

На правах рукописи



**Аль-Хайдри Валид Ахмед**

**НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ  
АВТОМАТИЧЕСКОМ РАСПОЗНАВАНИИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА**

05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ) на кафедре биомедицинских и электронных средств и технологий.

**Научный руководитель**      **Сушкова Людмила Тихоновна**  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный работник ВО РФ  
зав. кафедрой биомедицинских  
и электронных средств и технологий ВлГУ

**Официальные оппоненты:** **Герашенко Сергей Иванович**  
доктор технических наук, профессор  
зав. кафедрой «Медицинская кибернетика  
и информатика» Пензенского  
государственного университета, ученый  
секретарь Пензенского регионального  
отделения Академии медико-технических  
наук РФ

**Крамм Михаил Николаевич**  
кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»  
доцент кафедры основ радиотехники  
**Ведущая организация**      Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Тульский государственный  
университет», г. Тула

Защита состоится «24» ноября 2016 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

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

Автореферат разослан « 04 » октября 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук



Г.В. Овечкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Как известно, наиболее опасными и распространенными болезнями в настоящее время являются сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ). Поэтому кардиология, занимающаяся изучением и борьбой с ССЗ, занимает особое место в современной медицине. Для диагностики функционального состояния сердца используется электрокардиография, представляющая собой запись электрической активности сердца.

Достоверность результатов медицинской диагностики является важнейшим показателем медицинской деятельности. Известно, что процесс кардиодиагностики зачастую сопряжен с ошибками. Анализ литературных источников показывает, что примерно 38% электрофизиологов принимают артефакт кардиосигнала за желудочковую тахикардию, а 55% врачебных заключений Холтеровского суточного мониторирования содержат ошибки методического характера. До 43% ложных тревог от прикроватных мониторов ЭКГ вызваны неверной интерпретацией артефактов сигнала встроенным программным обеспечением. Ежегодно регистрируется больше 20 миллионов электрокардиограмм (ЭКГ) во всем мире. Качество регистрации ЭКГ зависит от многих факторов, в том числе опыта персонала и качества оборудования. В результате 5% регистрируемых в мире ЭКГ (что составляет порядка 1 миллиона) имеет те или иные проблемы, связанные с их качеством, а 1% имеют недопустимое качество. Ошибки электрокардиодиагностики недопустимо часто приводят к тому, что пациенту назначается неправильное лечение, вплоть до назначения операции по имплантации электрокардиостимулятора.

С учетом изложенного необходимость контроля и повышения качества электрокардиографического сигнала за счет обнаружения в нем искажений, приводящих к снижению достоверности диагностической информации и, как следствие, к ложным заключениям, является актуальной проблемой функциональной диагностики работы сердца.

Анализ литературы по методам обнаружения помех и искажений в ЭКГ показывает, что в настоящее время широко используются такие методы, как анализ независимых компонент (АНК), вейвлет-преобразование (ВП), эмпирическая модовая декомпозиция (ЭМД) и искусственные нейронные сети (ИНС). Большой вклад в развитие методов обработки и контроля качества ЭКГ внесли А.П. Немирко, А.Н. Калиниченко, К.В. Подмастерьев, G.D. Clifford, R.G. Mark, L.Y. Di Marco, A. Murray, G.V. Moody, P. Augustyniak и др.

В связи с этим **целью данной работы** является повышение диагностической достоверности электрокардиографических исследований на основе использования нейросетевой системы обнаружения искажений.

**Объектом исследования** является система обнаружения искажений при автоматическом распознавании электрокардиосигнала.

**Предметом исследования** является изучение возможности и целесообразности применения искусственной нейронной сети (ИНС) для обнаружения типовых искажений в электрокардиографическом сигнале.

**Методы исследования.** В работе использованы методы цифровой обработки сигналов, математической статистики, распознавания образов и машинного обучения. Экспериментальные исследования выполнены на общедоступных и апробированных множествах сигналов из архива PhysioNet.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ литературы по существующим алгоритмам, подходам и методам обнаружения помех и искажений в электрокардиосигнале.
2. Исследовать современные методы и подходы обнаружения искажений в ЭКГ-сигнале.
3. Выбрать и обосновать исходную структуру нейросетевой системы для обнаружения типовых искажений в ЭКГ.
4. Сформировать необходимый объем обучающих и тестовых данных записей электрокардиосигналов с допустимым и недопустимым качеством с точки зрения пригодности для функциональной диагностики ССС.
5. Исследовать влияние функций активации и количества скрытых слоев на эффективность работы нейросетевой системы обнаружения искажений в электрокардиосигнале.
6. Разработать алгоритм обоснования оптимального количества нейронов скрытого слоя ИНС.
7. Исследовать эффективность работы выбранной структуры ИНС для обнаружения типовых искажений в ЭКГ.

**Научная новизна работы.** В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. **Алгоритм** формирования обучающей базы данных, построенный на основе многоуровневой кластеризации с использованием метода K-средних, позволяющий исключить дублирование обучающих примеров и преобладание одного класса над другими.
2. **Результаты** исследования влияния функции активации и количества скрытых слоев ИНС на эффективность ее функционирования, полученные на основе использования совокупности типовых функций активации, применяемых в задачах анализа ЭКГ-сигналов, которые позволяют обосновать структуру построения перцептронной ИНС и обеспечить эффективность ее обучения, определяемой по общепризнанным критериям чувствительности, специфичности и точности.
3. **Алгоритм** обоснования количества нейронов скрытого слоя ИНС, отличающийся использованием ROC-анализа для оценки эффективности работы ИНС в зависимости от количества нейронов скрытого слоя, по критерию AUC, обеспечивающему такое сочетание значений чувствительности и специфичности, при котором достоверность обнаружения искажений в ЭКГ-сигнале максимальна.
4. **Структура** нейросетевой системы обнаружения типовых искажений ЭКГ, отличающаяся от аналога по критериям специфичности и точности, которая

характеризует диагностическую эффективность обнаружения искажений, на 7% и 8% соответственно.

**Практическая значимость.** Разработанные алгоритмы и программы являются основой нейросетевой системы обнаружения искажений ЭКГ, применение которой позволяет решать следующие задачи практической медицины:

- Сократить субъективные врачебные ошибки, связанные с принятием некоторых артефактов за аритмию и наоборот;
- Уменьшить количество ложных тревог автоматизированных систем суточного мониторинга при условии ее адаптации для работы в режиме реального времени.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций,** сформулированных в диссертации, подтверждается:

- результатами тестирования на основе баз данных записей ЭКГ из архива PhysioNet, экспериментальных исследований и апробации разработанных специализированных нейросетевых блоков анализа ЭКГ на предмет наличия искажений и артефактов;
- оценкой эффективности функционирования разработанной нейросетевой системы обнаружения искажений в ЭКГ на основе использования общепризнанного инструмента ROC-анализа и критериев чувствительности, специфичности и точности.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. **Алгоритм** формирования обучающей базы данных, построенный на основе многоуровневой кластеризации с использованием метода K-средних, позволяющий исключить дублирование обучающих примеров и преобладание одного класса над другим.
2. **Алгоритм** обоснования количества нейронов скрытого слоя ИНС, отличающийся использованием ROC-анализа для оценки эффективности работы ИНС в зависимости от количества нейронов скрытого слоя, по критерию AUC, обеспечивающему такое сочетание значений чувствительности и специфичности, при котором достоверность обнаружения искажений в ЭКГ-сигнале максимальна.
3. **Структура** нейросетевой системы обнаружения типовых искажений ЭКГ, отличающаяся от аналога по критериям специфичности и точности, характеризующей диагностическую эффективность обнаружения искажений на 7% и 8% соответственно.

**Результаты внедрения работы**

Результаты научной работы внедрены в учебный процесс кафедры биомедицинских и электронных средств и технологий ВлГУ по подготовке студентов по направлению «Биотехнические системы и технологии» (бакалавриат и магистратура), а также в научно-исследовательскую деятельность ООО НПЦ «Биомединженерия». Акты внедрения прилагаются.

**Личный вклад автора** во всех работах, выполненных в соавторстве, включает постановку задачи, разработку основных методов и средств для проведения исследований, обработку и анализ результатов. Автор является непосредственным исполнителем теоретических и экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

XI международной научной конференции «Физик и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ), (г. Владимир, г. Суздаль 2014г);

Всероссийской молодежной научной конференции «Современные проблемы биомедицинской инженерии», (г. Саратов 2015);

XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов "Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы" Биомедсистемы – 2015 (г. Рязань 2015);

XII Международной научной конференции «Физика и Радиоэлектроника в Медицине и Экологии» ФРЭМЭ'2016 (г. Владимир, г. Суздаль 2016 г).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 13 работ, в том числе 2 на всероссийских конференциях, 4 на международных конференциях, 2 в сборнике трудов, 5 статей в профильных журналах, рекомендованных ВАК РФ, в том числе одна в базе данных Scopus.

#### **Структура и объём диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка, включающего 149 наименований, списка сокращений и 1 приложение. Объём диссертации составляет 152 страницы машинописного текста, 55 рисунков и 21 таблица.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении.** Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи работы, перечислены предмет, объект, область и методы исследования, показана научная новизна и достоверность основных научных результатов работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, показана практическая значимость работы и личный вклад автора, приведены сведения об апробации работы, реализации и внедрении ее результатов, а также сведения о публикациях по тематике работы.

**В первой главе.** Рассмотрены особенности съема, обработки и анализа электрокардиографического сигнала. Представлен анализ помех и шумов, приводящих к искажению ЭКГ, выделены основные виды искажений ЭКГ. На основе обзора литературы проведен анализ современных методов и алгоритмов обнаружения и устранения помех в электрокардиографических сигналах. Показана перспективность применения ИНС в задачах ЭКГ-анализа на предмет наличия искажений и артефактов в нем. Материалы данной главы позволили сформулировать следующие основные выводы:

- задача повышения качества ЭКГ-сигнала, как основы функциональной диагностики работы ССС, является актуальной;

- помехи и шумы, искажающие электрокардиосигнал разнообразны по своей природе, причинам возникновения, амплитудным и спектральным характеристикам;
- результаты анализа методов выявления с помехами ЭКГ-сигнала показали, что наиболее перспективными являются вейвлет-преобразование, эмпирическая модовая декомпозиция и искусственные нейронные сети;
- искусственные нейронные сети являются многообещающим методом обработки и классификации ЭКГ, способствующим более эффективному решению задачи обнаружения помех на ЭКС.

**Во второй главе** рассматриваются теоретические предпосылки решения задачи обнаружения и устранения помех в биосигнале. Изложены основы современных методов выявления артефактов и помех в ЭКС, а именно, вейвлет-преобразования (ВП), анализа независимых компонент (АНК), методы эмпирической модовой декомпозиции (ЭМД) и искусственных нейронных сетей (ИНС). Проведен сопоставительный анализ перечисленных методов. Показано, что для решения задач анализа ЭКГ-сигнала, относящегося к нестационарным сигналам целесообразно проведение исследований вейвлет-преобразования, достоинством которого является возможность получения спектра с временной локализацией и искусственных нейронных сетей (ИНС), которые в настоящее время являются одним из перспективных методов распознавания и устранения помех в биосигнале и способных обучаться для решения сложных задач классификации, в том числе задача классификации полезного сигнала и помехи.

В данной главе рассмотрены теоретические основы ИНС, описаны их различные структуры и методы обучения и критерия оценки эффективности их работы, а именно чувствительность (ошибка первого рода), специфичность (ошибки второго рода) и точность, характеризующая диагностическую эффективность метода. Данные критерии определяются по формулам, приведенным в таблице 1.

Таблица 1- Формулы критериев оценки эффективности ИНС

Чувствительность, Se	Специфичность, Sp	Точность, Ac
$Se = \frac{ДП}{ДП + ЛО}$	$Sp = \frac{ДО}{ДО + ЛП}$	$Ac = \frac{ДП + ДО}{ДП + ДО + ЛП + ЛО}$

Здесь: ДП-достоверноположительный результат, ДО-достоверноотрицательный результат, ЛП-ложноположительный результат, ЛО –ложноотрицательный результат.

В выводах по второй главе сформулированы задачи для дальнейшего исследования.

Анализ рассмотренных методов позволил прийти к выводу о том, что ИНС является подходящим инструментом для решения проблемы обнаружения искажений в ЭКГ благодаря их способности обучаться. Тем самым можно добиться хороших результатов за счет гибких алгоритмов классификации полезного сигнала и помехи.

**Третья глава** посвящена исследованию нейросетевого подхода для решения задачи распознавания искажений в электрокардиосигнале. Сформированы обучающая, тестовая и валидационная базы данных электрокардиографических сигналов, необходимых для разработки системы обнаружения артефактов и искажений в ЭКС. В качестве баз данных были использованы MIT-BIH Arrhythmia Database и St Petersburg INCART 12 lead arrhythmia, Challenge 2011 Training Set A/B из архива PhysioBank, а также авторская БД, сформированная в ходе проведения данной диссертационной работы. Поскольку задачей данной диссертационной работы является разработка интеллектуальной системы обнаружения искажений в электрокардиографическом сигнале, обучающие и тестовые БД должны включать в себя данные с «допустимым» качеством и «недопустимым» (имеющие искажения) качеством.

Под ЭКГ с допустимым качеством понимается ЭКГ, в которой форма QRS-комплекса не искажена. Сюда относятся разные ЭКГ с нормальным ритмом. Для того, чтобы система была способна различать артефакты или искажения, которые иногда ложно распознаются как аритмия или противоположная ситуация, когда аритмия принимается за артефакт, необходимо в класс ЭКГ «с допустимым качеством» включить ЭКГ с патологией (наиболее распространённые типы аритмии, которые определяются по форме кардиоцикла). На рисунке 1 приведена структура обучающей и тестовой баз данных.

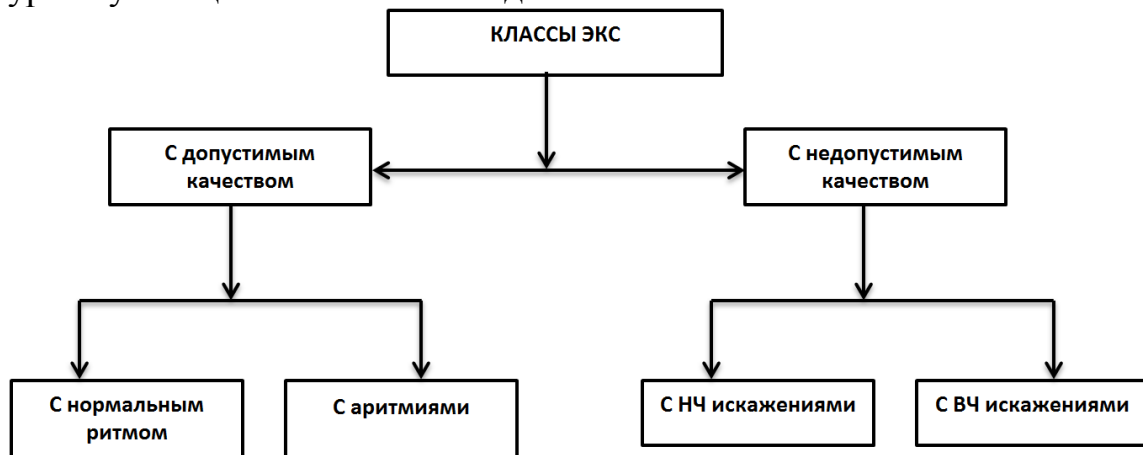


Рисунок 1- Структура обучающей и тестовой баз данных

Одним из требований к БД является условие репрезентативности, которое означает соответствие характеристик выборки характеристикам популяции или генеральной совокупности в целом. Она определяется достаточностью числа обучающих примеров, их равномерностью и разнообразием. Равномерность означает, что примеры различных классов должны быть представлены в обучающей выборке примерно в одинаковых пропорциях.

Исходя из этого, для обеспечения равномерности обучающих примеров был разработан алгоритм формирования и анализа обучающей выборки, представленный на рисунке 2. Суть алгоритма состоит в проведении кластерного анализа каждого класса для исключения дублирования обучающих примеров. Для этого задается начальное количество кластеров, проверяется тот кластер, в который попало максимальное количество примеров. При наличии явных



различий между кардиоциклами (КЦ) данного кластера, количество заданных центров увеличивается и процедура повторяется до достижения требуемого результата, соответствующего достижению равномерности БД.

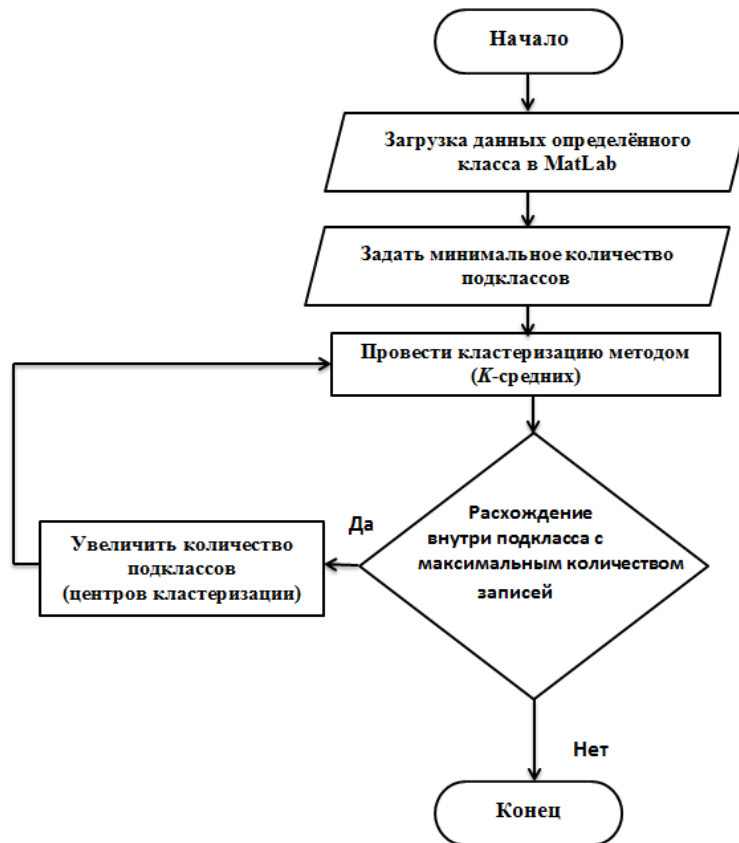


Рисунок 2- Алгоритм формирования и анализа обучающей выборки

Для функционирования и обучения ИНС на вход подается сигнал определённой формы - образ электрокардиосигнала. Суть алгоритма формирования образов для базы данных (БД) заключается в нахождении R-зубцов и проведении на их основе сегментации электрокардиограммы (ЭКГ).

Исходя из параметров нормальной ЭКГ были определены длительности частей ЭКС слева и справа от R зубца, а именно: 0.25с и 0.4с соответственно. Таким образом, было определено временное окно для анализа ЭКС ( $T=0,65с$ ) и проведена процедура сегментация ЭКГ с указанными параметрами (рисунок 3). По оси ординат отложена нормированная амплитуда ЭКС.

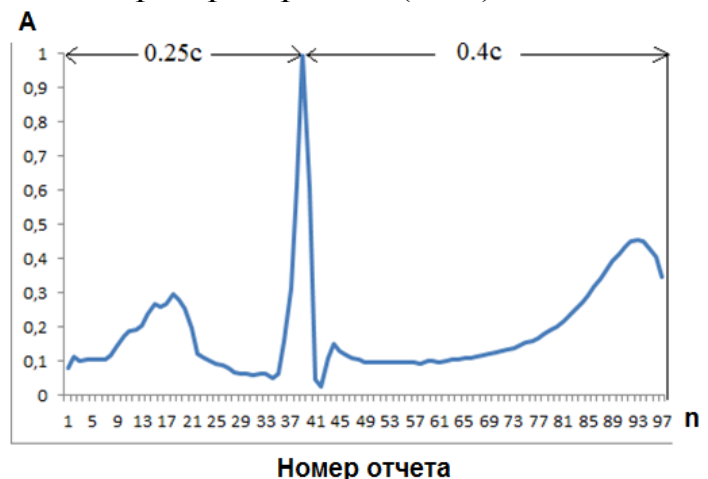


Рисунок 3 – Образ ЭКС длительностью 0.65 с

Далее, полученные участки ЭКГ (PQRST-комплексы) нормируются, поскольку имеют разные амплитуды. Анализ существующих современных регистраторов ЭКГ показал, что для совместимости разрабатываемого

нейросетевого блока с большинством регистраторов ЭКГ целесообразно выбрать частоту дискретизации  $F_s$  входных образов 150 Гц. В случае сигналов с большей или меньшей частотой дискретизации предусмотрена процедура передискретизации до выбранной частоты  $F_s$ . Это позволяет свести данные с различных источников в единую базу с одинаковыми параметрами длительности и частоты дискретизации. Обучающая и тестовая базы данных имеют одинаковые объемы и составляют 440 ЭКС для каждой из них. В каждой базе данных 220 ЭКС без искажений и 220 ЭКС имеющие искажения.

Далее в данной главе обоснован выбор количества скрытых слоев и функций активации путем проведения экспериментальных исследований. Было исследовано влияние видов функций активации на результат обучения многослойного персептрона (МП). Для этого были выбраны типовые и часто применяемые для биомедицинских задач функции активации, а именно линейная функция, сигмоидальная и гиперболический тангенс. Исследования проводились при разных комбинациях функций активации в случае МП с одним скрытым слоем и с двумя скрытыми слоями.

На рисунке 4 показаны результаты исследования влияния функций активации на эффективность работы МП с двумя скрытыми слоями, где латинскими буквами обозначены: s- сигмоида, t- тангенс, r-линейная функция.

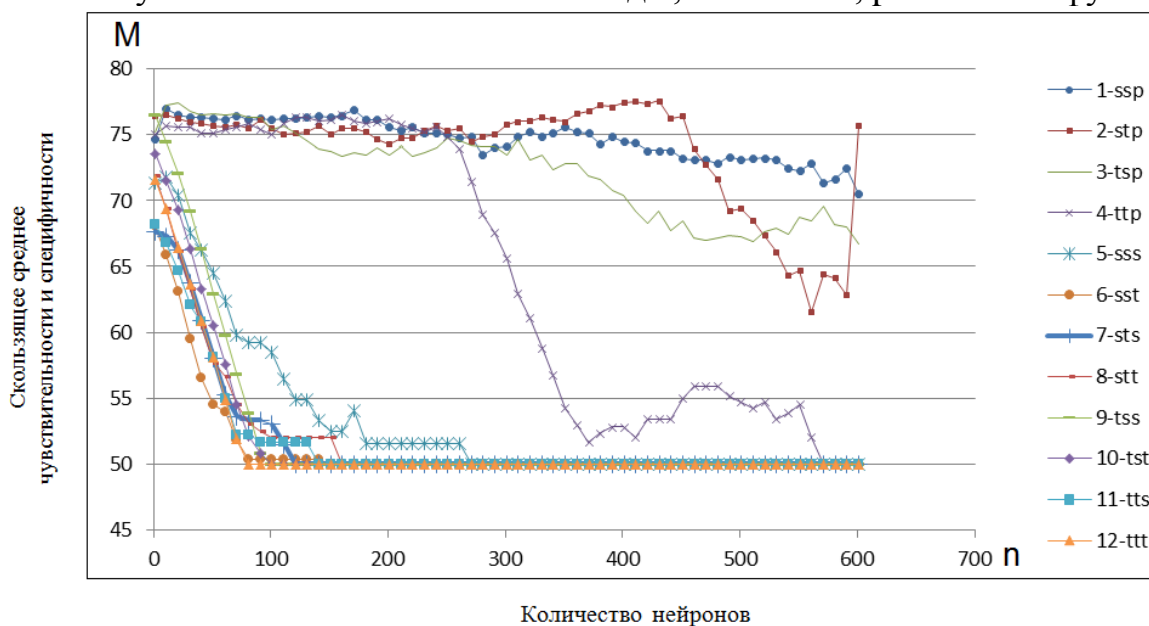


Рисунок 4 - Результаты обучения МП с двумя скрытыми слоями с разными функциями активации

Анализ результатов обучения показал, что наиболее стабильной является сеть с сигмоидальными функциями и линейным выходом (ssp). Исходя из этого, очевидно предпочтительным вариантом применения МП для решения поставленной задачи обнаружения артефактов в электрокардиосигнале является НС с линейным выходом и сигмоидальными функциями в двух скрытых слоях. Далее для обоснования выбора количества скрытых слоев МП исследовано влияние их количества на эффективность функционирования МП. График, приведенный на рисунке 5, показывает, что результаты обучения МП с двумя

скрытыми слоям превосходят результаты обучения сети с одним скрытым слоем. Следовательно, далее в работе будет применяться МП с двумя скрытыми слоями.

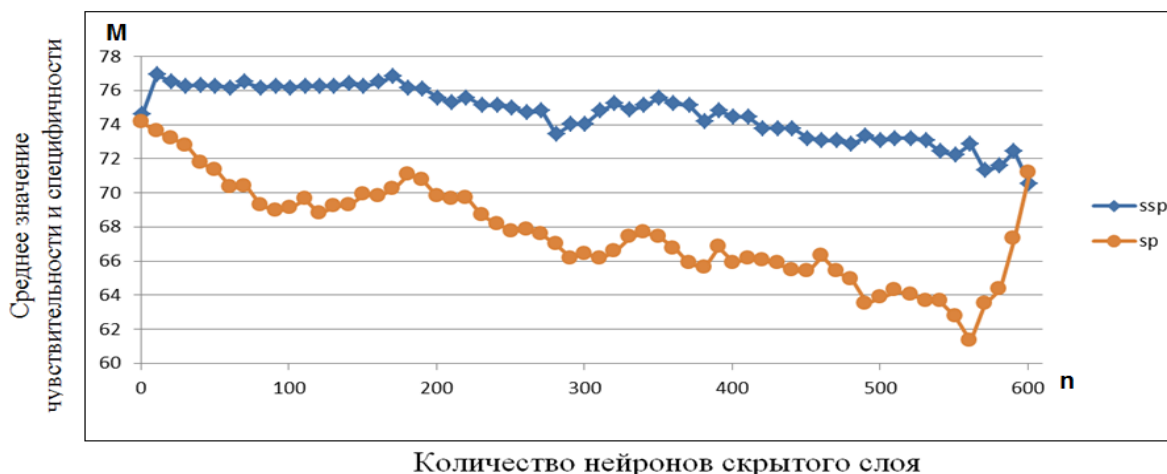


Рисунок 5 - Сопоставление наиболее эффективных комбинаций функций активации для МП с одним (sp) и двумя скрытыми слоями (ssp).

Выше был обоснован выбор нейронной сети с двумя скрытыми слоями. В этом случае возникает вопрос о соотношении количества нейронов между первым и вторым скрытыми слоями. Для этого были исследованы три возможные варианта соотношения количества нейронов в скрытых слоях:

- Количество нейронов в первом скрытом слое равно количеству нейронов во втором скрытом слое ( $n_1=n_2$ );
- Количество нейронов в первом скрытом слое в два раза меньше количества нейронов во втором слое ( $n_1=2*n_2$ );
- Количество нейронов в первом скрытом слое в два раза больше количества нейронов второго скрытого слоя ( $n_1=n_2/2$ ), где  $n_1$  - количество нейронов в первом скрытом слое, а  $n_2$  - количество нейронов во втором скрытом слое.

Первый вариант структуры МП можно условно назвать равной сетью, а второй и третий, как известно из теории ИНС, являются расширяющейся и сужающейся сетями, соответственно. На рисунке 6 представлен результат данного исследования.

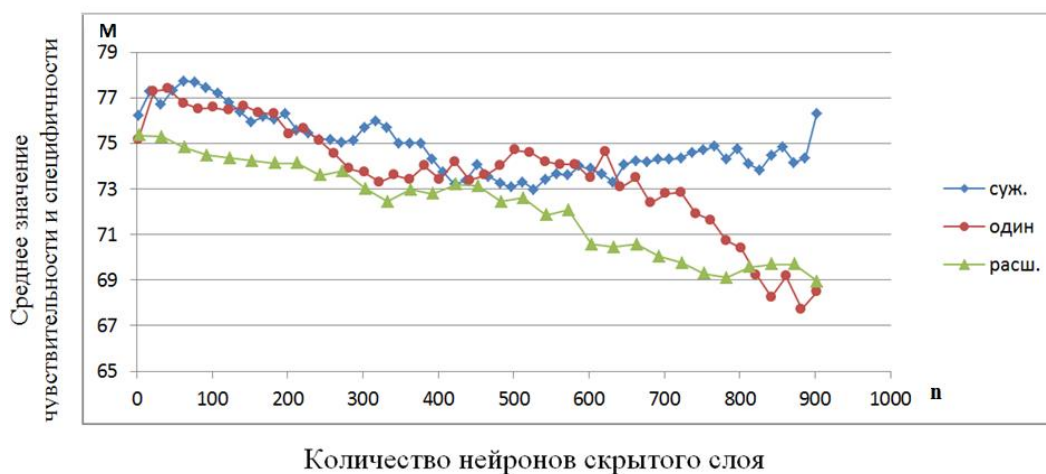


Рисунок 6- Сравнение различных вариантов соотношения количества нейронов в скрытых слоях

Анализ графиков (рисунок 6) показывает, что более эффективной с точки зрения обнаружения искажений является ИС сужающейся структуры, т.е. сеть, количество нейронов которой в первом скрытом слое в два раза больше количества нейронов во втором скрытом слое.

Анализ литературы показывает, что вопрос обоснования выбора числа нейронов скрытого слоя не имеет однозначного решения по причине отсутствия устоявшейся методики. В связи с этим, в данной работе предложена процедура и соответствующий алгоритм, основанный на использовании ROC-анализа, суть которого составляют критерии оценки эффективности работы ИНС: чувствительность и специфичность.

Исходя из этого для обоснования выбора числа нейронов скрытого слоя ИНС требуется провести исследование показателей чувствительности и специфичности каждой ИНС для порогов от 0 до 1 с шагом 0,1. На основе полученных значений чувствительности и специфичности строятся ROC-кривые для каждой ИНС. Следующий шаг заключается в расчете площадей под ROC-кривыми (AUC). Сравнение полученных значений AUC для всех ИНС позволяет выбрать максимальное значение AUC, соответствующее более эффективной ИНС. Представленный на рисунке 7 разработанный алгоритм обоснования количества нейронов скрытого слоя для исследуемых структур ИНС позволяет выбрать такое сочетание значений чувствительности и специфичности, при котором эффективность обнаружения искажений ЭКС максимальна. Этот подход использован в работе при проведении экспериментальных исследований.

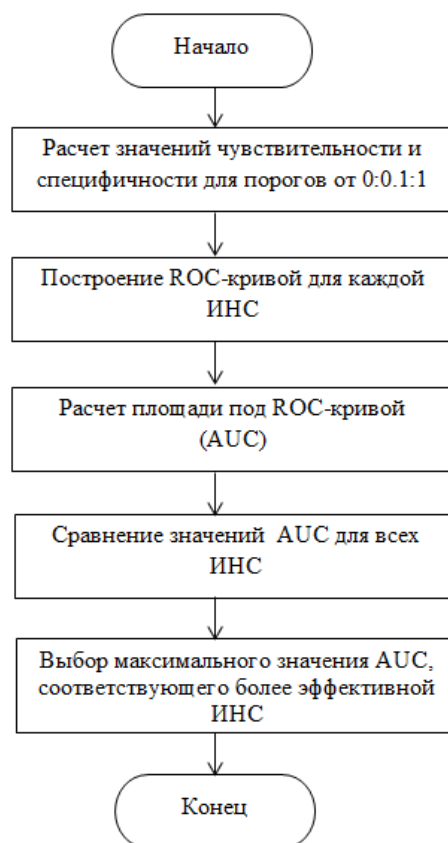


Рисунок 7 - Алгоритм выбора оптимальной нейронной сети согласно разработанному алгоритму

В результате проведенных исследований разработана структура ИНС для решения поставленной задачи и определены ее параметры (рисунок 8). Она состоит из входного, двух скрытых и выходного слоев с сигмоидальной функцией в скрытых слоях и линейным выходом. Количество нейронов в первом скрытом слое в два раза больше количества нейронов во втором скрытом слое.

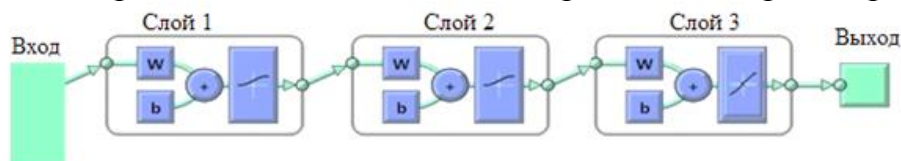


Рисунок 8 – Разработанная структура нейросетевой системы распознавания искажений в ЭКС

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований искусственных нейронных сетей для обнаружения искажений в электрокардосигнале. Представлены результаты исследования двух вариантов ИНС, а именно: комплексное применение ИНС и ДВП, где в качестве входной информации используются детализирующие вейвлет-коэффициенты, и вариант применения ИНС без ДВП, где входная информация представляет собой исходные кардиоциклы.

Результаты исследования возможности выявления искажений в электрокардосигнале на основе комплексного применения дискретного вейвлет-преобразования и нейросетевого анализа приведены на рисунке 9. На графике видно, что максимальное значение AUC (соответствует **0.91**) получено для МП с количеством нейронов в первом скрытом слое, равным 47. Согласно выбранной сужающейся структуре ИНС количество нейронов во втором скрытом слое составляет 24 нейрона. При этом, значения чувствительности, специфичности и точности для этого МП составили **86.4%**, **84.7%** и **86.5%** соответственно.

Результаты исследования ИНС, в случае использования в качестве входной информации для обучения нейросети исходных кардиоциклов (КЦ), приведены на рисунке 10.

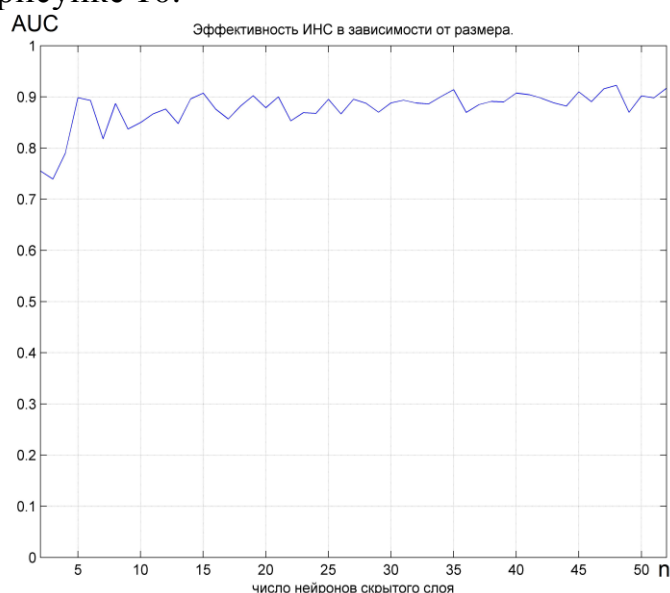


Рисунок 9 - Результаты исследования влияния количества нейронов скрытого слоя на эффективность работы МП: входная информация - детализирующие вейвлет-коэффициенты

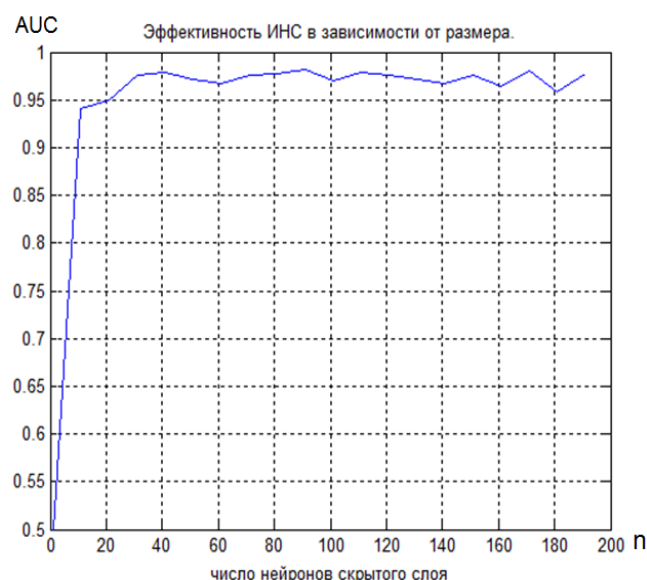


Рисунок 10 - Результаты исследования влияния количества нейронов скрытого слоя на эффективность работы МП: входная информация - исходные КЦ

Максимальное значение AUC (соответствует **0.97**) было получено для МП (входная информация - КЦ) с количеством нейронов первого скрытого слоя, равным 111 нейронам. В этом случае количество нейронов второго скрытого слоя для сужающейся структуры составляет 56 нейронов. В таблице 2 приведено количественное сравнение результатов ИНС с применением ДВП и без его применения.

Таблица 2- Количественное сравнение результатов ИНС с применением ДВП и без его применения

Критерий Подход	Чувствительность Se, %	Специфичность Sp, %	Точность Ac, %	AUC
ИНС с ДВП	86,36	84,75	86,56	0.91
ИНС без ДВП	97,72	90	93,86	0.97
<b>Разница</b>	<b>11,3</b>	<b>5,2</b>	<b>7,3</b>	<b>0.06</b>

Проведенный сравнительный анализ результатов двух указанных подходов показал преимущество варианта использования исходного кардиоцикла в качестве входной информации при обучении ИНС. Таким образом, в дальнейшем была использована структура ИНС, обучение которой производилось на исходных кардиоциклах.

Далее был проведен сопоставительный анализ полученных в диссертационной работе результатов с аналогом, описанным в работе, посвященной оценке качества ЭКГ с точки зрения пригодности ее для дальнейшего анализа, представленной на конкурс Computing in Cardiology Challenge 2011, который проводится ежегодно известным сайтом PhysioNet, и занявшей первое место. Полученные результаты показывают, что эффективность оценки качества ЭКГ выше, чем результаты аналога на величину порядка 7% по критерию специфичности и порядка 8% по точности, которая характеризует диагностическую эффективность обнаружения искажений.

На основе полученных результатов разработана структурная схема системы распознавания искажений (СОИ) в ЭКГ, представленная на рисунке 11.



Рисунок 11- Система распознавания искажений в ЭКГ

Работа СОИ начинается с цифровой регистрации ЭКГ. После чего, ЭКГ в цифровом виде поступает на ЭВМ, обеспечивающей выполнение процедур цифровой фильтрации, детектирования R-зубцов, сегментации ЭКС, анализа и классификации КЦ, а также принятия и исполнения решений. Цифровой ЭКГ-сигнал фильтруется до частотного диапазона ЭКГ. Далее сигнал подается на блок детектора R-зубцов, обеспечивающий выделение позиций экстремумов R-зубцов. На основе полученной информации о местоположении R-зубцов в следующем блоке осуществляется сегментация ЭКС на отдельные КЦ, а также выполняется, в случае необходимости, процедура передискретизации до выбранной в данной работе частоты  $F_s = 150$  Гц. Полученные КЦ подвергаются анализу на предмет наличия в них искажений в блоке, представляющим собой разработанный в

настоящей работе нейросетевой классификатор. В зависимости от результата классификации принимается решение о качестве КЦ и допустимости или недопустимости их для последующей обработки, анализа и интерпретации. Так, в случае допустимого качества, КЦ передается для дальнейшей обработки и интерпретации. В случае недопустимого качества КЦ, блок принятия и исполнения решений отмечает КЦ как искаженный. Данная система может производить оценку ЭКГ и выдавать решение о ее качестве.

Одним из результатов, приведенных в данной главе, является прикладное программное обеспечение оценки качества ЭКГ, позволяющее в удобном виде, получить как интегральную оценку качества ЭКГ, так и детальную оценку по каждому каналу с возможностью просмотра искаженные участки ЭКГ.

С целью развития разработанной системы обнаружения искажений ЭКГ, в данной главе также проведено исследование возможности применения одного из самых современных методов устранения помех в сигналах, а именно метода эмпирической модовой декомпозиции (ЭМД). Использование ЭМД для подавления помех из ЭКГ основано на принципе удаления отдельных мод частотных составляющих электрокардиосигнала, которые соответствуют той или иной помехе. На рисунке 12 показаны результаты применения ЭМД для распознавания и устранения дрейфа изолинии (рис.12 а) и ВЧ помехи (рис.12б). Данный метод показал свою способность в устранении помех, накладываемых на ЭКГ.

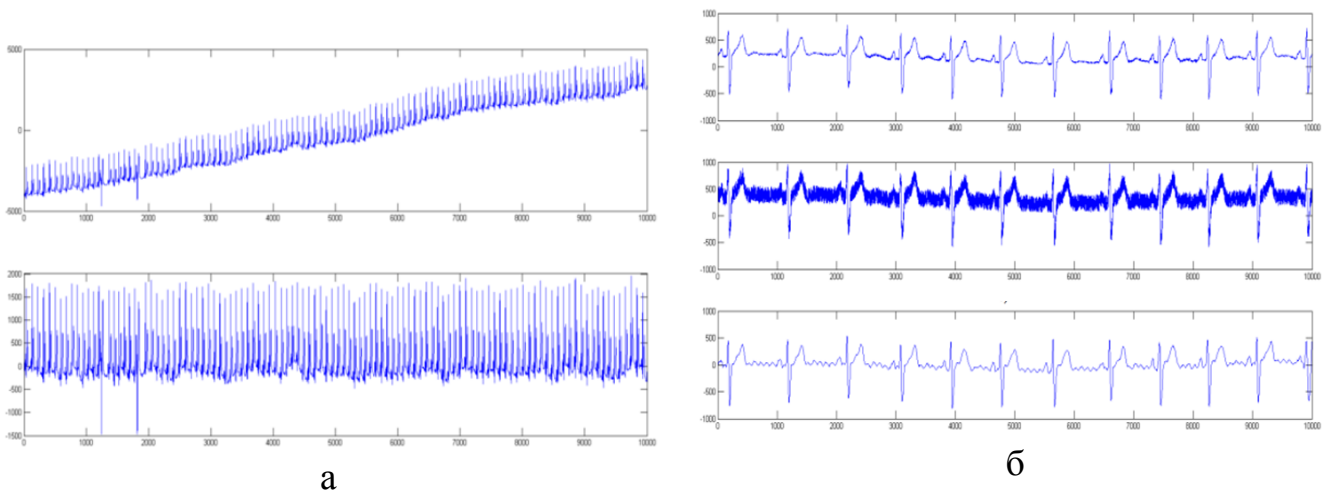


Рисунок 12 - Результаты применения ЭМД для распознавания и устранения: а) дрейфа изолинии, б) ВЧ помехи

Исследование ЭМД показало возможность его эффективного применения для устранения низкочастотных и высокочастотных помех ЭКГ, что способствует не только обнаружения искажений, но и возможности их устранения.

В конце главы изложены возможные области применения разработанной системы распознавания искажений ЭКГ, а также пути совершенствования. Главными направлением развития данной системы являются адаптация ее для работы в режиме реального времени и работы в мобильных устройствах с учетом их вычислительных возможностей.

**В заключении сформулированы основные результаты работы:**

1. На основе проведенного анализа литературы по существующим подходам, методам и алгоритмам повышения качества диагностической достоверности электрокардиографической информации были выбраны современные методы обнаружения артефактов и искажений в ЭКГ-сигнале, а именно вейвлет-преобразование, эмпирическая модовая декомпозиция и искусственные нейронные сети (ИНС).
2. Для обучения и тестирования ИНС сформированы обучающие, тестовые и валидационные базы данных ЭКГ-сигналов и разработан алгоритм формирования обучающей базы данных, построенный на основе многоуровневой кластеризации с использованием метода K-средних, позволяющий обеспечить равномерное распределение обучающих примеров, а также исключить их дублирование и преобладание одного класса над другим.
3. Для обоснования выбора структуры и параметров ИНС, способствующих более эффективному обнаружению типовых искажений в ЭКГ-сигнале, в диссертационной работе проведены исследования эффективности функционирования ИНС в зависимости от: выбора типовых функций активации, а именно, сигмоидальной, гиперболического тангенса, линейной и их комбинаций; количества скрытых слоев и соотношения нейронов в первом и втором скрытых слоях, определяющих типы структуры ИНС (сужающаяся, равная или расширяющаяся). Результаты проведенных исследований показали что наиболее эффективной структурой для обнаружения типовых искажений в ЭКГ является нейросетевая система типа многослойный персептрон с сигмоидальными функциями активации в скрытых слоях и линейным выходом, имеющая два скрытых слоя с числом нейронов в первом скрытом слое в два раза большим числа нейронов во втором.
4. На основе ROC-анализа разработана процедура и соответствующий алгоритм нахождения оптимального количества нейронов скрытого слоя ИНС, отличающиеся тем, что используется критерий AUC (площадь под ROC-кривой), величина которого соответствует такому сочетанию значений чувствительности и специфичности, при которых достоверность обнаружения искажений в ЭКГ-сигнале максимальна.
5. С целью поиска более эффективного варианта построения системы обнаружения искажений в ЭКГ-сигнале проведены исследования и количественный анализ работы ИНС в двух вариантах, а именно: комплексное применение ИНС и ДВП, где в качестве входной информации ИНС выступают детализирующие вейвлет-коэффициенты, и вариант применения ИНС без ДВП, где входная информация ИНС представляет собой исходные кардиоциклы. Проведенный сравнительный анализ результатов двух указанных подходов показал преимущество варианта использования исходного кардиоцикла в качестве входной информации при обучении ИНС с повышением



значений чувствительности, специфичности и точности на **11,3%**, **5,2%**, **7,3%** соответственно.

6. Проведенные экспериментальные исследования разработанной нейросетевой системы обнаружения искажений в ЭКС показали следующие результаты: чувствительность (**97.72%**), специфичность (**90%**) и точность (**94%**). При сопоставительном анализе полученных результатов с аналогом, представляющим собой работу, занявшую первое место в конкурсе Computing in Cardiology Challenge 2011 на базе известного сайта PhysioNet, показал повышение эффективности обнаружения искажений ЭКГ по критериям специфичности и точности на величины порядка **7%** и **8%** соответственно.
7. Исследование метода эмпирической модовой декомпозиции показало возможность его применения в системе обнаружения типовых искажений ЭКС для устранения высокочастотных и низкочастотных помех, что является актуальным для развития разработанной системы.
8. Полученные результаты позволили разработать прикладное программное обеспечение, позволяющее, в удобном виде, получить как интегральную оценку качества ЭКГ, так и детальную оценку по каждому каналу с возможностью просмотра искаженных участков ЭКГ.
9. Определены возможные области применения разработанной системы обнаружения искажений ЭКГ-сигнала, ее возможности и пути совершенствования. Главными направлениями развития данной системы являются ее адаптация к работе в режиме реального времени и работы в мобильных устройствах с учетом их вычислительных возможностей.

### Публикации по теме диссертации

#### Статьи в журналах из перечня ВАК

1. **Аль-Хайдри В.А.** Возможности комплексирования методов дискретного вейвлет-преобразования и статистического анализа для распознавания артефактов в электрокардиосигнале / Аль-Хайдри В.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2015, №4 С.52-60 ISSN 2221-2574.
2. **Аль-Хайдри В.А.** Исследование влияния выбора функций активации на эффективность работы многослойного персептрона / Аль-Хайдри В.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. // Журнал «Нейрокомпьютеры: разработка, применение» 2015. № 7. С. 60-66. ISSN 1999-8554.
3. **Аль-Хайдри В.А.** Выявление искажений в электрокардиосигнале на основе комплексирования дискретного вейвлет-преобразования и нейросетевого анализа / Аль-Хайдри В.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. // ж. «Динамика сложных систем — XXI век» №4/2015 С. 42-49. ISSN 1999-7493
4. **Аль-Хайдри В.А.** Возможности применения искусственных нейронных сетей для распознавания искажений ЭКГ/ Аль-Хайдри В.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. // ж. Биотехносфера №1/2016 С. 08-13. ISSN 2073-4824

5. **Аль-Хайдри В.А.** Нейросетевой детектор искажений в электрокардиосигнале / Аль-Хайдри В.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. // Медицинская Техника / №3, 2016 / с. 18-22

#### Статьи в других журналах и научных сборниках

6. **Аль-Хайдри В.А.** Обзор основных методов распознавания артефактов в биомедицинских сигналах / Аль-Хайдри В.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: Доклады 11-й межд. научн. конф. Книга 1 – Владимир: с.380 – 383, 2014 ISBN 978-5-905527-08-1.
7. **Аль-Хайдри В.А.** Анализ и классификация помех, искажающих биомедицинские сигналы / Аль-Хайдри В.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. // Современные проблемы биомедицинской инженерии, сборник материалов Всероссийской молодежной научной конференции., С. 98-103 ISBN 978-5-9906691-0-9 Саратов -2015.
8. **Аль-Хайдри В.А.** Исследование возможности применения энтропийного подхода для распознавания артефактов ЭКГ / Аль-Хайдри В.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. // Медицинские приборы и технологии: международный сборник научных статей / под общ. ред. А.З. Гусейнова и В.В. Савельева. Вып. 6. Тула: Изд-во ТулГУ. 2015. с. 108-111, ISBN 978-5-7679-3231-3.
9. **Аль-Хайдри В.А.** Обзор методов исключения артефактов из биомедицинских сигналов / Аль-Хайдри В.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. // Медицинские приборы и технологии: международный сборник научных статей / под общ. ред. А.З. Гусейнова и В.В. Савельева. Вып. 6. Тула: Изд-во ТулГУ. 2015. С.113-116, ISBN 978-5-7679-3231-3.
10. **Аль-Хайдри В.А.** Исследование возможности применения корреляционного анализа для распознавания артефактов в электрографическом сигнале / Аль-Хайдри В.А., Сушкова Л.Т. // XXVIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов "Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы" Биомедсистемы – 2015, С.93-96, ISBN 978-5-7722-0276-0, 9-10 декабря 2015 г. Рязань.
11. **Аль-Хайдри В.А.** Применение искусственных нейронных сетей для выявления искажений в электрокардиосигнале / Аль-Хайдри В.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: Доклады 12-й межд. научн. конф. Книга 1 – Владимир: с. 132 – 134, 2016 ISBN 978-5-905527-13-5.
12. **Аль-Хайдри В.А.** Методика оценки эффективности нейросетевой системы анализа электрокардиографического сигнала / Аль-Хайдри В.А., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т. // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: Доклады 12-й межд. научн. конф. Книга 1 – Владимир: с.134 – 137, 2016 ISBN 978-5-905527-13-5.
13. **Аль-Хайдри В.А.** Применение эмпирической модовой декомпозиции для устранения дрейфа изолинии в ЭКГ / Аль-Хайдри В.А., Сушкова Л.Т., Талев Е.М. // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: Доклады 12-й межд. научн. конф. Книга 1 – Владимир: с.206 – 208, 2016 ISBN 978-5-905527-13-5

**Аль-Хайдри Валид Ахмед**

**НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ  
АВТОМАТИЧЕСКОМ РАСПОЗНАВАНИИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 28.09.2016

Формат бумаги 60×84 1/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.