формировать различные модели мультимодальных классификаторов кардиореспираторного риска в зависимости от функционального состояния пациента и доступности его медико-биологических показателей.

6. Разработана структурная схема системы поддержки принятия врачебных решений при диагностике коморбидных заболеваний, включающая ЭВМ с программными модулями обработки и анализа данных и ряд вспомогательных технических средств, позволяющих измерять и оцифровывать электрофизиологические сигналы, а также формировать дескрипторы и обучать классификаторы, агрегированные в мультимодальный классификатор

7. Проведены экспериментальные и статистические исследования показателей качества мультимодального классификатора в различных конфигурациях на примере диагностики степени тяжести пневмонии с фоновой артериальной гипертензией. Основные статистические показатели качества классификатора не были ниже 80%, что позволяет рекомендовать его для клинической практики. Учет риска коморбидного заболевания на примере артериальной гипертензии при определении степени тяжести внебольничной пневмонии позволил повысить показатели качества классификации не менее чем на 10% по сравнению с моделью мультимодального классификатора, не использующей данные о риске коморбидного заболевания. Модель мультимодального классификатора с учетом коморбидности по показателям качества оценки степени тяжести внебольничной пневмонии превосходит аналогичные показатели шкалы PSI, в среднем, на 14%.

Рекомендации. Результаты исследования могут быть использованы для построения интеллектуальных систем медицинского назначения для поддержки принятия решений при дифференциальной диагностике патологий системы дыхания и сердечнососудистой системы.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Разработка интеллектуальных систем поддержки принятия решений при прогнозировании осложнений сердечнососудистой системы после респираторных вирусных заболеваний.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. Метод классификации функционального состояния системы дыхания, основанный на контроле показателей кардиореспираторного синхронизма/А.В. Киселев, С.А. Филист, Х.А.Х. Алавси, В.В. Песок, А.Е. Пшеничный, О.В. Шаталова //Биомедицинская радиоэлектроника. – 2024. – Т. 27. – № 2. – С. 5-12.

2. Филист, С.А. Классификации функционального состояния системы дыхания на основе анализа кардиореспираторного синхронизма / С.А. Филист, А.А. Кузьмин, **Хайдер Х.А. Алавси**, В.В. Песок, А.Е. Пшеничный // International Journal of Open Information Technologies. – 2023. – Vol. 11. – No.4. – Pp.С. 21-28.

3. Бутусов, А.В. Метод и алгоритмы локализации кластеров адаптационного потенциала в биотехнических системах реабилитации лиц с ограниченными возможностями здоровья. / А.В. Бутусов, А.В. Киселев, **Хайдер Х.А. Алавси**, Е.В. Петрунина, Р.И. Сафронов, Л.В. Шульга //Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – №11(2). – 1333. doi: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.012.

4. Бутусов, А.В. Нейронечеткие сети для систем дистанционного мониторинга амбулаторных пациентов с заболеваниями органов дыхания/ А.В. Бутусов, **Хайдер А.Х. Алавси**, Карачевцев Р.А., Сухомлинов А.Ю., Филист С.А. /Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – №11(2). – 1425. doi: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.016.

5. Гибридный нейронечеткий классификатор для мониторинга эффективности лечения заболеваний системы дыхания с учетом коморбидности/Е. В. Петрунина, С. А. Филист, Л. В. Шульга, В. Песок, **Хайдер А.Х. Алавси**, А. В. Бутусов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2023. – Т. 13, № 4. – С. 27–53. doi: 10.21869/2223-1536-2023-13-4-27-53.

Публикация в издании, индексируемом в международной научометрической базе Scopus

6. A Hybrid Risk Classifier for Community-Acquired Pneumonia with Descriptors Derived from the Analysis of the Synchrony of Systemic Rhythms and the Electrical Activity of the Respiratory Muscles/ S. Filist, A. Kiselev, A. Kuzmin, **Hayder Alawsi**, N. Korenevskiy, A. Butusov//Proceedings of the 2023 International Conference on Systems and Technologies of the Digital HealthCare (STDH – 2023). – 2023. – Pp.195-197.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

7. Программа для интерактивного создания модели нейронной сети (NetModel) /Кондрашов Д.С., Шаталова О.В., Алавси Хайдер А.Х.// Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU №2023685902. Дата публикации: 30.11.2023. Бюл. №12.

Статьи и материалы конференций

8. Кузьмин, А.А. Двумерный спектральный анализ кардиореспираторных сигналов в латентном мониторинге функционального состояния группы пациентов / А.А. Кузьмин, А.В. Серебровский, **Хайдер Али Хуссейн Алавси** // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы (Биомедсистемы-2021): сборник трудов XXXV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2022. – С. 404-406.

9. Филист, С.А. Автоматизированная система количественной интерпретации кардиореспираторного синхронизма / С.А. Филист, А.А. Кузьмин, **Х.А. Алавси Хайдер**, В.В. Песок // Завалишинские чтения'23: сборник докладов XVIII Международной конференции. – СПб.: ГУАП, 2023. – С. 82-85.

10. **Алавси, Хайдер Х.А.** Классификатор риска внебольничной пневмонии на основе анализа системных ритмов кардиореспираторного синхронизма/ **Х.А. Алавси Хайдер**, А.Е. Пшеничный, В.В. Песок // Моделирование и прогнозирование развития отраслей социально-экономической сферы: сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции. – Курск : КГМУ, 2023. – С.42-45.

11. **Алавси, Х.А.Х.** Исследование сердечно-сосудистого риска у коморбидных больных посредством анализа кардиореспираторной синхронизации/ **Х.А.Х. Алавси**, В.В. Песок, А.Е. Пшеничный// Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития [Электронный ресурс]: сборник трудов Восьмой всероссийской молодежной научной конференции. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – С.236-237.

12. Бутусов, А.В. Гибридный классификатор степени тяжести пневмонии/ А.В. Бутусов, Е.В. Петрунина, В.В. Песок, **Хайдер А.Х. Алавси**// Биотехнология и биомедицинская инженерия: сборник научных трудов по материалам XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 88-летию Курского государственного медицинского университета. – Курск: КГМУ, 2023. – С.156-158.

13. Бутусов, А.В. Мониторинг динамики состояния здоровья пациентов, болеющих внебольничной пневмонией / А.В. Бутусов, Е.В. Петрунина, Р.А. Карачевцев, **Хайдер А.Х. Алавси**, О.Ю. Лукаш //Актуальные проблемы медицинской науки и образования (АПМНО-2023) : сборник статей по материалам IX Международной научной конференции. – Пенза : ПГУ, 2023. – С. 172-176.

14. Филист, С.А. Нейросетевой классификатор для оценки медицинского риска системы дыхания / С.А. Филист, **Хайдер Али Хуссейн Алавси**, В.В. Песок, А.Е. Пшеничный //Актуальные проблемы медицинской науки и образования (АПМНО-2023) : сборник статей по материалам IX Международной научной конференции. – Пенза : ПГУ, 2023. – С. 208-212.

15. **Алавси Хайдер А.Х.** Автоматизированная система мониторинга кардиореспираторного синхронизма/ **Хайдер А.Х. Алавси**, В.В. Песок, А.Е. Пшеничный // Лазерно-информационные технологии - 2023: труды XXXI международной научной конференции. – Новороссийск: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. – С.212-215.

16. **Алавси Хайдер А.Х.** Гибридные нейро-нечеткие модели для мониторинг динамики функционального состояния системы дыхания/ **Хайдер А.Х. Алавси**, Е.В. Петрунина, В.В. Песок, К.Н. Селихова //Медицинские приборы и технологии: сборник статей по материалам международной научной конференции. – Тула: ТулГУ, 2024. – С.172-176.

