

На правах рукописи

Волков Иван Иванович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ДВУХАГЕНТНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ
СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА
МОРФОЛОГИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ И ВЕРОЯТНОСТНЫХ
НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические и медицинские системы)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

КУРСК 2013

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

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Филист Сергей Алексеевич

Официальные оппоненты:

Николаев Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет, профессор кафедры информационных систем и технологий

Черноморец Андрей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики

Ведущая организация:

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола

Защита диссертации состоится 18 октября 2013 года в 12.00 часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 212.105.03 при Юго-Западном государственном университете по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета

Автореферат разослан 17 сентября 2013 г

Ученый секретарь
диссертационного совета

Милостная Наталья Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Основную проблему для современного здравоохранения представляют болезни системы кровообращения, которые по данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) прочно занимают первое место в мире по смертности трудоспособного населения. Несмотря на значительные усилия ученых, сегодня не замечено тенденции к уменьшению индекса заболеваемости и смертности по причине сердечнососудистых заболеваний (ССЗ), что говорит о недостаточности изучения сердечнососудистой системы (ССС) с позиций ее адекватного функционирования. Локальные исследования ССС проводятся без взаимосвязи с динамикой сегментов и общей динамикой сосудистой системы на разных региональных уровнях. Такая позиция приводит к отставанию в понимании функционирования ССС с позиций системного анализа как системы с синхронизацией на разных уровнях ее функционирования.

Степень разработанности темы исследования. Для поддержания сложной системы, в том числе и ССС, в должном функциональном состоянии необходима информация о состоянии сегментов, которые входят в систему, на основании анализа которой делается «правильный логический вывод». По С. Расселу такую задачу решает рациональный (компьютерный или интеллектуальный) агент. В данной работе под агентом понимается комплекс технических, алгоритмических и программных средств, способных получать новые знания об исследуемом объекте и на основе вновь полученных и имеющихся в базе данных знаний формировать управленческие решения, направленные на поддержку функционального состояния объекта или системы в целом.

При диагностике состояния ССС «правильный логический вывод» не исчерпывает понятие рациональности, поскольку часто возникают сложные ситуации, в которых невозможно (часто вследствие ограниченности информации) однозначно выбрать какое-либо правильное действие, но при этом выбор необходим, то есть что-то надо делать. В этих сложных ситуациях используют множество агентов. Правильная организация взаимодействия между агентами в такой многоагентной системе позволяет значительно повысить как эффективность самой системы принятия решения, так и эффективность функционирования контролируемой системы.

Значительной информационной ценностью о функционировании ССС обладают скрытые составляющие процессов – системные ритмы, которые проявляются во всех подсистемах ССС. Информация о системных ритмах может быть получена посредством множества агентов, работающих с различными подсистемами, и затем интегрирована либо агентом более высокой иерархии либо лицом, принимающим решение (ЛПР). Однако вопросы взаимодействия агентов в системах со сложными системными ритмами, а также друг с другом при принятии окончательных решений не достаточно освещены в научной литературе и требуют дальнейшего исследования.

Научно-технической задачей исследования является повышение качества принятия диагностических решений при неинвазивном контроле состояния ССС.

Объект исследования. Сложноструктурированные квазипериодические сигналы.

Предмет исследования. Методы и алгоритмы анализа и классификации состояния сердечнососудистой системы.

Цель исследования - разработка методов и алгоритмов для двух-агентной классификации, основанных на морфологическом анализе и вероятностных нейронных сетях, обеспечивающих повышение качества принятия диагностических решений по состоянию сердечнососудистой системы.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие **задачи**:

- выполнен системный анализ существующих методов интеллектуальной поддержки принятия решений, предназначенные для решения практических задач в медицинских системах, выявлены их достоинства и недостатки;
- разработан метод и алгоритмы формирования пространства информативных признаков для классификации состояний системы кровообращения, основанные на морфологической обработке данных о системных ритмах и их спектральном анализе;
- разработана структурно-функциональная организация сетевых структур, предназначенных для классификации состояний системы кровообращения, и алгоритмы их функционирования, предназначенные для принятия решений в многоагентных системах классификации;
- выполнены экспериментальные исследования по оценки эффективности применения созданных методов и алгоритмов для решения задач медицинской диагностики.

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной и выносимые на защиту:

- метод формирования пространства информативных признаков в двухагентных классифицирующих системах, отличающийся тем, что для классификации сложных систем осуществляется синхронная запись двух системных сложномодулированных сигналов, источником которых являются процессы в подсистемах сложной системы, из полученных сигналов выделяются медленные волны, вычисляется их спектр, распределение мощности которого по частотам медленных волн используется в качестве системы информативных признаков, позволяющий сформировать модели классификации живых систем;
- алгоритмы морфологического анализа кардиосигналов, отличающиеся последовательностью морфологических и алгебраических операций, позволяющие выделить спектры медленных волн, модулирующих кардиосигналы в различных подсистемах живой системы;
- структура гибридной нейронной сети с макрослоями, содержащая два макрослоя, отличающаяся тем, что первый макрослой состоит из вероятно-

стных нейронных сетей, а второй макрослой – из нечетких нейронных сетей, позволяющая определить субъективные вероятности принадлежности входного вектора к выделяемым классам;

- структурно-функциональная организация вероятностной нейронной сети с макрослоями, отличающаяся группированием информативных признаков по макрослоям, позволяющая агрегировать решения множества агентов.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что изложены идеи формирования двухагентных классификаторов состояния системы кровообращения на основе вероятностной нейронной сети с макрослоями с группированием информативных признаков по макрослоям.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы (государственный контракт № П705 от 12 августа 2009 г., номер государственной регистрации 01200962672) по проблеме «Прогнозирование функционального состояния сердечнососудистой системы человека на основе многомерного спектрального анализа данных мониторинга акустических и электрофизиологических процессов жизнедеятельности, осуществляемого посредством микроминиатюрных датчиков и мобильных средств связи» и в соответствии с научным направлением Юго-Западного государственного университета «Разработка медико-экологических информационных технологий».

Практическое значение работы определяется возможностью применения результатов исследования при прогнозировании и диагностике сердечнососудистых заболеваний. Разработанные методы, модели и алгоритмы составили основу построения автоматизированной системы прогнозирования риска осложнений атеросклероза, в частности, прогнозирования ишемической болезни сердца и инфаркта миокарда, основанной на анализе медленных системных ритмов, получаемых в результате анализа отсчетов электрокардиосигнала и фотоплетизмосигнала на выбранной апертуре наблюдения. Основные теоретические и практические результаты работ внедрены в учебный процесс Юго-Западного государственного университета при подготовке специалистов 200402 «Инженерное дело в медико-биологической практике», использованы при проведении научно-исследовательской работы, выполняемой по заказу Министерства образования и науки РФ (гос. рег. №01200962672) и используются в ходе профилактических обследований по профилактике сердечнососудистых заболеваний в учреждениях здравоохранения Курской области, что подтверждено соответствующими актами.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались методы: системного анализа, спектрального анализа, морфологического анализа, математической статистики, нечетких нейронных сетей, распознавания образов, экспертного оценивания и принятия решений. При разработке нейросетевых модулей принятия решений и нечеткого вывода в качестве инструментария проведения экспериментов использовался Matlab 7.10 с графическим интерфейсом пользователя для Neural Network Toolbox и со встроен-

ным пакетом Fuzzy Logic Toolbox. При реализации методов спектрального и морфологического анализа использовался Mathcad 14.

Область исследования. Содержание диссертации соответствует п.10 «Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах» и п.12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации» паспорта специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки).

Положения, выносимые на защиту. 1. Методы морфологического анализа кардиосигналов, позволяющие выделить системные ритмы из сложно модулированных сигналов с различными способами модуляции. 2. Гибридный классификатор состояний системы кровообращения, позволяющий увеличить основные показатели качества прогнозирования сердечнососудистых рисков на 10..16%. 3. Структурно-функциональная организация вероятностной нейронной сети с макрослоями с группированием информативных признаков по макрослоям.

Личный вклад автора. В диссертации приведены результаты исследований, выполненных лично автором или при его непосредственном участии.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты исследования показали их воспроизводимость в различных условиях, непротиворечивость концепциям спектрального анализа и нейросетевого моделирования, а так же аналогичным результатам, полученным другими исследователями. Методы и алгоритмы выделения медленных волн из сложно модулированных сигналов построены на теории морфологического анализа сложно структурированных данных 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 12 Международных, Всероссийских и региональных конференциях и симпозиумах: Биомедсистемы – 2011 (Рязань-2011); «Компьютерные науки и технологии» (Белгород – 2011); «Медико-экологические информационные технологии» (Курск- 2011, 2012, 2013); Распознавание – 2012 (Курск-2012); «Информационные технологии и компьютерные системы для медицины» (Маврикий – 2012); «Компьютерное моделирование в науке и технике» (Андорра – 2012); Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии (Владимир-2012); Современные наукоемкие технологии (Испания-Франция – 2012); Теория и практика системного анализа (Белгород-2012); «Биология - наука XXI века» (Пущино- 2013); на научно-технических семинарах кафедры биомедицинской инженерии ЮЗГУ (Курск - 2011, 2012, 2013).

Публикации. Самостоятельно и в соавторстве по теме диссертации опубликовано 17 научных работ, из них три статьи в рецензируемых научных журналах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, включающего 99 отечественных и 14 зарубежных наименований. Работа изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, определяются цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы. Кратко излагается содержание глав диссертации.

В первой главе выполнен анализ состояния предметной области. Подчеркивается, что важной особенностью сложных систем являются скрытые периодические процессы – медленные волны, содержащие релевантную информацию о текущем и будущем состоянии сложной системы. Система, в частности живая, характеризуется множеством медленных волн, отличающихся частотой основной гармоник и, как следствие, временными интервалами наблюдения сигнала, необходимыми для их выделения.

Существующие методы выделения медленных волн на основе анализа квазипериодических биосигналов, в том числе кардиосигналов, можно разделить на две группы: 1) методы первичного анализа сигнала, когда производится непосредственное измерение амплитудных и временных значений характерных элементов сигнала; 2) методы вторичного анализа, когда на основе выделенных элементов формируется сигнал («вторичный»), характеризующий новые свойства сигнала.

Методы вторичного анализа квазипериодических сигналов, используемые в настоящее время в основном для оценки вариации сердечного ритма (BCP), позволяют выявить активность регуляторных механизмов организма (центрального, вегетативного, гуморального, рефлекторного).

Несмотря на огромное число исследований в этой области, возможности методологии анализа ритмической структуры биосигналов далеко не исчерпаны и ее развитие продолжается.

В заключение первой главы формируются цель и задачи исследования.

Во второй главе разработаны методы и алгоритмы морфологического анализа системных ритмов, полученных двумя агентами.

Принимаемые решения основаны на гипотезе об амплитудной модуляции системного ритма медленной волной частоты Ω , и позволяют оценить спектр амплитудно-модулированного сигнала, представленного в виде:

$$u(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi) + \frac{U_0 M}{2} \{ \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi + \psi] + \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi - \psi] \}, \quad (1)$$

где M – коэффициент модуляции;

U_0 , ω_0 и φ – амплитуда, частота и фазовый сдвиг модулируемого сигнала.

Учитывая, что модуляция одного и того же системного ритма медленными волнами может осуществляться посредством множества контуров управления, например, в случае кардиосигнала к таким контурам управления относятся вегетативная нервная система и сосудистая система. Для класси-

фикации сложных систем такого типа используем двухагентную систему принятия решений, каждый из агентов которой связан с соответствующим контуром управления.

Анализ оконного преобразования Фурье (ОПФ) кардиосигналов показывает, что распределение спектральных составляющих сигнала не позволяет локализовать спектры дыхательной составляющей и медленных волн более высокого порядка, и, следовательно, не представляется возможным сформировать пространство информативных признаков на основе спектра ОПФ.

Для выделения медленных волн получают синхронные записи фотоплетизмосигнала и ЭКС, определяется частота сердечных сокращений (ЧСС), а затем из полученных сигналов выделяются медленные волны и вычисляется их ОПФ. После этого вычисляются мощности спектральных коэффициентов в области медленной составляющей 2-ого порядка - от 0,01 до 0,05 Гц, в области медленной составляющей 1-ого порядка - от 0,05 до 0,15 Гц, в области дыхательной составляющей - от 0,15 до 0,5 Гц.

На основании полученных результатов сформировано шесть информативных признаков $X1...X6$, по числу зон, выделенных в спектрах медленных волн, получаемых посредством двухагентной системы. ЧСС используют в качестве седьмого информативного признака $X7$.

Схема алгоритма выделения медленных волн из фотоплетизмосигнала представлена на рисунке 1,а.

Для выделения медленных волн из фотоплетизмосигнала Z задается длина структурообразующего элемента (блок 1). Длина структурообразующего элемента определяется как

$$\ell_w = (1,3...1,6) \frac{60 \cdot f_{\bar{a}}}{\times \tilde{N}\tilde{N}}, \quad (2)$$

где $f_{\bar{a}}$ - частота дискретизации сигнала (выбрана равной 100 Гц).

Вначале морфологической обработки фотоплетизмосигнала (сигнала Z) осуществляют морфологическую операцию дилатация сигнала Z с множеством нулевых элементов, определяемым структурообразующим элементом W (блок 2), и получают динамический ряд $Z1 = Z \oplus W$. Затем осуществляют морфологическую операцию эрозия сигнала Z с множеством нулевых элементов, образованным посредством структурообразующего элемента W , и получают сигнал $Z2 = Z \ominus W$ (блок 3). В блоке 4 получают разностный сигнал $Z3 = Z1 - Z2$, а в блоках 5 и 6 расширяют динамический диапазон сигнала посредством отстройки от постоянной составляющей. Выходной сигнал $Z3$ (блок 7) несет информацию о спектральном составе медленных волн.

Исследование ритмических структур ЭКС осуществлялось в соответствии со схемой алгоритма, представленной на рисунке 1,б.

Для выделения медленных волн из электрокардиосигнала Y определяют абсолютную величину сигнала $|Y|$. Эпюра этого сигнала показана на рисунке 2, а. В блоке 3 задают длину структурообразующего элемента согласно формуле (2).

В блоке 4 (рисунок 1,б) осуществляют морфологическую операцию дилатация сигнала $|Y|$ с множеством нулевых элементов, определяемым структурообразующим элементом W и получают динамический ряд

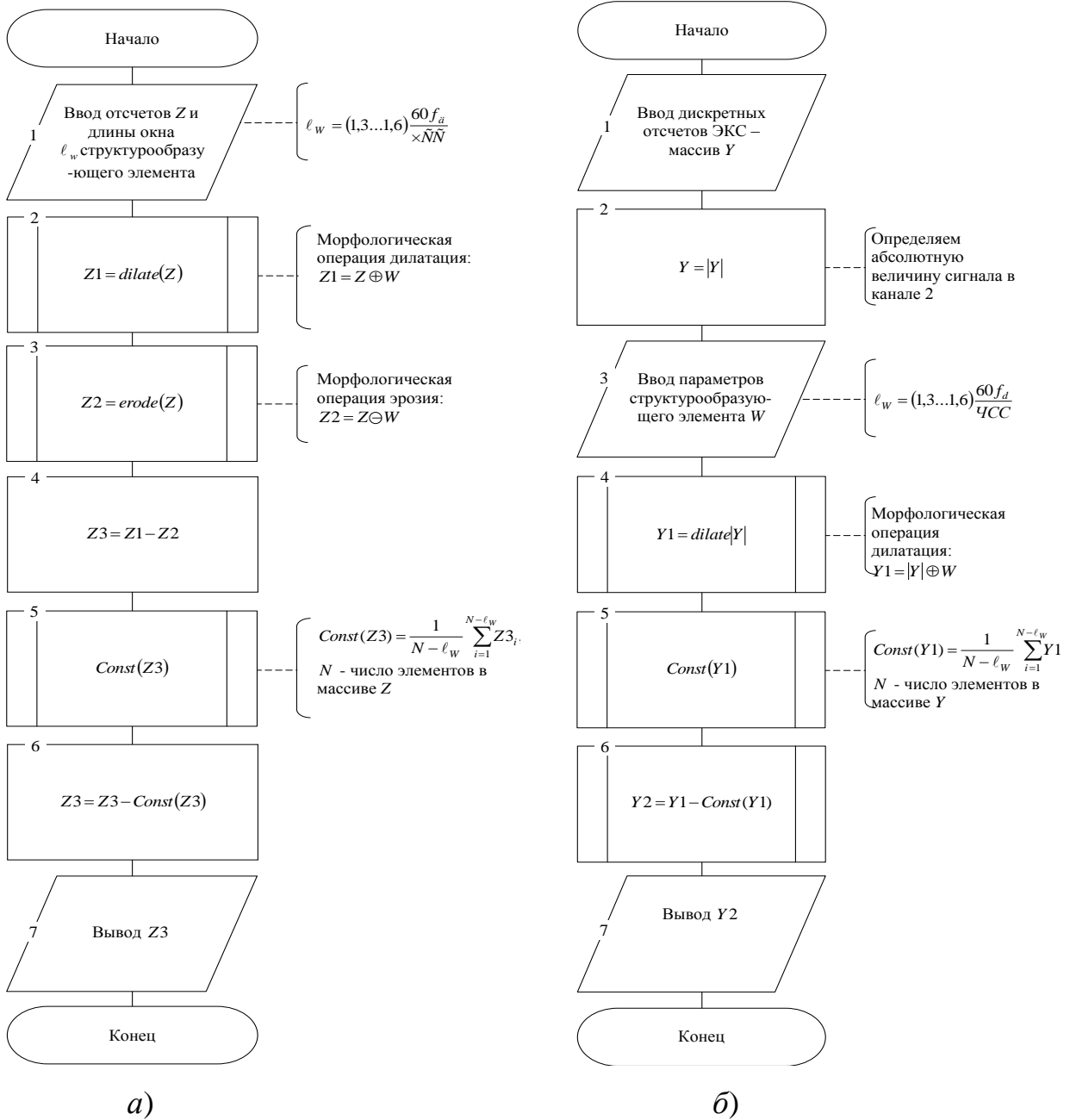
$$Y1 = |Y| \oplus W. \quad (3)$$


Рисунок 1 - Схемы алгоритмов морфологического анализа кардиосигналов: а- фотоплетизмосигнала, б- электрокардиосигнала

На рисунке 2,б показана эпюра сигнала, полученного на выходе блока 3.

В блоке 5 вычисляют постоянную составляющую сигнала, полученного в результате морфологической операции дилатация, а в блоке 6 эту составляющую вычитают из сигнала, полученного на выходе блока 4. Эпюра сигнала, полученная на выходе блока 6, представлена на рисунке 2,в.

Аналогичные алгоритмы морфологического анализа получены для случая частотной модуляции ЭКС медленными ритмами.

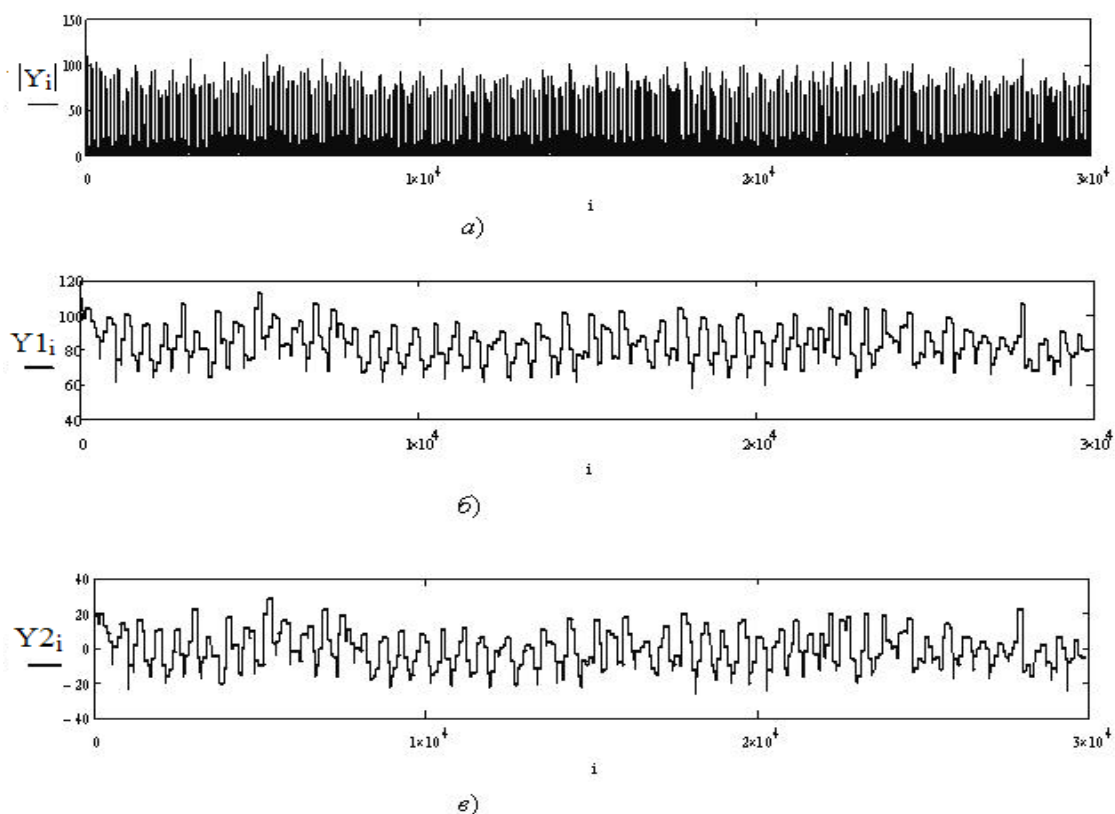


Рисунок 2 - Эпюры, соответствующие последовательности морфологической обработки электрокардиосигнала

На рисунке 3 показан спектр медленных волн, полученный в результате двухагентного анализа.

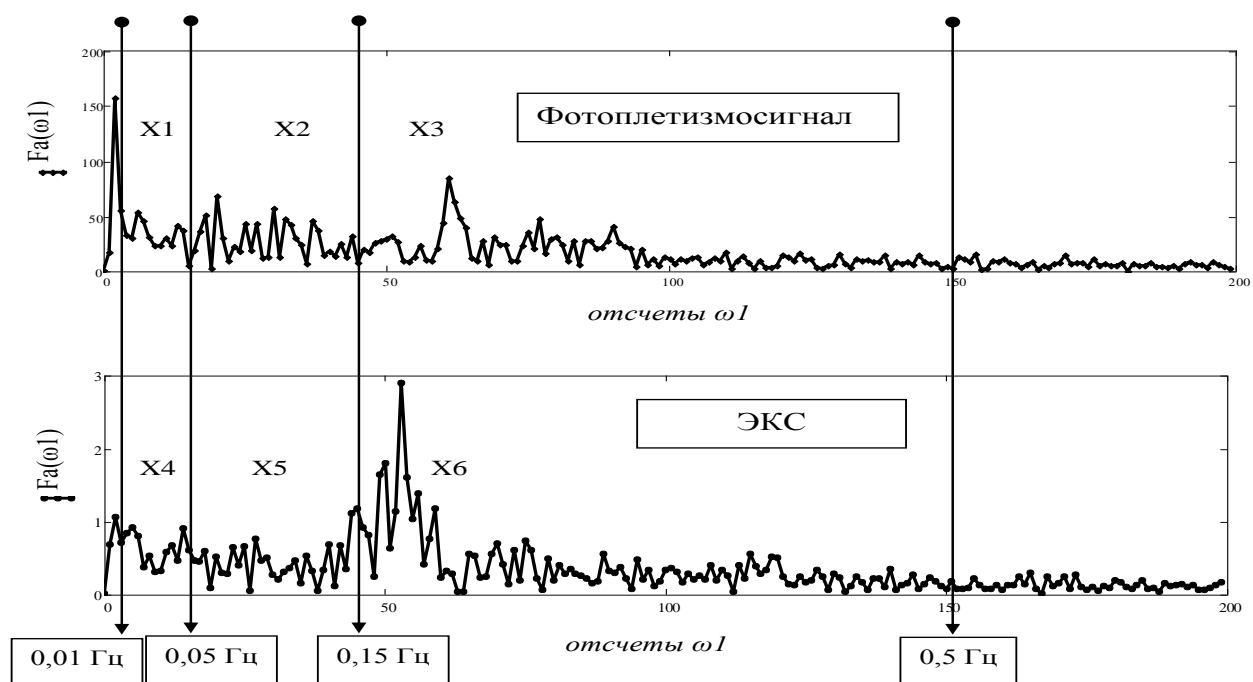


Рисунок 3 - Формирование признакового пространства в двухагентной системе классификации

На основании полученных результатов сформировано пространство информативных признаков $X_1...X_6$. В качестве седьмого информативного признака X_7 используется ЧСС. Семизначный вектор информативных признаков поступает на вход обучаемой нейронной сети, выходы которой соответствуют разделяемым классам сердечнососудистых заболеваний.

В главе 3 исследованы модели классификации сложных систем на основе модифицированной вероятностной нейронной сети для медицинских приложений. Сравнение вероятностей альтернативных гипотез дает ценную информацию при управлении, как профилактическими мероприятиями, так и диагностическими исследованиями.

Структура принятия решения при выбранной схеме классификации представлена на рисунке 4. Она включает совокупность независимых модулей классификации, которые анализируют одни и те же признаки, но заключения дают только по одному, специфичному для каждого модуля, классу. В качестве дополнительных признаков каждый модуль классификации использует заключения других модулей.

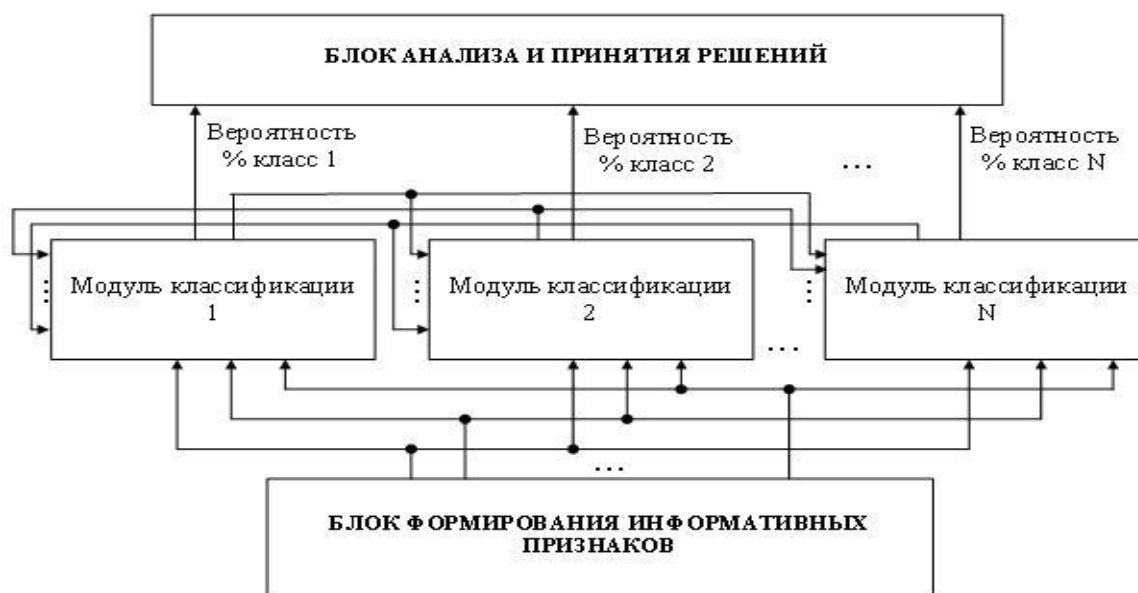


Рисунок 4 - Схема структурно-функциональной организации принятия решения при вероятностной классификации состояний сложных систем

Достоинство такой структуры состоит в том, что она оказывается работоспособна при неработоспособности одного или нескольких модулей классификации, используемых ЛПР при принятии решения. При этом ЛПР использует ту базу решающих правил, которая соответствует располагаемой им информацией, то есть фактическим пространством информативных признаков и наличием работоспособных модулей.

Для реализации предложенной структуры использованы вероятностные нейронные сети (PNN) с макрослоями. В основу классификации в сети PNN лежит метод Байеса. В соответствии с данным методом используем ре-

шающее правило, согласно которому для двух классов ω_1 и ω_2 , выбирается класс ω_1 , если

$$h_{\omega_1} \cdot c_{\omega_1} \cdot f_{\omega_1}(x) > h_{\omega_2} \cdot c_{\omega_2} \cdot f_{\omega_2}(x), \quad (4)$$

где h - априорная вероятность;
 c — цена ошибки классификации;
 $f(x)$ — функция плотности вероятностей.

Оценка $f(x)$ осуществляется с помощью метода Парцена, в котором используется весовая функция, имеющая центр в точке, представляющей учебный образец – функция потенциала (ядро). В качестве ядра используем функцию Гаусса.

В качестве архитектуры нейронной сети, выполняемой поставленную задачу, выбираем нейронную сеть блочного типа. Характерной особенностью такой сети является то, что каждый решающий модуль сети осуществляет классификацию на два класса: объект принадлежит к классу ω_i или объект не принадлежит к классу ω_i , то есть $\overline{\omega_i}$. Таким образом, в нейронной сети будем иметь столько решающих модулей, сколько классов предполагается выделить в исходных данных.

Структурная схема вероятностной нейронной сети, реализующая схему принятия решений рисунок 4, приведена в виде макрослоя PNN в левой части рисунка 5.

Слой суммирования в каждом модуле макрослоя PNN имеет два элемента: для класса ω_i и для класса $\overline{\omega_i}$. К любому элементу слоя суммирования идут связи только от элементов слоя образцов, принадлежащих соответствующему классу. Весовые значения связей, идущих от элементов слоя образцов к элементам слоя суммирования, фиксируются равными 1. Элемент слоя суммирования просто суммирует выходные значения элементов слоя образцов. Эта сумма дает оценку значения функции плотности распределения вероятностей для совокупности экземпляров соответствующего класса.

Слой образцов имеет по одному элементу для каждого образца из обучающей выборки. Входной слой и слой образцов образуют полносвязную структуру в каждом модуле классификации PNN. Для входящих в элемент слоя образцов связей весовые значения устанавливаются равными элементам соответствующего вектора-образца.

Математические модели описываются вероятностями состояния на выходах нейронов выходного слоя i -го блока макрослоя PNN (на рисунке 5 приведен пример сетевой структуры для шести компонентного вектора информативных признаков):

$$P_{\omega_i} = \sum_{r=1}^{R_{\omega_i}} \exp \left(\frac{- \sum_{j=0}^5 (w_{\omega_i}^{jr} - x_j)^2}{\sigma_{\omega_i}^2} \right), \quad (5)$$

$$P_{\omega_i}^- = \sum_{r=1}^{R_{\omega_i}^-} \exp \left(\frac{- \sum_{j=0}^5 (w_{\omega_i}^{jr} - x_j)^2}{\sigma_{\omega_i}^2} \right), \quad (6)$$

где x_j – компоненты вектора неизвестного входного образа;

$w_{\omega_i}^{jr}$ – j -я компонента r -го элемента обучающей выборки класса ω_i ;

$\overline{w_{\omega_i}^{jr}}$ – j -я компонента r -го элемента обучающей выборки класса $\overline{\omega_i}$.

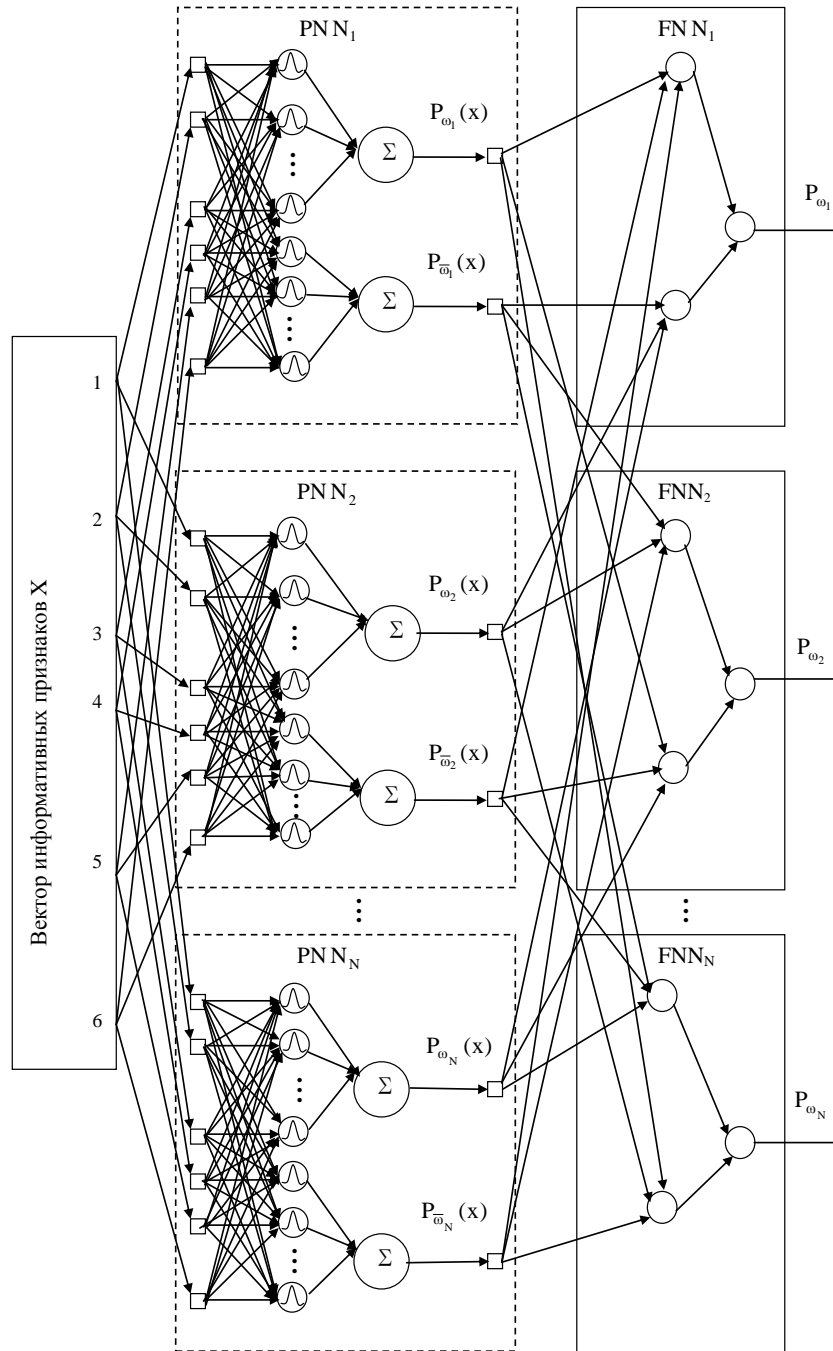


Рисунок 5 - Структурная схема гибридной нейронной сети с макро-слоями

В обучающей выборке содержится K элементов из N классов для любого класса i справедливо равенство

$$R_{\omega_i} + R_{\bar{\omega}_i} = R. \quad (7)$$

Архитектура сети определяется структурой обучающей выборки:

- число входных элементов равно числу признаков (на рисунке 6 их шесть);
- число элементов слоя образцов в каждом модуле классификации равно числу элементов в обучающей выборке R ;
- число элементов слоя суммирования в макрослое PNN равно удвоенному числу разделяемых классов, то есть $2N$.

После того как сеть построена, неизвестный экземпляр подается на вход сети, и в результате прямого прохода через сеть на выходах модулей классификации появятся вероятности, соответствующие каждой дифференцируемой патологии.

На двух выходах каждого блока PNN_i макрослоя PNN присутствуют вероятность P_{ω_i} класса ω_i и вероятность $P_{\bar{\omega}_i}$ класса $\bar{\omega}_i$. При этом, в общем случае, $P_{\omega_i} + P_{\bar{\omega}_i} \neq 1$. Эти вероятности определяются соотношением и расположением в пространстве информативных признаков векторов обучающей выборки, а также выбранной шириной функций активности в формулах (5) и (6).

Чтобы в процессе принятия решения учитывать не только вероятность нулевой гипотезы, но и вероятность альтернативной гипотезы, кроме макрослоя PNN в сеть введен макрослой нечеткой нейронной сети (FNN), работа которого основана на нечеткой логике принятия решений и учитывает особенности объекта исследования. В итоге каждый модуль классификации содержит последовательно соединенные блок PNN и блок FNN, на выходе данной цепочки выдается вероятность, по существу, субъективная, принадлежности входного вектора к данному классу. Окончательное решение принимает ЛПР на основе анализа вероятностей, поступающих с выходов блоков FNN.

Окончательная субъективная вероятность выделяемого класса определяется в блоке FNN, который является моделью экспертной оценки результатов, получаемых в макрослое PNN. Каждый модуль макрослоя FNN состоит из двух слоев. Первый слой имеет два нейрона, в первом из которых осуществляется вычисление субъективной вероятности наличия патологии ω_i , а во втором – субъективной вероятности отсутствия патологии $\bar{\omega}_i$. Каждый из нейронов первого слоя каждого модуля макрослоя FNN имеет N входов. Схема соединения выходов макрослоя PNN и входов макрослоя FNN построена таким образом, чтобы нечеткая операция, которая в них осуществляется, была аналогична операции сложения вероятностей (алгебраического сложения). Выполнение этого требования достигается тем, что на нейроны первого слоя модулей макрослоя FNN поступают свидетельства, подтвер-

ждающие одно и то же событие. Это значит, что на первый нейрон должна поступать информация, подтверждающая наличие класса ω_i , а на второй нейрон - подтверждающая наличие класса $\bar{\omega}_i$.

Второй слой модуля классификации макрослоя FNN содержит всего лишь один нейрон, который выполняет роль, аналогичную роль дефузификатора в системе нечеткого логического вывода. Нечеткие операции, выполняемые в узлах FNN, при отсутствии или недостатке экспертных данных определялись на основе методики, основанной на использовании генетических алгоритмов.

В четвертой главе проведены экспериментальные исследования разработанных методов и технических решений классификации посредством многоагентных систем. Оценка эффективности предложенных методов, алгоритмов и средств интеллектуальной поддержки принятия решения была осуществлена на примере интеллектуальной системы диагностики сердечно-сосудистых заболеваний.

Для получения надежных выводов о прогнозе возникновения и диагностики сердечнососудистой патологии необходимо кроме исследования медленных волн анализировать ряд других факторов. Факторы риска сердечнососудистых заболеваний неоднозначны для различных регионов и для различных групп населения. Очень большое влияние на риск оказывает комбинированное влияние факторов.

Таким образом, на входе сетевой модели анализа и классификации имеем некоторую совокупность групп информативных признаков, полученных в результате использования различных методик и технологий диагностики, которые необходимо интегрировать в единую сетевую структуру классификации.

С этой целью была разработана структурно-функциональная организация вероятностной нейронной сети с макрослоями с группированием информативных признаков по макрослоям (ВНСМГ), в которой интегрированы вероятностные нейронные сети, структура которых была предложена в третьей главе. Принятие решений в сетях с такой структурой осуществляется на основе анализа множества групп информативных признаков, полученных посредством различных методик и технологий диагностики. За каждую патологию ℓ , определяемую по r -й группе информативных признаков, отвечает нейронная сеть прямого распространения $NET_{\ell r}$. Если выделяются L заболеваний, то для каждой группы информативных признаков t_r получаем макрослой, содержащий столько нейронных сетей прямого распространения, сколько заболеваний дифференцируется данной ВНСМГ. Число макрослоев определяется числом групп информативных признаков R , используемых для диагностики. Так как решения о принадлежности к заданному заболеванию принимаются в каждом из R слоев ВНСМГ, то ВНСМГ должна иметь $R+1$ слой. Выходной слой предназначен для агрегирования решений, принимае-

мых в каждом слое, и тоже выполняется в виде макрослоя нейронных сетей прямого распространения.

Структурная схема ВНСМГ, выполняющая все вышеперечисленные функции, представлена на рисунке 6.

Для работы ВНСМГ необходима база данных, в которой выделено два блока: база моделей нейронных сетей и база обучающих выборок. База моделей нейронных сетей формируется в процессе настройки нейронных сетей в соответствующих слоях ВНСМГ.

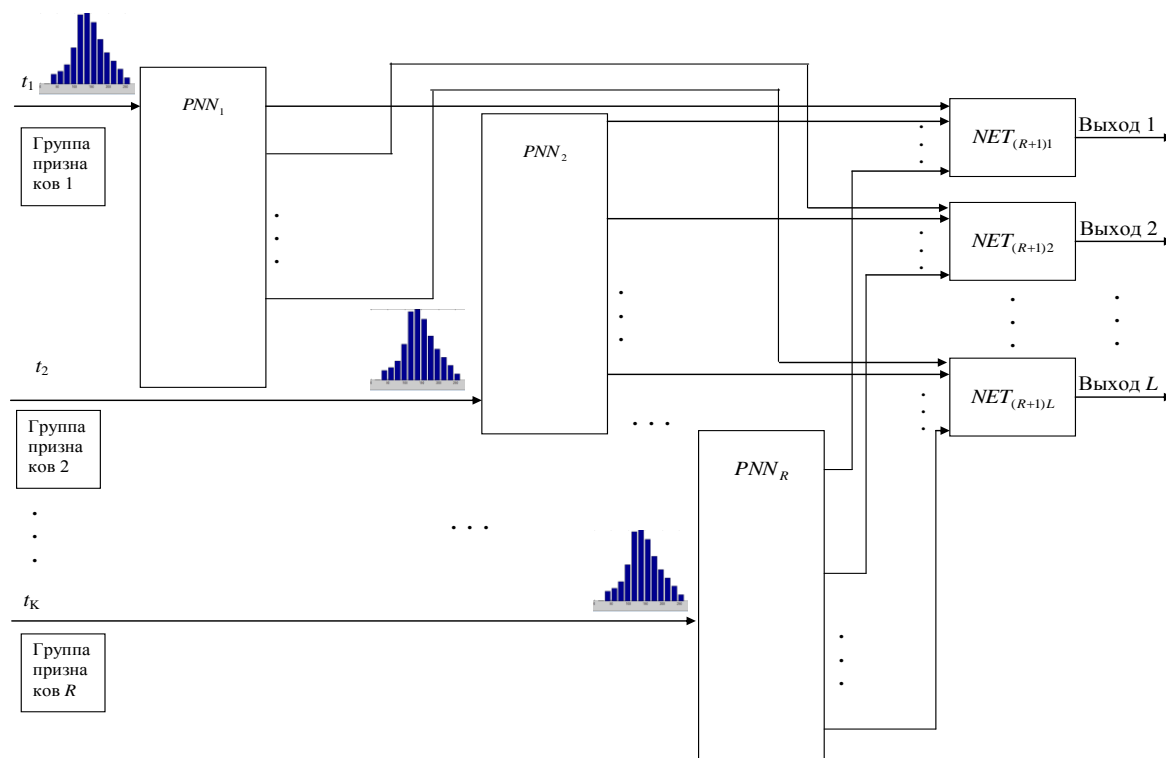


Рисунок 6 - Структурная схема вероятностной нейронной сети с макрослоями с группированием информативных признаков по макрослоям

Макрослои в данной структуре обучаются автономно, поэтому процессы получения модели ВНСМГ и формирования обучающей выборки совмещены. Для формирования обучающих выборок для обучения $(R+1)$ -го макрослоя необходимо, чтобы на входы нейронных сетей первых R слоев поступали соответствующие данные, организованные таким образом, чтобы выходы каждого макрослоя соответствовали определенным входам $(R+1)$ -го макрослоя. Для того, чтобы добиться такого соответствия для $(R+1)$ -го макрослоя, после обучения R слоев сформирована база данных с обучающими выборками для $(R+1)$ -го макрослоя.

Для проверки качества работы двухагентной системы классификации была разработана автоматизированная система оценки риска сердечнососудистых заболеваний, отличительной особенностью которой является то, что она позволяет работать с множеством моделей решающих модулей, предназначенных для определения риска различных ССЗ при разных факторах риска, варьировать релевантностью факторов риска, а также селектировать про-

цесс обучения по конкретному фактору, например, пол, возраст, курение и т.д. Это связано с тем, что как на кортеж факторов риска, так и на их релевантность нет единого мнения у специалистов.

Для проведения апробации двуагентного классификатора и ВНСМГ были выбраны пациенты, находящиеся на стационарном лечении. В исследование были включены больные всех возрастов с относительно стабильным состоянием здоровья и с установленным диагнозом основного заболевания на основании результатов стационарного обследования до периода проведения апробации технологии.

Интегральные показатели качества прогнозирования ИБС посредством разработанных и известных методов приведены на диаграммах, представленных рисунке 7.

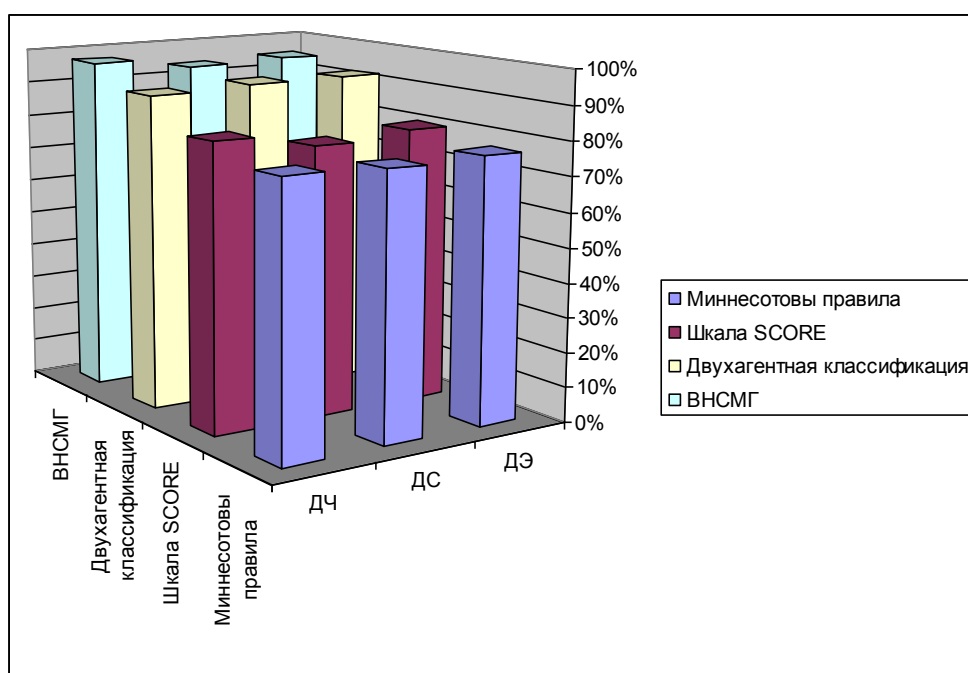


Рисунок 7 – Сравнительная характеристика показателей качества предложенных и известных методов принятия решений

Результаты исследования двуагентного классификатора и ВНСМГ на контрольных выборках при прогнозе рисков атеросклероза, ишемической болезни сердца и инфаркта миокарда по показателям диагностической чувствительности (ДЧ), диагностической специфичности (ДС) и диагностической эффективности (ДЭ) показали, что они выше на 10...16% аналогичных показателей шкалы SCORE и нечетких решающих правил на основе минисотовых кодов.

Анализ полученных результатов показал, что статистические испытания на контрольных выборках позволяют рекомендовать предлагаемые решающие правила и алгоритмы для практического использования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Выполнен системный анализ существующих методов интеллектуальной поддержки принятия решений для задач диагностики и прогнозирования состояния биологических объектов со сложными взаимодействиями системных ритмов.

2. Разработан метод формирования пространства информативных признаков для многоагентной системы классификации состояния сердечнососудистой системы, основанный на спектральном анализе медленных волн, включающий алгоритмы, предназначенные для вычисления спектра медленных волн кардиосигнала: морфологического анализа амплитудно модулированного фотоплетизмосигнала, морфологического анализа амплитудно модулированного электрокардиосигнала, морфологического анализа частотно модулированного электрокардиосигнала.

3 Разработаны структурно-функциональные схемы организации многоагентной системы классификации, включающие:

- гибридную вероятностную нейронную сеть с макрослоями, позволяющую оценить субъективные вероятности заданного входного вектора к выбранной совокупности классов;
- вероятностную нейронную сеть с макрослоями с группированием информативных признаков по макрослоям, позволяющую использовать в двуагентной системе классификации знания из базы данных;
- технологию формирования обучающих выборок и обучения вероятностной нейронной сети с макрослоями с группированием информативных признаков по макрослоям.

4. Экспериментальные исследования программного обеспечения и клинические испытания системы поддержки принятия диагностических решений, построенной на основе предложенной структурно-функциональной организации многоагентной системы, показали, что по показателям диагностической чувствительности и диагностической специфичности предложенные технические решения превосходят известные методы прогнозирования сердечнососудистых осложнений на 10...16%, что показывает целесообразность практического использования разработанных методов, моделей, алгоритмов и программного обеспечения.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Волков, И.И. Метод и алгоритм классификации сложных объектов на основе частотного и частотно-временного анализа медленных волн системных ритмов [Текст] / А.А. Маслак, И.И. Волков и [др.]// Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – №1(40). – Часть 1. – С.47-52.

2. Волков, И.И. Метод классификации сложных объектов на основе анализа структурных функций медленных волн [Текст] / И.И. Волков, С.Г. Емельянов и [др.]//Биомедицинская радиоэлектроника. - 2012. - №4. - С. 6-11.

3. Волков, И.И. Многофункциональные интеллектуальные мобильные системы для непрерывного контроля и управления функциональным состоянием органов и систем человека на основе анализа сложно модулированных системных ритмов [Текст] / И.И. Волков, С.А. Филист //Известия Южного федерального университета. Технические науки. - 2012. - Т. 134.- №9. - С. 14-18.

Статьи и материалы конференций

4. Волков, И.И. Метод классификации сложных систем на основе анализа сигналов со скрытыми периодичностями/ И.И. Волков, А.А. Мохаммед// Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы (Биомедсистемы - 2011): сб. матер. XXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2011. - Ч.1. - С.161-166.

5. Волков, И.И. Система нечеткого вывода Мамдани в среде MATLAB [Текст] / С.В. Харьков, И.И. Волков и [др.]//Компьютерные науки и технологии: сборник трудов Второй Международной научно-технической конференции. - Белгород: ООО «ГиК», 2011. - С. 382-387.

6. Волков, И.И. Классификация ишемических кардиоциклов с использованием базы множества нечетких правил на основании миннесотовых кодов [Текст] / И.И. Волков, Зо Зо Тун // Медицинские приборы и технологии: международный сборник научных статей. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. - Вып.4. - С. 152-156.

7. Волков, И.И. Структурно-функциональная организация нейронных сетей для классификации биоматериалов по результатам анализа динамической составляющей биоимпеданса [Текст] / И.И. Волков, Кабус Д.А. Кассим и [др.]// Медико-экологические информационные технологии-2011: сборник материалов XIV Междунар. Научн.-техн. конф. –Курск: ЮЗГУ, 2011. - С. 53-57.

8. Волков, И.И. Селекция медленных волн посредством дискретизации структурной функции квазипериодического сигнала [Текст] / И.И. Волков, С.А. Филист //Опто-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание – 2012: сб. матер. X Междунар. научн.-техн. конф. - Курск: ЮЗГУ, 2012. - С.293-295.

9. Volkov, I.I. Classification of living systems states on the basis of a hybrid approach to the analysis of data on systemic rhythms [Text] / Mohammed A.A. Awadh, I.I. Volkov [etc.]//International Journal Of Experimental Education. - 2012. - №3. - С.22-25.

10. Волков, И.И. Гибридная модель классификации живых объектов на основе анализа медленных волн системных ритмов [Текст] / И.И. Волков,

М.В. Томаков и [др.]//Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2012. - №4. - С. 47-48.

11. Волков, И.И. Метод принятия решений по классификации состояний живых систем на основе гибридного подхода к обработке данных о системных ритмах [Текст] / Р.А. Томакова, И.И. Волков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2012. - №7. - С.48-51.

12. Волков, И.И. Гибридные технологии для анализа сложно модулированных сигналов в среде MATHCAD 14/ И.И. Волков, М.А. Ефремов и [др.]// Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: доклады 10-й межд. научн.-техн. конф. Книга 2. – Владимир, 2012. - С.185-189.

13. Волков, И.И. Метод принятия решений на основе анализа медленных волн системных ритмов для классификации состояния сложных объектов [Текст] / И.И. Волков, О.В. Шаталова // Теория и практика системного анализа: сборник трудов Всерос. молодеж. конф. - Белгород: ИД «Белгород», 2012. - С. 430-433.

14. Волков, И.И. Гибридный алгоритм для выделения медленных волн из сигнала пульсовой волны [Текст] / И.И. Волков, М.А. Ефремов и [др.] // Медико-экологические информационные технологии-2012: сборник материалов XV Междунар. Научн.-техн. конф. Курск: ЮЗГУ, 2012. - С. 109-116.

15. Волков, И.И. Морфологические операторы в задачах выделения медленных волн кардиологических сигналов [Текст] / И.И. Волков / «БИОЛОГИЯ - НАУКА XXI ВЕКА»: материалы 17-й Международной Пушкинской школы-конференции молодых ученых. - Пушкино, 2013. - С. 583.

16. Волков, И.И. Гибридная нейронная сеть с макрослоями на основе вероятностных моделей нечеткого логического вывода [Текст] / И.И. Волков// Медико-экологические информационные технологии-2013: сборник материалов XVI Междунар. научн.-техн. Конф. - Курск: ЮЗГУ, 2013. - С. 23-30.

17. Волков, И.И. Выделение медленных волн посредством морфологических операторов при различных гипотезах о модуляции электрокардиосигнала [Текст] / И.И. Волков, Кабус Д.А. Кассим и [др.]// Медико-экологические информационные технологии-2013: сборник материалов XVI Междунар. научн.-техн. конф. - Курск: ЮЗГУ, 2013. - С. 23-30.

ИД №06430 от 10.12.01г.

Подписано в печать _____ 2013. Формат 60х84 1/16

Печатных листов 1,0. Тираж 100 экз. Заказ _____

Юго-Западный государственный университет.

Издательско-полиграфический центр ЮЗГУ.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94