

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-148-174>

УДК 004.89

Технологии биоимпедансной спектроскопии в системах поддержки принятия решений при диагностике социально значимых заболеваний

О. В. Шаталова¹ ✉, Н. С. Стадниченко¹, М. А. Ефремов¹,
И. А. Башмакова¹, А. В. Лях¹, А. В. Серебровский¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: shatolg@mail.ru

Резюме

Цель исследования – развитие методов синтеза гибридных классификаторов для оценки риска социально значимых заболеваний с использованием биоимпедансного анализа.

Методы. Мы разработали дескрипторный подход, используя результаты импедансной спектроскопии, генерируя четыре амплитудно-фазочастотные характеристики от четырех квазиортогональных отведений. Они создают пространства признаков, необходимые для нашего гибридного классификатора в диагностике заболеваний поджелудочной железы, автономные интеллектуальные агенты которого построены на различных парадигмах: вероятностные нейронные сети; нечеткий логический вывод; полносвязные нейронные сети прямого распространения сигнала. Также мы представили структуру устройства для создания пространства информативных признаков.

Результаты. Экспериментальные исследования предложенных методов и средств классификации медицинского риска были осуществлены на задачах диагностики по классам «острый деструктивный панкреатит» – «нет острого деструктивного панкреатита» и задачах дифференциальной диагностики по классам «рак предстательной железы» – «хронический панкреатит». Они показали, что включение многократного зондирования в классификаторы на основе нейронных сетей позволяет разрабатывать системы поддержки клинических решений для диагностики заболеваний, сопоставимые по показателям эффективности с существующими методами клинической диагностики. Результаты были подтверждены на группах пациентов мужского и женского пола на разных стадиях рака в возрасте от 25 до 80 лет с использованием различных диагностических методов, включая сбор анамнеза, физикальное обследование, оценку сопутствующей патологии, лабораторные исследования, УЗИ, лапароскопию, интраоперационную ревизию и компьютерную томографию.

Заключение. Использование метода биоимпедансной спектроскопии и гибридных моделей классификаторов открывает новые возможности для доступной и объективной диагностики заболеваний поджелудочной железы, расширяя возможности интеллектуальных систем поддержки принятия медицинских решений.

Ключевые слова: спектроскопия биоимпеданса; диагностика и дифференциальная диагностика заболеваний; модели импеданса; нейросетевой классификатор; гибридный классификатор; поджелудочная железа.

Финансирование: Исследования выполнены в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» программы стратегического академического лидерства «Приоритет – 2030».

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Технологии биоимпедансной спектроскопии в системах поддержки принятия решений при диагностике социально значимых заболеваний / О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, М. А. Ефремов, И. А. Башмакова, А. В. Лях, А. В. Серебровский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 148–174. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-148-174>.

Поступила в редакцию 18.10.2023

Подписана в печать 15.11.2023

Опубликована 22.12.2023

Technologies of Bioimpedance Spectroscopy in Decision Support Systems for the Diagnosis of Socially Significant Diseases

Olga V. Shatalova¹ ✉, Nikita S. Stadnichenko¹, Mikhail A. Efremov¹,
Irina A. Bashmakova¹, Anton V. Lyakh¹, Andrey V. Serebrovsky¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: shatolg@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop methods for the synthesis of hybrid classifiers to assess the risk of socially significant diseases using bioimpedance analysis.

Methods. We developed a descriptor approach using impedance spectroscopy results, generating four amplitude-phase-frequency responses from four quasi-orthogonal leads. They create the feature spaces necessary for our hybrid classifier in the diagnosis of pancreatic diseases, the autonomous intelligent agents of which are built on various paradigms: probabilistic neural networks, fuzzy logical inference, fully connected feedforward neural networks. We also presented a device structure for creating an informative feature space.

Results. Experimental studies of the proposed methods and means of classifying medical rice were carried out on diagnostic tasks according to the classes "acute destructive pancreatitis" – "no acute destructive pancreatitis" and differential diagnosis tasks according to the classes "prostate cancer" – "chronic pancreatitis". They showed that incorporating multi-frequency sensing into neural network-based classifiers allows the development of clinical decision support systems for disease diagnosis that are comparable in performance to existing clinical diagnostic methods. The results were confirmed in groups of male and female patients at different stages of cancer aged 25 to 80 years using a variety of diagnostic methods, including history, physical examination, assessment of comorbidities, laboratory tests, ultrasound, laparoscopy, intraoperative exploration and computed tomography.

Conclusion. The use of bioimpedance spectroscopy and hybrid classifier models opens up new opportunities for accessible and objective diagnosis of pancreatic diseases, expanding the capabilities of intelligent medical decision support systems.

Keywords: bioimpedance spectroscopy; diagnosis and differential diagnosis of diseases; impedance models; neural network classifier; hybrid classifier; pancreas.

Funding: The research was carried out within the framework of the development program of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Southwest State University" of the strategic academic leadership program "Priority – 2030".

Conflict of interest: The Authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Shatalova O. V., Stadnichenko N. S., Efremov M. A., Bashmakova I. A., Lyakh A. V., Serebrovsky A. V. Technologies of Bioimpedance Spectroscopy in Decision Support Systems for the Diagnosis of Socially Significant Diseases. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(4): 148–174. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-148-174>.

Received 18.10.2023

Accepted 15.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

Интеллектуальные системы поддержки принятия врачебных решений (СППВР) доказали свою эффективность в анализе медицинских рисков, связанных с социально значимыми заболеваниями [1; 2; 3; 4; 5]. Были разработаны новые методы выявления эмпирических закономерностей, в результате чего была создана интеллектуальная система (ИС), содержащая базу данных предикторов риска (ПР), полученных на основе биоимпедансных исследований, включая биоимпедансную спектроскопию [6; 7; 8; 9].

Отличить рак поджелудочной железы (РПЖ) от хронического панкреатита (ХП) часто бывает сложно, особенно когда речь идет о небольших опухолях, что делает традиционные методы раннего выявления неэффективными. Через 10 лет после постановки диагноза ХП совокупный риск ПК составляет 2,6%, а через 25 лет возрастает до 12,2%, что подчеркивает ХП как заметный фактор риска ПК [10; 11; 12; 13]. Традиционно эндоскопическая ретроградная панкреатография (ЭРП) и функциональные тесты поджелудочной железы были золотыми стандартами диагностики ХП.

Однако эти тесты могут выявить отклонения только на поздних стадиях, что подчеркивает необходимость ранней диагностики ХП и оценки тяжести [12]. В исследовании [14] изучались изменения электрического импеданса у больных острым панкреатитом во время лечения. Исследовались изменения импеданса в анатомических областях, связанные с развитием панкреатита. Изменения импеданса происходят как при низких, так и при высоких частотах зондирующего тока, причем наиболее значительные изменения наблюдаются у больных острым деструктивным инфицированным панкреонекрозом. Эти изменения происходят из-за нарушений водно-электролитного баланса организма и структурных изменений внутри и снаружи клеток. После лечения показатели импеданса восстанавливаются к исходным значениям. В [10] исследователи проанализировали более 50 пациентов с острым панкреатитом на различных стадиях заболевания с помощью биоимпедансного анализа. Они устанавливают корреляции между биоимпедансом и клинической картиной острого панкреатита. У больных острым деструктивным инфицированным панкреонекрозом выявляются

значительные изменения биоимпеданса различной частоты, обусловленные электролитным дисбалансом в пораженных клетках. Стратегии лечения в первую очередь направлены на восстановление нормального объема циркулирующей крови для предотвращения аномальных концентраций электролитов, что в конечном итоге приближает значения биоимпеданса к норме.

Это исследование направлено на повышение точности и своевременности диагностики таких заболеваний, как рак поджелудочной железы. Эти подходы требуют раннего выявления и точной оценки для эффективного лечения, в то время как традиционные методы диагностики не отвечают этим требованиям. Объединив новейшие технологии, включая искусственный интеллект и биоимпедансную спектроскопию, мы стремимся разработать улучшенный подход к успешной диагностике и эффективному лечению.

В статье рассматривается метод классификации заболеваний поджелудочной железы на основе системы искусственного интеллекта с дескрипторами, рассчитанными по результатам биоимпедансной спектроскопии в экспериментах *in vivo*. Результаты были подтверждены на группах пациентов мужского и женского пола на разных стадиях рака в возрасте от 25 до 80 лет с использованием различных диагностических методов, включая сбор анамнеза, физикальное обследование, оценку сопутствующей патологии, лабораторные исследования, УЗИ, лапароскопию,

интраоперационную ревизию и компьютерную томографию. Это исследование открывает новые возможности для доступной и объективной диагностики заболеваний поджелудочной железы, расширяя возможности интеллектуальных систем принятия медицинских решений.

Материалы и методы

Формирование информативных признаков

Основой для построения набора данных послужил метод импедансной спектроскопии, описанный в [15; 16; 17]. В предлагаемом методе биоимпедансной спектроскопии анализируется биоимпеданс в четырех квазиортогональных отведениях. В каждом квазиортогональном отведении получаем амплитудно-фазочастотную характеристику (АФЧХ) импеданса биоматериала, часто называемую в литературе графиком Коула или импедансной диаграммой [18; 19; 20]. Для получения дескрипторов для обучаемого классификатора медицинского риска (МР) было использовано четыре квазиортогональных отведения. Расположение электродов для этих отведений показано на рисунке 1: электроды расположены во фронтальной плоскости (зеленый) и сагиттальной плоскости (красный). Первая пара электродов располагается на грудной клетке, а вторая пара – на брюшной полости. Такая конфигурация позволяет создавать четыре АФЧХ импеданса, в результате чего получается восемь векторов информативных признаков (по два на каждую диаграмму импеданса).

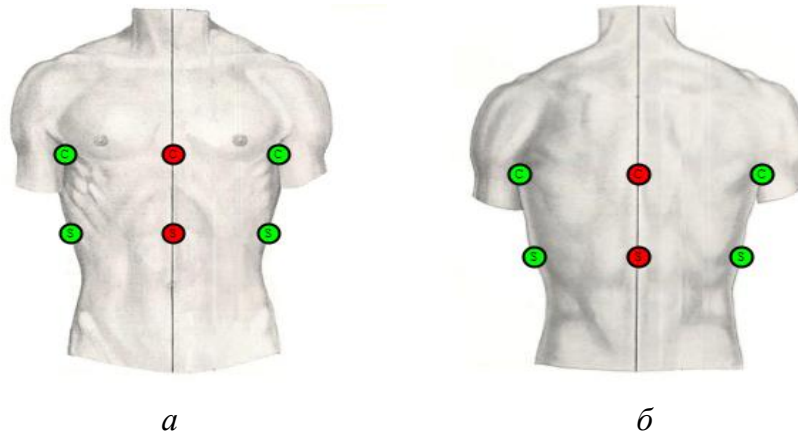


Рис. 1. Топология размещения электродов во время биоимпедансных исследований в четырех ортогональных отведениях в области грудной клетки и живота с указанием передней (а) и задней (б) сторон тела человека

Fig. 1. Topology of electrode placement during bioimpedance studies in four orthogonal leads in the chest and abdomen, indicating (a) the front and (б) back sides of the human body

На рисунке 2 представлен пример импедансной диаграммы, полученной в одном из отведений. После анализа АФЧХ, представленных в виде графиков $Re(m)$ и $Im(m)$, стало очевидно, что разделение диапазона амплитуд на шесть поддиапазонов (рис. 2) было логичным выбором. В этом контексте выгоднее выделять эти поддиапазоны по оси частот, устраняя необходимость нормализации значений $Re(m)$ и $Im(m)$. Следовательно, на частотной оси можем выделить

следующие диапазоны частот (в герцах): $df1:(0...10)$, $df2:(10...20)$, $df3:(20...30)$, $df4:(30...40)$, $df5:(40...60)$, $df6:(60...150)$. Внутри каждого поддиапазона, обозначенного номером g , мы рассчитали медианы $Re(medg)$ и $Im(medg)$, используя их как компоненты векторов дескрипторов, полученных на основе этого суррогатного маркера. Рассмотрим процесс формирования информативных векторов (рис. 2).

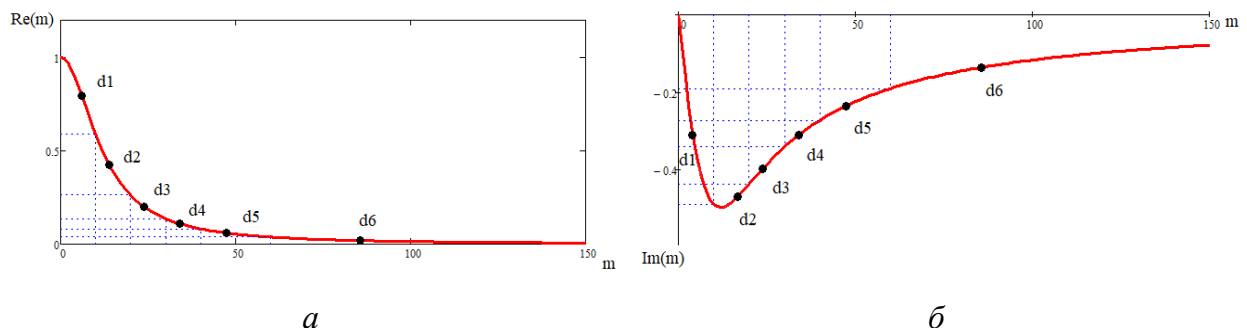


Рис. 2. Пример формирования вектора информативных признаков: а – по действительной части биоимпеданса; б – по мнимой части биоимпеданса

Fig. 2. An example of the formation of a vector of informative features: а – based on the real part of the bioimpedance; б – according to the imaginary part of the bioimpedance

Программно-аппаратные средства для биоимпедансных исследований поджелудочной железы

Для проведения биоимпедансных исследований использовалось устройство сбора данных (УСД), выполненное по аналогам, описанным в [21]. Согласование устройства биоимпедансной

спектроскопии с биообъектом обеспечивается посредством усилителей, включенных на выходе ЦАП и на входах АЦП УСД и находящихся в автономном модуле устройства связи с биообъектом (УСО). Его функциональная схема, рассчитанная на все ортогональные отведения (рис. 3).

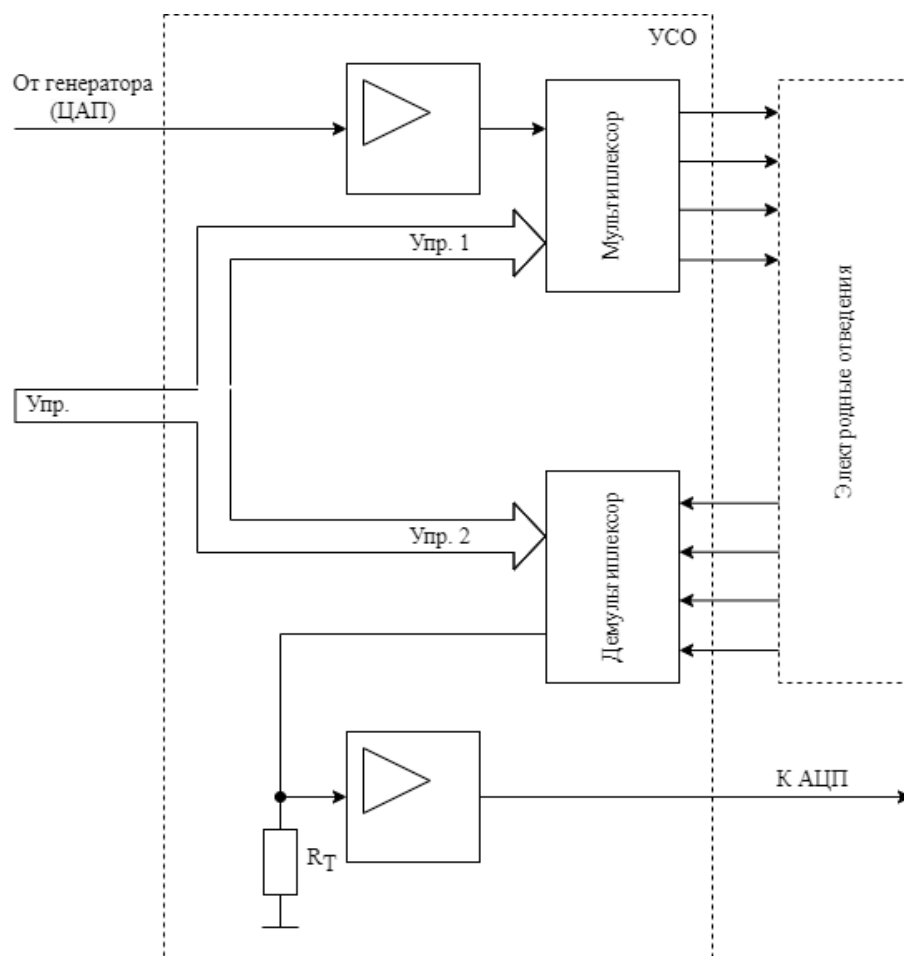


Рис. 3. Устройство связи с биообъектом

Fig. 3. Communication device with a biological object

Микроконтроллер УСД обеспечивает частоту зондирующего тока от нуля герц до 20 кГц и величину от 10 до 20 мкА в зависимости от конституционных особенностей пациента.

На рисунке 4 показаны результаты исследований биоимпеданса у группы

добровольцев мужского и женского пола на постоянном токе. Столбиковые диаграммы отражают средние по группе электрические сопротивления в отведениях в килоомах на постоянном токе при токе зондирования 10 мкА и токе зондирования 20 мкА. Отведения,

обозначенные на диаграммах цифрами 1 и 3, находятся в сагиттальной плоскости, а

отведения, обозначенные цифрами 2 и 4, – во фронтальной плоскости.

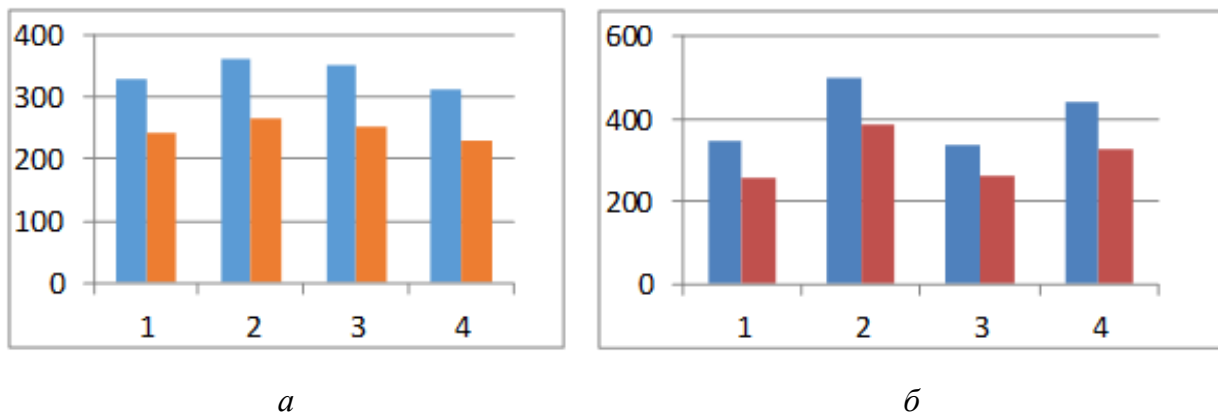


Рис. 4. Средние значения биоимпеданса в килоомах на постоянном токе в четырех ортогональных отведениях при токах зондирования 10 мкА (цвет голубой) и 20 мкА (цвет оранжевый) для мужчин (а) и для женщин (б)

Fig. 4. Average values of bioimpedance in kilo-ohms at direct current in four orthogonal leads at probing currents of 10 µA (blue) and 20 µA (orange) for men (a) and for women (b)

Программное обеспечение (ПО) для УСД включает ряд программных модулей, позволяющих вычислить биоимпеданс на различных частотах зондирующего тока. Для расчета ортогональных компонент биоимпеданса $\text{Re}Z$ и $\text{Im}Z$ используем метод вычисления, который предполагает использование двух АЦП, один из которых измеряет напряжение на биообъекте, а второй – на токовом

резисторе R , включенном последовательно с биообъектом в электрическую цепь [15; 21].

На рисунке 5 представлен упрощенный вариант измерительной цепи для предложенного метода. Величина резистора R подобран таким образом, чтобы он не оказал существенного влияния на ток в биообъекте.

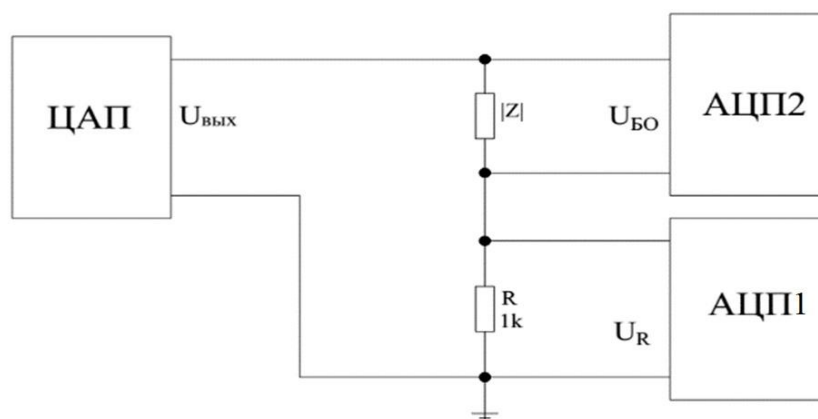


Рис. 5. Упрощенная схема измерения биоимпеданса

Fig. 5. Simplified scheme for measuring bioimpedance

Ток в резисторе R равен току в био-объекте

$$\vec{I}_R = \frac{\vec{U}_R}{R}. \quad (1)$$

На рисунке 6 показана векторная диаграмма токов и напряжений в электрической цепи (рис. 5).

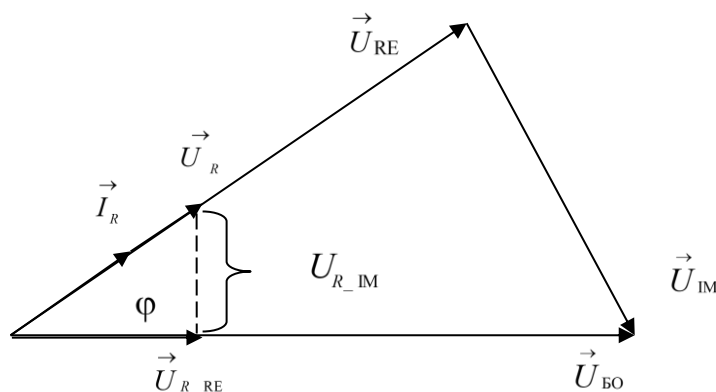


Рис. 6. Векторная диаграмма токов и напряжений в измерительной цепи

Fig. 6. Vector diagram of currents and voltages in the measuring circuit

Согласно рисунку 6, напряжение на выходе ЦАП $U_{\text{ВЫХ}}$ уравнивается двумя векторами \vec{U}_{RE} и \vec{U}_{IM} . Для расчета реальной и мнимой составляющих биоимпеденса необходимо определить угол φ или проекцию вектора \vec{U}_R на вектор $\vec{U}_{\text{ВЫХ}}$, который при достаточной

малости резистора R можем принять равным \vec{U}_{BO} . Для этого будем использовать квадратурный детектор, который состоит из двух синхронных детекторов (СД), у которых в качестве опорных напряжений используются квадратурные напряжения $\vec{U}_{\text{ОП1}}$ и $\vec{U}_{\text{ОП2}}$. Рассмотрим схему СД (рис. 7).

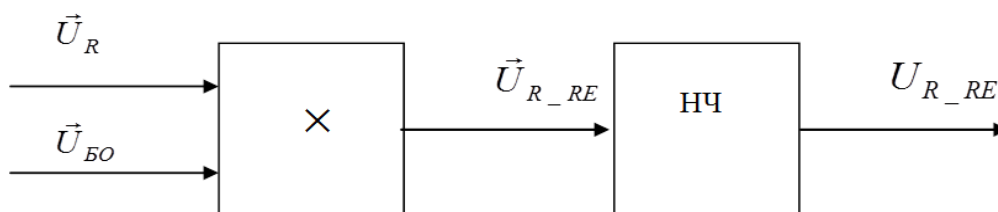


Рис. 7. Схема синхронного детектора

Fig. 7. Synchronous detector circuit

Учитывая, что $\vec{U}_{\text{BO}} = U_{\text{BO}} \sin \omega t$ и $\vec{U}_R = U_R \sin(\omega t + \varphi)$, и руководствуясь процедурами обработки сигнала (рис. 3), получим

$$\vec{U}_{R_RE} = \frac{1}{2} U_R U_{\text{ОП1}} \times (\cos \varphi - \cos (2\omega t + \varphi)), \quad (2)$$

где $U_{\text{ОП1}} \sin(\omega t) = U_{\text{БО}} \sin(\omega t)$.

После низкочастотной фильтрации (НЧ) формула (2) примет вид

$$U_{R_RE} = \frac{1}{2} U_R U_{\text{ОП1}} (\cos \varphi). \quad (3)$$

Аналогично для мнимой составляющей

$$U_{R_IM} = \frac{1}{2} U_R U_{\text{ОП2}} (\sin \varphi). \quad (4)$$

Если СД реализован программно, то напряжения U_{R_RE} определяется по дискретным отсчетам $U_R[i]$ и $U_{\text{ОП1}}[i]$ также программно путем низкочастотной фильтрации

$$U_{R_RE}[i] = U_R[i] \cdot U_{\text{ОП1}}[i] \quad (5)$$

по формуле

$$U_{R_RE} = \frac{\sum_{i=1}^N U_{\text{АЦП1}}[i] \cdot U_{\text{ОП1}}[i]}{N}, \quad (6)$$

где $U_{\text{АЦП1}}[i]$ – отсчеты выходных напряжений АЦП, В; N – количество отсчетов зондирующего тока в окне анализа.

Аналогично для мнимой составляющей

$$U_{R_IM} = \frac{\sum_{i=1}^N U_{\text{АЦП1}}[i] \cdot U_{\text{ОП2}}[i]}{N}. \quad (7)$$

Угол φ находим по известным проекциям (рис. 6):

$$\varphi = \arctg \left(\frac{U_{R_IM}}{U_{R_RE}} \right). \quad (8)$$

Модуль комплексного сопротивления вычисляем как

$$|Z| = \frac{U_{\text{БО}}}{I_R}. \quad (9)$$

где $U_{\text{БО}}$ – амплитуда напряжения на выходе ЦАП (здесь мы пренебрегаем падением напряжения U_R).

Компоненты $\text{Re}Z$ и $\text{Im}Z$ биоимпеданса определяются путем проецирования комплексного вектора Z на оси квадратурных опорных напряжений.

На рисунке 8 показан алгоритм построения графика Коула [18]. В блоках 1 и 2 вводятся амплитуда напряжения на выходе ЦАП, диапазон частот исследования биоимпеданса и шаг изменения (приращения) частоты внутри диапазона частот. В блоке 3 по параметрам, введенным в блоках 1 и 2, вычисляются зависящие от них параметры зондирования – время измерения и частота дискретизации. На текущей частоте зондирования резервируется размер файла для приема данных с АЦП. В блоках 4–7 реализуется формирование зондирующих импульсов и прием сигналов ответной реакции. Блок 7 и блок 8 контролируют проход по заданному частотному диапазону.

Интерфейсные модули ПО УСД представлены ниже (рис. 9).

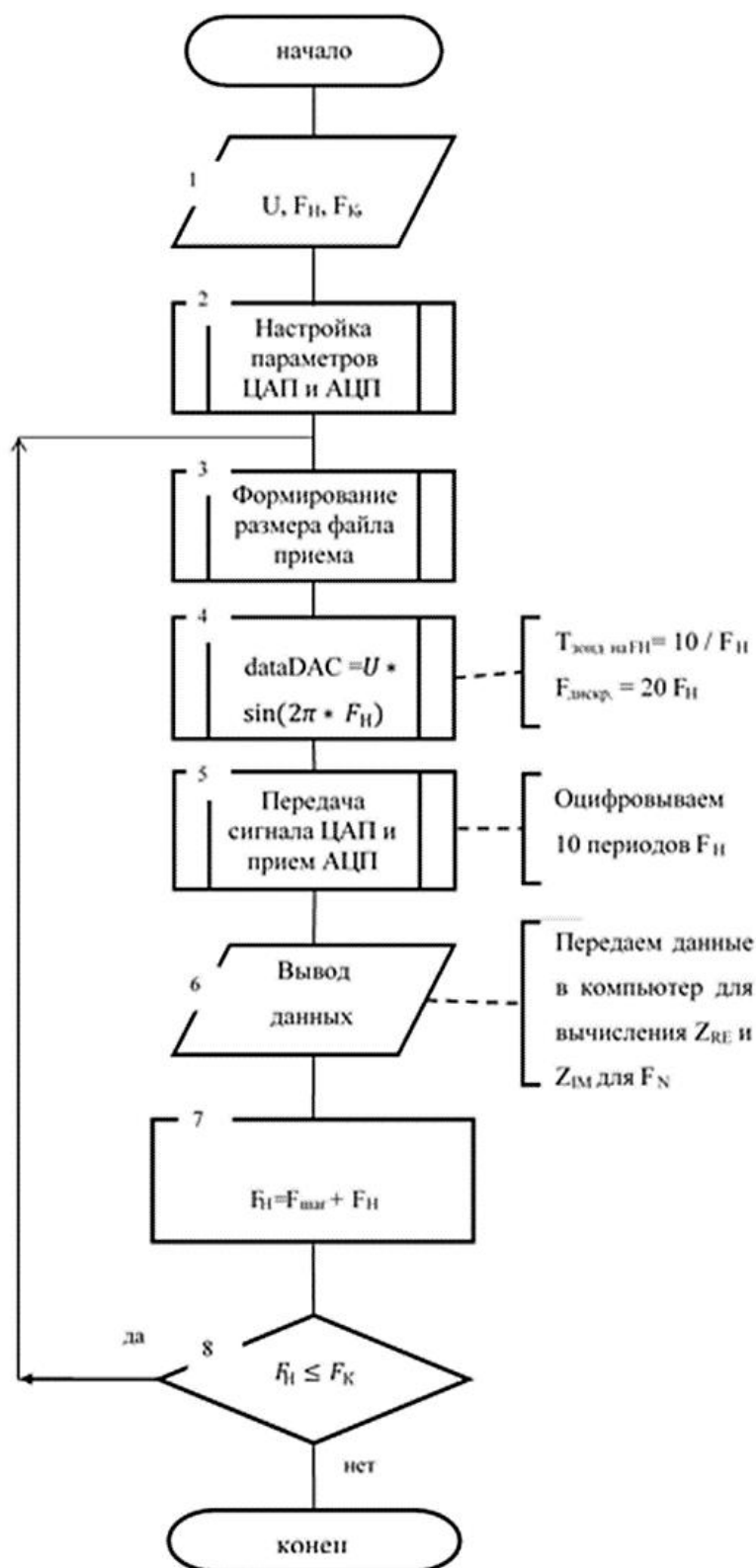
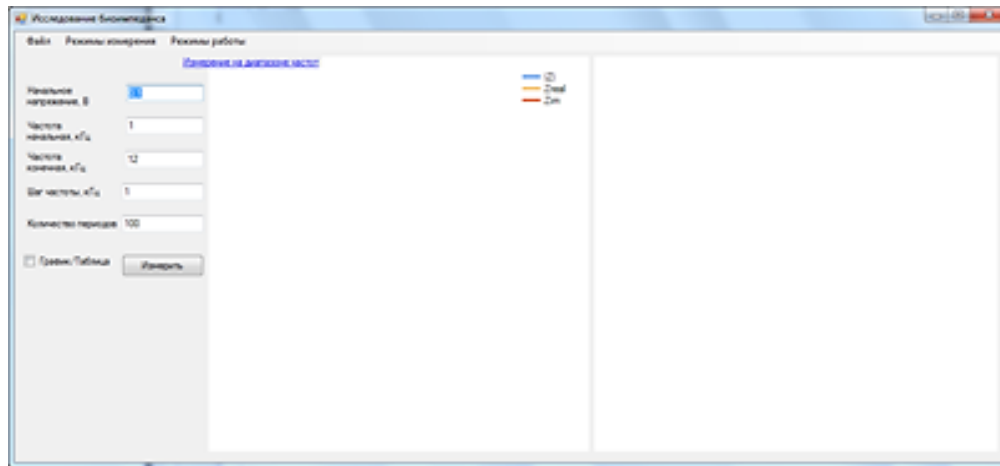
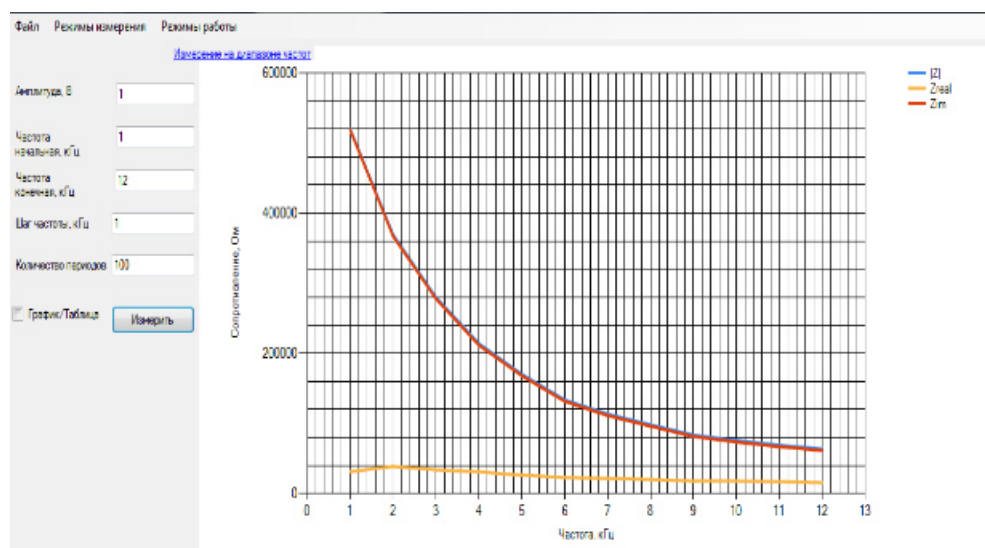


Рис. 8. Схема алгоритма получения сырых данных для одного ортогонального отведения

Fig. 8. Scheme of the algorithm for obtaining raw data for one orthogonal lead



а



б

Рис. 9. Интерфейсные окна устройства сбора данных: а – окно ввода исходных данных; б – окно отображения результатов [22]

Fig. 9. Interface windows of the data collection device: а – window for entering initial data; б – results display window [22]

Графики Коула сохраняются в компьютере и при необходимости могут быть отображаются в виде графиков.

Система искусственного интеллекта для классификации рисков заболеваний поджелудочной железы

Диагностика ПЖ включает комплекс исследований. Поэтому при проектировании СППВР используем

подход, изложенный в работе [23]. Согласно этому подходу, была предложена структура СППВР (рис. 10).

Ядром СППВР при диагностике и дифференциальной диагностике заболеваний ПЖ является гибридная нейронная сеть (ГНС), включающая четыре автономных интеллектуальных агента (АИА): NET1, NET2, NET3 и NET4, а также агрегатор – NET5.

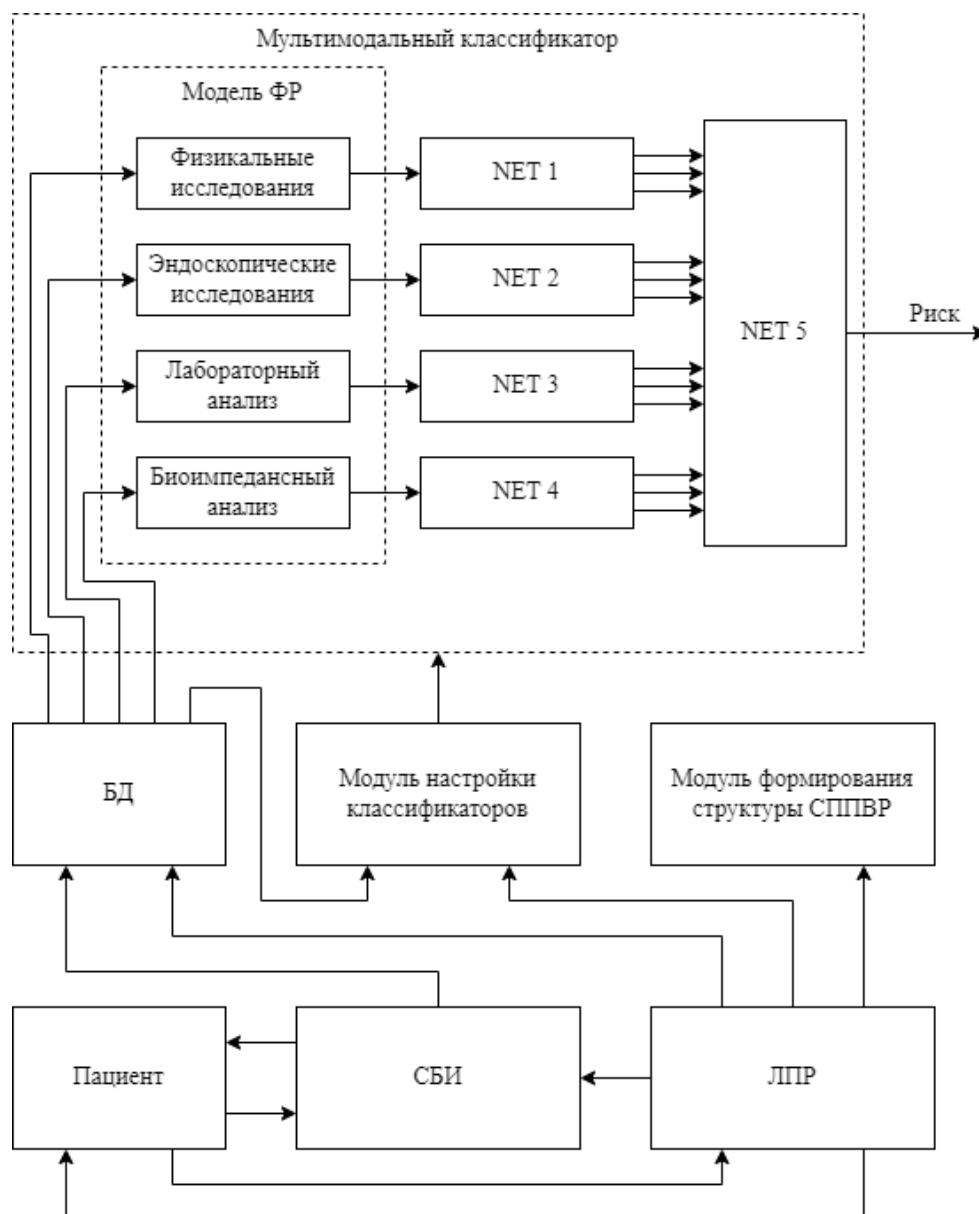


Рис. 10. Структурная схема системы интеллектуальной поддержки диагностики и дифференциальной диагностики заболеваний поджелудочной железы

Fig. 10. Block diagram of the system for intelligent support for diagnostics and differential diagnosis of pancreatic diseases

Модели ФР для этих АИА формируются на основе физикальных, УЗИ, лабораторных и биоимпедансных исследований. Сырые данные, а также дескрипторы хранятся в базе данных (БД). Настройка структуры СППВР и ее модулей осуществляется лицом, принимающим решение (ЛПР).

В модели риска заболеваний ПЖ были выделены четыре группы ФР. В первую группу ФР включены физикальные показатели, характерные для заболеваний ПЖ. Во второй группе ФР используются дескрипторы, полученные на основе методов УЗИ. Учитывая, что, как правило, для описания

функционального состояния пациента используют лингвистические переменные, для построения классификатора риска заболевания ПЖ в этом сегменте целесообразно использовать систему нечеткого логического вывода (СНЛВ). К

третьей группе ФР относятся показатели, получаемые по результатам лабораторного анализа. В таблице 1 приведены ФР, получаемые по биохимическому анализу крови.

Таблица 1. Факторы риска по показателям биохимического анализа крови [24]

Table 1. Risk factors according to biochemical analysis indicators [24]

Фактор риска	Результаты анализа	
	мужчины	женщины
1. Общий белок	64–84 г/л	64–84 г/л
2. Гемоглобин	130–160 г/л	120–150 г/л
3. Гаптоглобин	150–2000 мг/л	150–2000 мг/л
4. Глюкоза	3,30–5,50 ммоль/л	3,30–5,50 ммоль/л
5. Мочевина	2,5–8,3 ммоль/л	2,5–8,3 ммоль/л
6. Креатинин	62–115 мкмоль/л	53–97 мкмоль/л
7. Холестерин	3,5–6,5 ммоль/л	3,5–6,5 ммоль/л
8. Билирубин	5–20 мкмоль/л	5–20 мкмоль/л
9. АлАТ (АЛТ)	До 45 Ед/л	До 31 Ед/л
10. АсАТ (АСТ)	До 45 Ед/л	До 31 Ед/л
11. Липаза	0–190 Ед/л	0–190 Ед/л
12. Альфа-амилаза	28–100 Ед/л	28–100 Ед/л
13. Панкреатическая амилаза	0–50 Ед/л	0–50 Ед/л

В качестве четвертого сегмента ФР взяты дескрипторы, полученные на основе СБИ. Структурная схема гибридного классификатора (ГК) риска заболеваний ПЖ показана на рисунке 11. ГК включает два классификатора и один агрегатор. Для первого классификатора дескрипторы были получены по двухзвенным моделям Войта по трем

частотным отсчетам графика Коула. Второй классификатор построен по глобальной модели графика Коула [17; 18; 21].

Для дифференциальной диагностики заболеваний поджелудочной железы разработана гибридная нейронная сеть, структура которой показана на рисунке 12. Она позволяет отнести

неизвестный образец к трем альтернативным классам: рак ПЖ (РПЖ), хронический панкреатит (ХП) и класс без патологий ПЖ (БП). Первый слой – слой вероятностных нейронных сетей (PNN). На каждую группу пространства информативных признаков (ПИП) выделены

шесть блоков PNN. Если ПИП четыре, то всего в первом слое содержится 24 блока PNN. Математические операции, выполняемые в слое PNN, представлены в [25; 26]. Следующие макрослои, слои выполнены на основе нечеткого логического вывода (FNN).

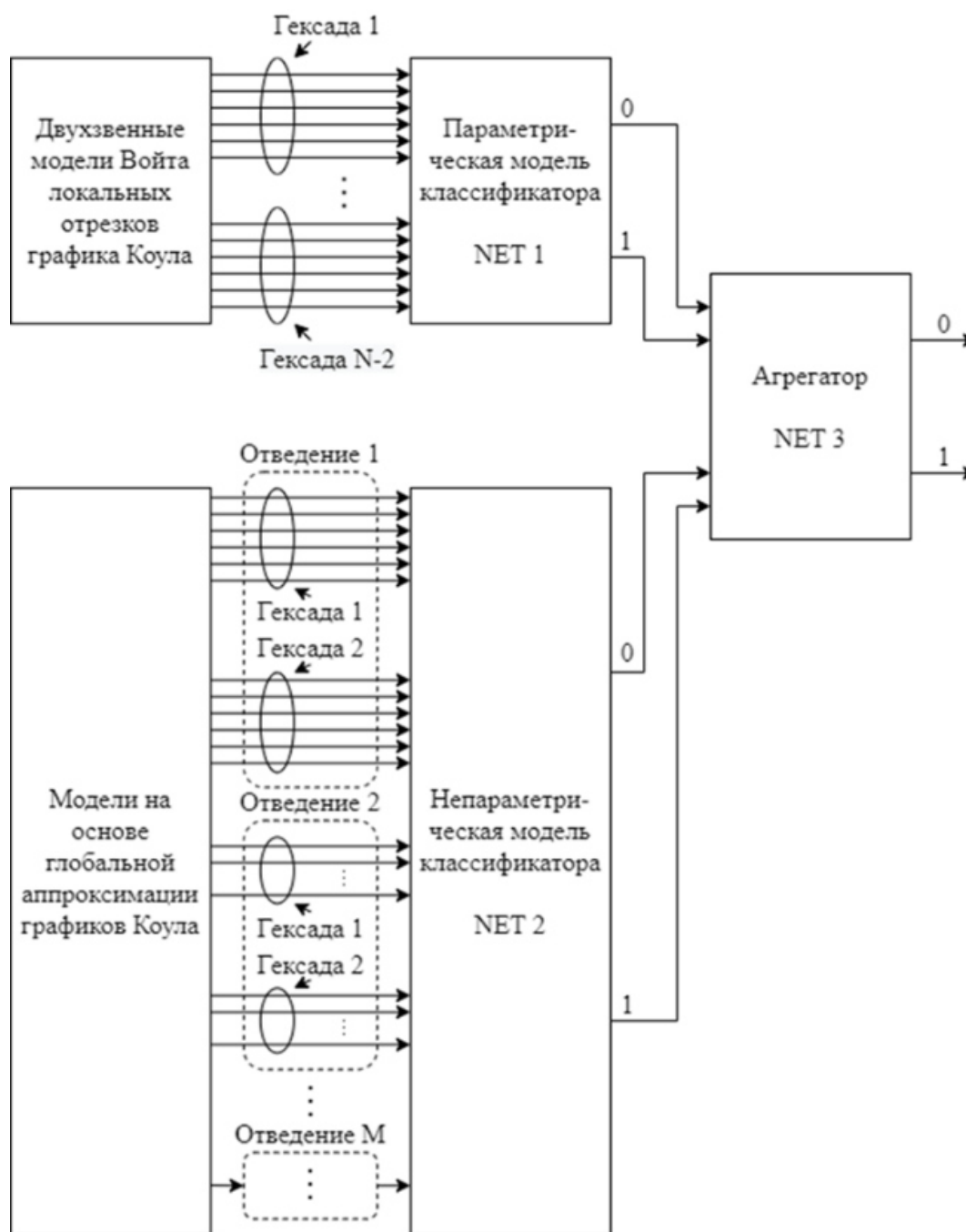


Рис. 11. Структура гибридного классификатора

Fig. 11. Hybrid classifier structure

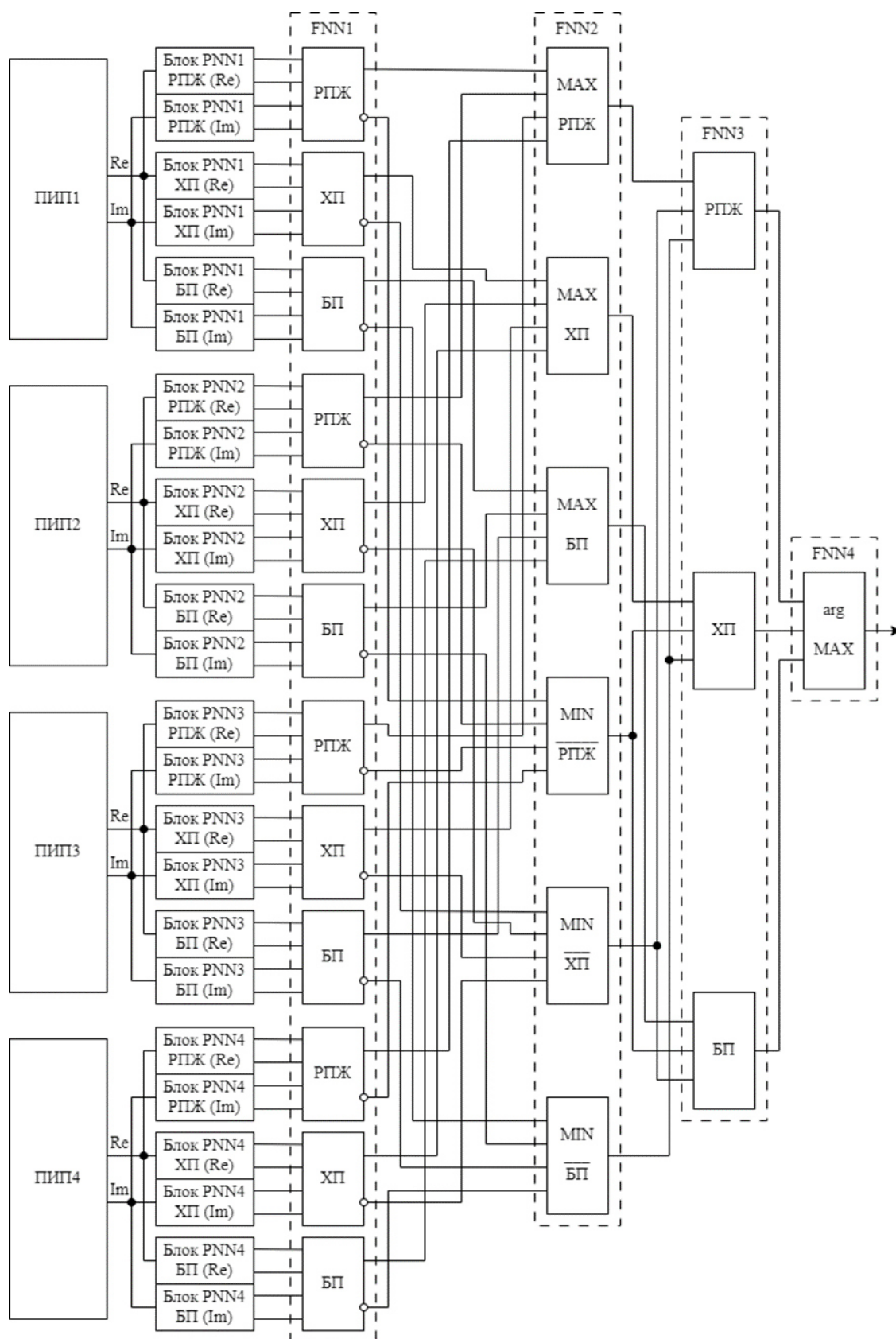


Рис. 12. Структурная схема гибридной нейронной сети с пятью макрослоями

Fig. 12. Block diagram of a hybrid neural network with five macrolayers

Второй макрослой состоит из двенадцати FNN. Каждая FNN имеет два нейронных слоя – четыре входных и два выходных нейрона. В нем выполняется операция

$$P_{\omega_i} = P_{\omega_i}(\operatorname{Re}(x)) + P_{\omega_i}(\operatorname{Im}(x))(1 - P_{\omega_i}(\operatorname{Re}(x))). \quad (10)$$

Третий макрослой осуществляет операции нечеткое «ИЛИ» и нечеткое «И» над выходами второго макрослоя. Четвертый макрослой определяет уверенности трех дифференцируемых классов с помощью S -нормы, которая для трехвходового нейрона этого макрослоя представлена уравнением

$$S_p(x, y, z) = x + y + z + xyz - xy - xz - yz, \quad (11)$$

где x, y, z – входы соответствующих нейронов слоя FNN3.

Пятый – класс-победитель, в нем выполняются следующие операции:

$$KY = \max(P_{\omega_1}, P_{\omega_2}, P_{\omega_3}), \quad (12)$$

$$\omega_\ell = \arg(\max(P_{\omega_1}, P_{\omega_2}, P_{\omega_3})). \quad (13)$$

Настройка структуры СППВР и ее модулей осуществляется ЛПР в интерактивном режиме. Для синтеза классификаторов МР, построенных на нечетких логических моделях, использовался алгоритм Мамдани-Заде, встроенный в модуль Fuzzy Матлаба [27]. Для этого был использован программный модуль *rusfis*, созданный на кафедре биомедицинской инженерии ЮЗГУ. Он позволяет в интерактивном режиме реализовать СНЛВ и имеет 6 основных интерфейсных окон, связанных посредством интерактивного режима. На рисунке 13 представлено интерфейсное окно, в котором изображены функции принадлежности входных и выходных переменных и результат, полученный СНЛВ, который интерпретируется так: уверенность риска ХП по терму «высокий» равна 0,776.

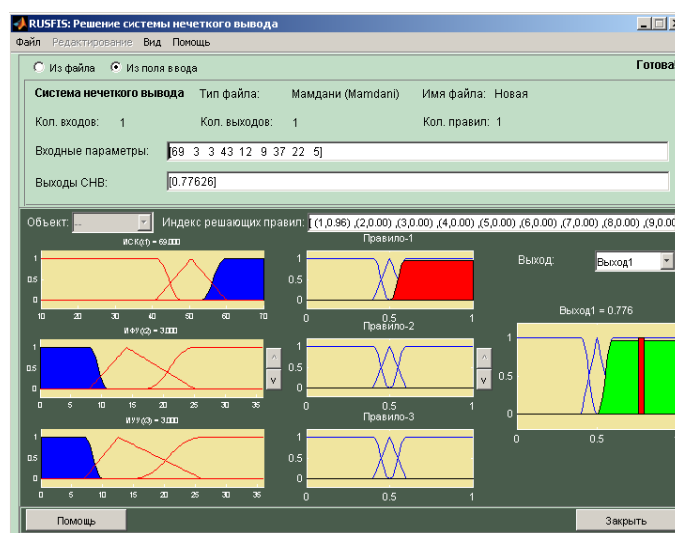
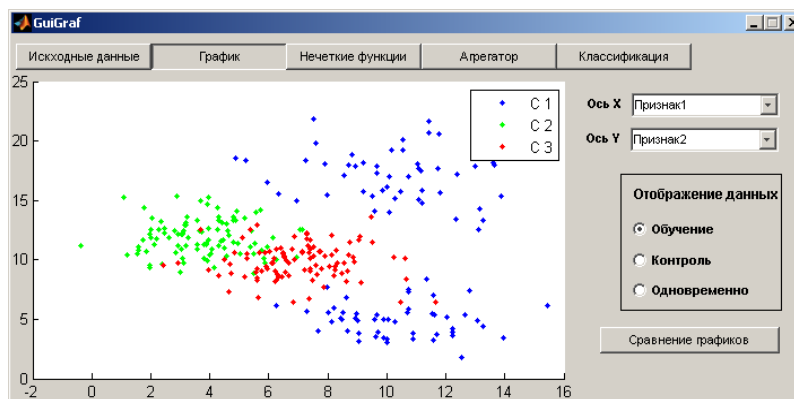


Рис. 13. Окно системы нечеткого вывода с введенными исходными данными и полученным результатом

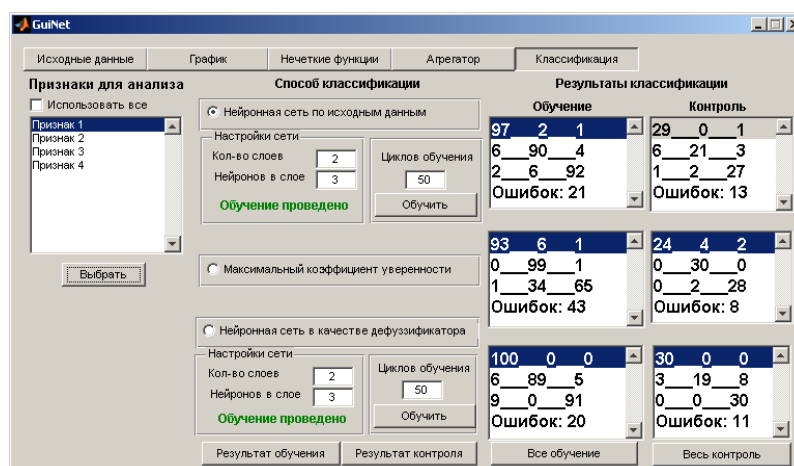
Fig. 13. Window of the fuzzy inference system with the entered initial data and the obtained result

Для реализации АИА на основе НС в среде Matlab 2018b был использован программный продукт *Neurowork* [27]. В отличие от модуля *rusfis*, который ориентирован только на синтез СНЛВ, этот модуль позволяет синтезировать нейронечеткие модели и на их основе осуществлять построение гибридных классификаторов. Программный продукт имеет пять вкладок: *GuiGraf*, *GuiData*, *GuiFuzzyFun*, *GuiAgreg*, *GuiNet*. Вкладка *GuiGraf* предназначена для графического анализа данных (рис. 14, а). В этой вкладке ЛПР имеет возможность наблюдать все возможные попарные сочетания комбинаций признаков для сравнительного анализа взаимного распределения

классов. Вкладка *GuiData* используется для ввода данных из базы данных или непосредственно от пациента. Вкладка *GuiFuzzyFun* – редактор функций принадлежности. Вкладка *GuiAgreg* позволяет синтезировать агрегаторы решающих правил. В этой вкладке ЛПР формирует меню нечетких операций, которые он включает в агрегатор [27]. Вкладка настройки и обучения многослойных НС прямого распространения *GuiNet* показана на рисунке 14, б, интерфейсное окно вкладки *GuiGraf* показано на рисунке 14, а. Используя ее ЛПР, может задать параметры НС и провести ее обучение и валидизацию.



а



б

Рис. 14. Интерфейсное окно вкладки *GuiGraf* (а) и интерфейсное окно вкладки *GuiNet* (б)

Fig. 14. Interface window of the *GuiGraf* (а) and interface window of the *GuiNet* (б)

Если гибридный классификатор построен и в качестве агрегатора используется нейронная сеть, то в окне вкладки *GuiData* вводится вектор дескрипторов неизвестного образца, а в окне вкладки *GuiNet* выводится величина медицинского риска к диагностируемому или дифференцируемому заболеванию.

Результаты и их обсуждение

Для апробации ГК было сформировано две экспериментальные группы. В первую группу было включено пятьдесят больных острым деструктивным панкреатитом (ОДП). Вторая группа состояла из здоровых добровольцев. Из этих двух групп формировались обучающая и контрольные выборки. При этом число добровольцев в контрольной группе подбиралось равным числу больных пациентов в этой же группе. Средний возраст пациентов и добровольцев в контрольных группах также был приблизительно одинаков. По результатам классификации примеров рассчитывались такие статистические показатели, как ДЧ, ДС и диагностическая эффективность (ДЭ).

Показатели качества были получены для двух моделей классификаторов, построенных на различных моделях биоимпеданса. В первом классификаторе с иерархической структурой в качестве модели биоимпеданса использовались модели Войта [17], а во втором – модифицированная модель Войта [21]. Число звеньев в моделях биоимпеданса определялось ошибкой аппроксимации экспериментальной импедансной диаграммы, теоретической импедансной диаграммой, построенной по импедансной модели Войта. На рисунке 15 представлены диаграммы, характеризующие показатели качества классификации этих моделей.

В качестве «золотого стандарта» использовались показатели УЗИ-диагностики на той же контрольной выборке. Показатели качества классификации построенных моделей классификаторов были сопоставимы с аналогичными показателями через кожной ультразвуковой диагностики.

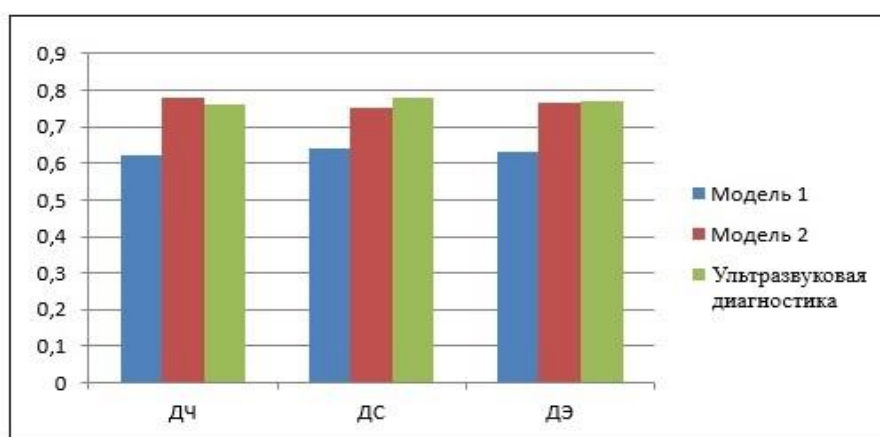


Рис. 15. Показатели качества диагностики острого деструктивного панкреатита для трех классификаторов

Fig. 15. Quality indicators for diagnosing acute destructive pancreatitis for three classifiers

Для апробации предложенных моделей классификаторов при дифференциальной диагностике заболеваний ПЖ было сформировано три экспериментальных группы: РПЖ – 40 пациентов, ХП – 35 пациентов, без патологии ПЖ (БП) – 30 добровольцев. Все пациенты и добровольцы были предупреждены об использовании их биометрических, персональных и медицинских данных для

публикации в научных журналах. В качестве классификатора использовалась гибридная нейронечеткая сеть со структурой (рис. 12), на вход которой подавались сырые данные, полученные с четырех отведений по методике (рис. 1).

В таблице 2 представлены результаты оценки показателей качества классификации.

Таблица 2. Показатели качеств дифференциальной диагностики по дифференцируемым классам

Table 2. Indicators of quality of differential diagnostics by differentiated classes

Распределение по классам в экспериментальных группах	Распределение по классам гибридной нейронной сетью		
	РПЖ	ХП	БП
$\omega_1 = 40$	29	11	0
$\omega_2 = 35$	8	22	5
$\omega_3 = 30$	0	2	28

На рисунке 16 представлена диаграмма показателей качества дифференциальной диагностики, полученная по экспериментальным данным, представ-

ленным в таблице 2. Результаты демонстрируют близкие значения к показателям качества ультразвуковой диагностики.

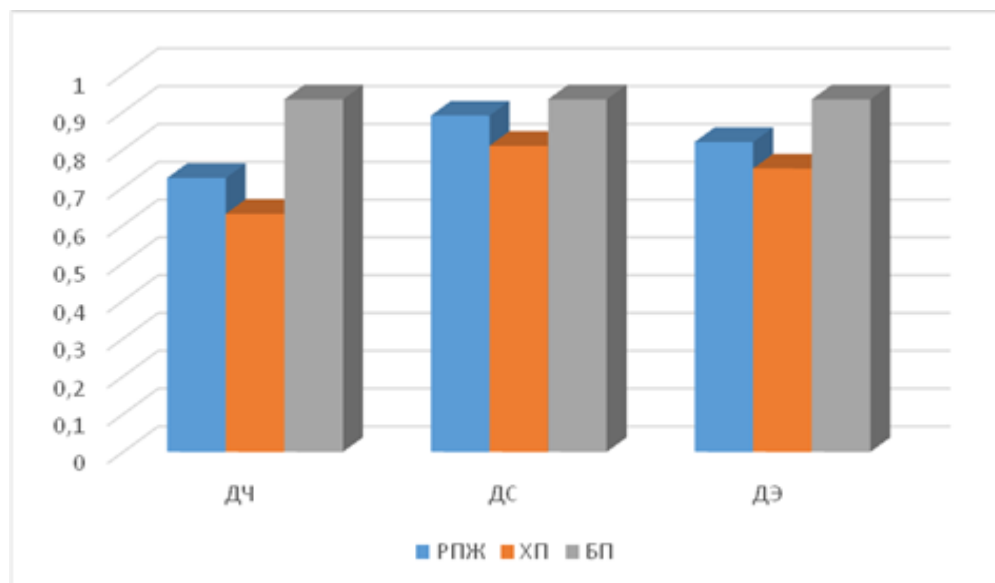


Рис. 16. Показатели качества дифференциальной диагностики заболеваний поджелудочной железы

Fig. 16. Quality indicators for differential diagnosis of pancreatic diseases

Выводы

1. Предложена методика биоимпедансной спектроскопии в четырех ортогональных отведениях.

2. Разработан программно-аппаратный комплекс биоимпедансной спектроскопии, позволяющий осуществлять биоимпедансные исследования в четырех ортогональных отведениях, в котором использовались автономные интеллектуальные агенты, работающие на парадигмах обучаемых нейронных сетей и нечеткого логического вывода. Для настройки полносвязных нейронных сетей и гибридных нейронных сетей использовалось программное обеспечение, разработанное в среде MATLAB.

3. Предложены структурно-функциональные решения гибридных моделей классификаторов, предназначенных для

интеллектуальной поддержки диагностики и дифференциальной диагностики заболеваний поджелудочной железы.

4. Проведен анализ ошибок первого и второго рода для классификаторов риска «острый деструктивный панкреатит», построенного по двум моделям биоимпеданса, который показал, что предложенные модели классификаторов продемонстрировали сопоставимые значения с показателями качества методов ультразвуковой диагностики.

5. Проведена оценка качества дифференциальной диагностики заболеваний поджелудочной железы посредством гибридной нейронной сети с пятью макрослоями по трем разделяемым классам, которая показала близкие значения к показателям качества методов ультразвуковой диагностики.

Список литературы

1. Biotechnical system based on fuzzy logic prediction for surgical risk classification using analysis of current-voltage characteristics of acupuncture points / S. Filist, R. T. Al-Kasasbeh, O. Shatalova, N. Korenevskiy, A. Shaqadan, Z. Protasova, M. Ilyash, M. Lukashov // *Journal of integrative medicine*. 2022. Vol. 20, N 3. P. 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.joim.2022.02.007>.
2. Hybrid neural networks with virtual flows in medical risk classifiers / K. Khatatneh, S. Filist, R. T. Al-Kasasbeh [et al.] // *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2022. Vol. 43, N 1. P. 1621–1632. <https://doi.org/10.3233/JIFS-212617>.
3. Classifier for the functional state of the respiratory system via descriptors determined by using multimodal technology / S. Filist, R. T. Al-Kasasbeh, O. Shatalova, A. Aikeyeva, O. M. O. Al-Hababbeh, M. Alshamasin, N. Korenevskiy, M. Khrisat, M. Myasnyankin, M. Ilyash // *Computer methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2022. Vol. 26, N 12. P. 1400–1418. <https://doi.org/10.1080/10255842.2022.2117551>.
4. Developing neural network model for predicting cardiac and cardiovascular health using bioelectrical signal processing / S. Filist, R. T. Al-Kasasbeh, O. Shatalova, A. Aikeyeva, N. Korenevskiy, A. Shaqadan, A. Trifonov, M. Ilyash // *Computer methods in biomechanics*

and biomedical engineering. 2021. Vol. 20, N 8. P. 908–921. <https://doi.org/0.1080/10255842.2021.1986486>.

5. Application of fuzzy neural network model and current-voltage analysis of biologically active points for prediction post-surgery risks / O. Shatalova, S. Filist, N. Korenevskiy, Z. Protasova, R. Taha Al-kasasbeh, A. Shaqadan, M. Ilyash, A. Rybochkin // Computer methods in biomechanics and biomedical engineering. 2021. Vol. 24, N 13. P. 1504–1516. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1895128>.

6. Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Zhilin V. V. Biomaterial impedance model for medical risk classifiers in in vivo experiments // Journal of Physics: Conference Series. 2021. N 1801. P. 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1801/1/012045>.

7. Formation of descriptors for medical risk classifiers based on the current-voltage characteristics of biologically active points / A. V. Miroshnikov, A. V. Kiselev, O. V. Shatalova, S. Kadyrova // Journal of Physics: Conference Series. 2021. N 2060. P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2060/1/012013>.

8. Iterative models of bioimpedance in intelligent systems for early diagnosis of infectious diseases / A. V. Miroshnikov, A. V. Kiselev, O. V. Shatalova, R. A. Krupchatnikov // CEUR Workshop Proceedings. 2021. N 2843. P. 35.

9. Параметрические модели биоимпеданса для идентификации функционального состояния живой системы / К. Д. А. Кассим, И. А. Ключиков, О. В. Шаталова, З. Д. Яа // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 50–56.

10. Булатов Р. Д. Применение интегральной двухчастотной импедансометрии в клиническом мониторинге у больных деструктивным панкреатитом // Анестезиология и реаниматология. 2012. № 3. С. 59–62.

11. Модели импеданса биоматериала для формирования дескрипторов в интеллектуальных системах диагностики инфекционных заболеваний / А. В. Мирошников, Н. С. Стадниченко, О. В. Шаталова, С. А. Филист // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 4. С. 1–14. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.018>.

12. Usefulness of endoscopic ultrasound to diagnose the severity of chronic pancreatitis / I. Atsushi, K. Kyoko, O. Hiromasa, S. Ai, S. B. Manoop, V. H. Lyndon, K. Masaru // J. Gastroenterol. 2007. N 42. P. 90–94. <https://doi.org/10.1007/s00535-006-1916-9>.

13. Barsoukov E., Macdonald J. R. Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications. 2nd ed. New Jersey: Wiley Interscience Publication, 2005. 608 p. <https://doi.org/10.1002/0471716243>.

14. Bioelectric Impedance Analysis Test Improves the Detection of Prostate Cancer in Biopsy Candidates: A Multifeature Decision Support System / R. Bartoletti, A. Greco, T. Di Vico, J. Durante, V. Ficarra, E. P. Scilingo, G. Valenza // Frontiers in Oncology. 2021. N 11. P. 1–9. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.555277>.

15. Пат. 2504328 Российская Федерация. Устройство для контроля анизотропии электрической проводимости биотканей / Томакова Р. А., Филист С. А., Кузьмин А. А., Кузьмина М. Н., Алексеенко В. А., Волков И. И. № 2012128471/14; заявл. 06.07.12; опубл. 20.01.14.

16. Prediction models for diagnosis and prognosis of covid-19 infection: systematic review and critical appraisal / L. Wynants, B. V. Calster, G. S. Collins [et al.] // *BMJ*. 2020. N 369. P. m1328. <https://doi.org/10.1136/bmj.m1328>.

17. Классификации биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, Л. В. Шульга // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 29–49.

18. Алгоритм оптимизации модели Войта в классификаторах функционального состояния живых систем / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, М. А. Ефремов, Н. С. Стадниченко, А. Ю. Новоселов, А. В. Павленко // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2022. Т. 12, № 2. С. 59–75. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-59-75>.

19. Филист С. А., Кузьмин А. А., Кузьмина М. Н. Биотехническая система для контроля импеданса биоматериалов в экспериментах *in vivo* // *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2014. № 9. С. 38–42.

20. Шаталова О. В. Итерационная многопараметрическая модель биоимпеданса в экспериментах *in vivo* // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2019. Т. 9, № 1. С. 26–38.

21. Развитие технологии биоимпедансной спектроскопии в системах поддержки принятия врачебных решений / О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, М. А. Ефремов, А. Ю. Новоселов, И. А. Башмакова // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2023. Т. 13, № 1. С. 143–169. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-143-169>.

22. Шаталова О. В. Интеллектуальные системы мониторинга медицинских рисков с учетом биоимпедансных исследований: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2020. 356 с.

23. Формирование дескрипторов для классификаторов функционального состояния системы дыхания на основе спектрального анализа электрокардиосигнала / М. Б. Мяснянкин, С. А. Филист, А. В. Киселев, А. А. Кузьмин // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 8–28.

24. Хронический панкреатит // Клиника высоких медицинских технологий им. Н. И. Пирогова. URL: <https://www.gosmed.ru/lechebnaya-deyatelnost/spravochnik-zabolevaniy/gastroenterologiya-bolezny/khronicheskiy-pankreatit/> (дата обращения: 10.09.2023).

25. Филист С. А., Шаталова О. В., Ефремов М. А. Гибридная нейронная сеть с макро- и мезослоями для медицинских приложений // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение. 2014. № 6. С. 35–39.

26. Использование гибридных нейросетевых моделей для многоагентных систем классификации в гетерогенном пространстве информативных признаков / А. Г. Курочкин, В. В. Жилин, С. Е. Суржикова, С. А. Филист // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. Т. 3, № 31. С. 85–95.

27. Серебровский В. В., Филист С. А., Шаталова О. В. Нечеткое моделирование сложных систем в среде MATLAB и fuzzyTECH: монография. Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова, 2013. 105 с.

References

1. Filist S., Al-Kasasbeh R.T., Shatalova O., Korenevskiy N., Shaqadan A., Protasova Z., Ilyash M., Lukashov M. Biotechnical system based on fuzzy logic prediction for surgical risk classification using analysis of current–voltage characteristics of acupuncture points. *Journal of Integrative Medicine*, 2022, vol. 20, no. 3, pp. 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.joim.2022.02.007>

2. Khatatneh K., Filist S., Al-Kasasbeh R. T., eds. Hybrid neural networks with virtual flows in medical risk classifiers. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2022, vol. 43, no. 1, pp. 1621–1632. <https://doi.org/10.3233/JIFS-212617>

3. Filist S., Al-Kasasbeh R. T., Shatalova O., Aikeyeva A., Al-Hababbeh O. M. O., Alshamasin M., Korenevskiy N., Khrisat M., Myasnyankin M., Ilyash M. Classifier for the functional state of the respiratory system via descriptors determined by using multimodal technology. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2022, vol. 26, no. 12, pp. 1400–1418. <https://doi.org/10.1080/10255842.2022.2117551>

4. Filist S., Al-Kasasbeh R. T., Shatalova O., Aikeyeva A., Korenevskiy N., Shaqadan A., Trifonov A., Ilyash M. Developing neural network model for predicting cardiac and cardiovascular health using bioelectrical signal processing. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2021, vol. 20, no. 8, pp. 908–921. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1986486>

5. Shatalova O., Filist S., Korenevskiy N., Protasova Z., Taha Al-kasasbeh R., Shaqadan A., Ilyash M., Rybochkin A. Application of fuzzy neural network model and current-voltage analysis of biologically active points for prediction post-surgery risks. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2021, vol. 24, no. 13, pp. 1504–1516. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1895128>

6. Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Zhilin V. V. Biomaterial impedance model for medical risk classifiers in in vivo experiments. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 1801, pp. 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1801/1/012045>
7. Miroshnikov A. V., Kiselev A. V., Shatalova O. V., Kadyrova S. Formation of descriptors for medical risk classifiers based on the current-voltage characteristics of biologically active points. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 2060, pp. 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2060/1/012013>
8. Miroshnikov A. V., Kiselev A. V., Shatalova O. V., Krupchatnikov R. A. Iterative models of bioimpedance in intelligent systems for early diagnosis of infectious diseases. *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, no. 2843, p. 35.
9. Kassim K. D. A., Klyuchikov I. A., Shatalova O. V., Yaa Z. D. Parametricheskiye modeli bioimpedansa dlya identifikatsii funktsional'nogo sostoyaniya zhivoy sistemy [Parametric bioimpedance models for identifying the functional state of a living system]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2012, no. 4, pp. 50–56.
10. Bulatov R. D. Primeneniye integral'noy dvukhchastotnoy impedansometrii v klinicheskoy monitoringe u bol'nykh destruktivnym pankreatitom [The use of integral two-frequency impedance metrology in clinical monitoring in patients with destructive pancreatitis]. *Anesteziologiya i reanimatologiya = Anesthesiology and Resuscitation*, 2012, no. 3, pp. 59–62.
11. Miroshnikov A. V., Stadnichenko N. S., Shatalova O. V., Filist S. A. Modeli impedansa biomateriala dlya formirovaniya deskriptorov v intellektual'nykh sistemakh diagnostiki infektsionnykh zabolevaniy [Biomaterial impedance models for the formation of descriptors in intelligent systems for the diagnosis of infectious diseases]. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 1–14. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.018>
12. Atsushi I., Kyoko K., Hiromasa O., Ai S., Manoop S. B., Lyndon V. H., Masaru K. Usefulness of endoscopic ultrasound to diagnose the severity of chronic pancreatitis. *J. Gastroenterol*, 2007, no. 42, pp. 90–94. <https://doi.org/10.1007/s00535-006-1916-9>
13. Barsoukov E., Macdonald J. R. Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications. 2nd ed. New Jersey, Wiley Interscience Publication, 2005. <https://doi.org/10.1002/0471716243>
14. Bartoletti R., Greco A., Di Vico T., Durante J., Ficarra V., Scilingo E. P., Valenza G. Bioelectric Impedance Analysis Test Improves the Detection of Prostate Cancer in Biopsy Candidates: A Multifactorial Decision Support System. *Frontiers in Oncology*, 2021, N 11, pp. 1–9. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.555277>
15. Tomakova R. A., Filist S. A., Kuz'min A. A., Kuz'mina M. N., Aleksenko V. A., Volkov I. I. Ustroystvo dlya kontrolya anizotropii elektricheskoy provodimosti biotkaney [Device for controlling the anisotropy of electrical conductivity of biotissues]. Patent RF, no. 2504328, 2014.

16. Wynants L., Calster B. V., Collins G. S., eds. Prediction models for diagnosis and prognosis of COVID-19 infection: systematic review and critical appraisal. *BMJ*, 2020, no. 369, pp. m1328. <https://doi.org/10.1136/bmj.m1328>
17. Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Stadnichenko N. S., Shulga L. V. Klassifikatsiya biologicheskikh ob"yektov na osnove mnogomernogo bioimpedansnogo analiza [Classification of biological objects based on multidimensional bioimpedance analysis]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 3/4, pp. 29–49.
18. Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Efremov M. A., Stadnichenko N. S., Novoselov A. Yu., Pavlenko A. V. Algoritm optimizatsii modeli Voyta v klassifikatorakh funktsional'nogo sostoyaniya zhivyykh system [Method for Classification of the Functional State of Living Systems Based on Recurrent Voigt Models]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 59–75. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-59-75>
19. Filist S. A., Kuzmin A. A., Kuzmina M. N. Biotekhnicheskaya sistema dlya kontrolya impedansa biomaterialov v eksperimentakh in vivo [Biotechnical system for controlling the impedance of biomaterials in in vivo experiments]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2014, no. 9, pp. 38–42.
20. Shatalova O. V. Iteratsionnaya mnogoparametricheskaya model' bioimpedansa v eksperimentakh in vivo [Iterative multiparameter bioimpedance model in in vivo experiments]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 26–38.
21. Shatalova O. V., Stadnichenko N. S., Yefremov M. A., Novoselov A. Yu., Bashmakova I. A. Razvitiye tekhnologiy bioimpedansnoy spektroskopii v meditsinskoy podderzhke prinyatiya meditsinskikh resheniy [Development of Bioimpedance Spectroscopy Technology in Medical Decision Support Systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 143–169. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-143-169>
22. Shatalova O. V. Intellektual'nyye sistemy meditsinskogo riska s uchetom bioimpedansnykh issledovaniy [Intelligent systems for monitoring medical risks taking into account bioimpedance studies]. Kursk, Southwest State University Publ., 2020. 356 p.

23. Myasnyankin M. B., Filist S. A., Kiselev A. V., Kuz'min A. A. Formirovaniye deskriptorov dlya klassifikatorov funktsional'nogo sostoyaniya sistem dykhaniya na osnove spektral'nogo analiza elektrokardiosignala [Formation of descriptors for classifiers of the functional state of respiratory systems based on spectral analysis of the electrocardiosignal]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 3/4, pp. 8–28.

24. Khronicheskiy pankreatit [Chronic pancreatitis]. Klinika vysokikh meditsinskikh tekhnologiy imeni N. I. Pirogova [Clinic of High Medical Technologies named after N. I. Pirogov]. Available at: <https://www.gosmed.ru/lechebnaya-deyatelnost/spravochnik-zabolevaniy/gastroenterologiya-bolezny/khronicheskiy-pankreatit/>. (accessed 10.09.2023)

25. Filist S. A., Shatalova O. V., Efremov M. A. Gibriddnaya neyronnaya set' s makrosloyami dlya meditsinskikh prilozheniy [Hybrid neural network with macro layers for medical applications]. *Neyrokomp'yutery. Razrabotka i primeneniye = Neurocomputers. Development and Application*, 2014, no. 6, pp. 35–39.

26. Kurochkin A. G., Zhilin V. V., Surzhikova S. E., Filist S. A. Ispol'zovaniye gibridnykh neyrosetevykh modeley dlya mnogoagentnykh sistem klassifikatsii v geterogennom prostranstve informativnykh priznakov [Using hybrid neural network models for multi-agent classification systems in a heterogeneous space of informative features]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technology*, 2015, vol. 3, no. 31, pp. 85–95.

27. Serebrovskiy V. V., Filist S. A., Shatalova O. V. Nechetkoye modelirovaniye slozhnykh sistem v srede MATLAB i fuzzyTECH [Fuzzy modeling of complex systems in MATLAB and fuzzyTECH]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov Publ., 2013. 105 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Шаталова Ольга Владимировна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: shatolg@mail.ru, Researcher ID: C-3687-2015, ORCID: 0000-0002-0901-9272

Olga V. Shatalova, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: shatolg@mail.ru, Researcher ID: C-3687-2015, ORCID: 0000-0002-0901-9272

Стадниченко Никита Сергеевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Nikita S. Stadnichenko, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Ефремов Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ib-swsu@yandex.ru

Mikhail A. Efremov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ib-swsu@yandex.ru

Башмакова Ирина Алексеевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Irina92_2010@mail.ru, ORCID: 0009-0001-1402-7349

Irina A. Bashmakova, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Electricity Supply, Southwest State University, Kursk, Russia Federation, e-mail: Irina92_2010@mail.ru, ORCID: 0009-0001-1402-7349

Лях Антон Викторович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Anton V. Lyakh, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Серебровский Андрей Вадимович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Andrey V. Serebrovsky, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru