На правах рукописи

АЕД ВАЛИД МОХАММЕД АХМЕД

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ И НЕЙРОСЕТЕВОГО АНАЛИЗА ФОНОКАРДИОСИГНАЛА

Специальность 05.12.04
«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир -2017

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

Научный руководитель: **Сушкова Людмила Тихоновна**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры биомедицинских и электронных средств и технологий ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир.

Официальные оппоненты: **Орлов Игорь Яковлевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород.

Крамм Михаил Николаевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры основ радиотехники, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г.Москва.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева». г. Нижний Новгород.

Защита состоится «26» декабря 2017 г. в 16 ч. в ауд. 301-3 на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, корп. 3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ и на сайте http://diss.vlsu.ru.

Автореферат разослан « 24 » октября 2017 г.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор А. Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Широкое распространение заболеваний сердечно-сосудистой системы (ССС), а также их огромная роль в инвалидизации и смертности населения (1-2 место) среди всех заболеваний, является в настоящее время проблемой, имеющей не только медицинское, но и социальное значение. По данным Всемирной организации здравоохранения смертность от этих заболеваний в мире составляет 31%, а в Европе 42%.

Существует ряд методов диагностики сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ). Одним из них является метод фонокардиографии (ФКГ), основанный на регистрации и анализе звуков, возникающих при сокращении и расслаблении сердца, в том числе – сердечные шумы, которые являются первым признаком возникновения нарушений в работе сердца.

Анализ биомедицинских сигналов очень часто является сложной задачей для врача или специалиста в области биомедицинских наук, т.к. клинически важная информация в сигнале, как правило, замаскирована шумами и наводками. Кроме того, параметры сигналов чаще всего не могут быть непосредственно восприняты визуальной и звуковой системами человека-наблюдателя, т.к. большая часть энергии звуков сердца сосредоточена на уровне или даже ниже порога восприятия звука большинством людей. Поэтому надёжность и состоятельность оценки фонокардиосигнала (ФКС), а также понимание наблюдаемых явлений являются субъективными факторами с точки зрения их интерпретации в зависимости от квалификации, опыта и диагностических возможностей врача-специалиста. Эти факторы определяют потребность не только в более совершенной аппаратуре, но также и в развитии методов объективного анализа сигналов в условиях помех с использованием современных алгоритмов обработки и анализа ФКС, реализуемых на основе современных радиотехнических методов и средств.

Поэтому научно-практическое обоснование, разработка и развитие методов и средств достоверной ранней диагностики работы сердца на основе современных радиотехнических методов обработки и анализа биомедицинских сигналов, способствующих увеличению объёма и качества получаемой информации о функциональном состоянии человека, и, как следствие, созданию более эффективных аппаратно-программных средств, является актуальной проблемой. Основными требованиями к таким методам являются простота реализации, информативность и достоверность результатов профилактической диагностики ССС.

Анализ литературы по методам обработки ФКГ - сигнала показывает, что в настоящее время широкое применение находят амплитудно-частотные и спектральные методы обработки и анализа, скрытые Марковские модели (СММ), опорные векторы (SVM), вейвлет-преобразование (ВП) и искусственные нейронные сети (ИНС).

Большой вклад в развитие методов обработки и анализа ФКГ - сигналов внесли Кельман И.М., Сибиркин Н.И., А.Н. Калиниченко, К.В. Подмастерьев, В.П. Дьяконова, А.Б. Сергиенко, Рангайан Р.М., Gerbarg D. S., Oppenheim A. V., Abbas K. Abbas., Rasha Bassam., L. Hamza Cherif., S. M. Debbal., F. Bereksi-Reguig., и др.

Целью диссертационной работы является развитие методов и алгоритмов обработки и нейросетевого анализа ФКГ-сигнала, способствующих повышению достоверности и информативности функциональной диагностики сердечно-сосудистой системы и расширению возможностей применении фонокардиографических систем.

Объектом исследования является фонокардиография, как метод функциональной диагностики сердца.

Предмет исследования – методы и алгоритмы обработки и анализа фонокардиографического сигнала в условиях помех.

Методы исследования: в работе использовались современные методы цифровой обработки и анализа биоэлектрических сигналов, фильтрации сигналов, методы математического анализа и математической статистики.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

1. Провести анализ литературы по существующим подходам, методам и алгоритмам обработки и анализа ФКГ - сигнала.
2. Сформировать необходимый объем обучающих и тестовых верифицированных данных записей фонокардиосигналов (в норме и с аномалиями) для функциональной диагностики ССС.
3. Провести исследования современных вариантов и подходов обработки и анализа ФКГ-сигнала, обеспечивающих получение достоверной информации о работе сердца.
4. Разработать алгоритм предварительной обработки ФКГ - сигнала, обеспечивающий эффективное подавление помех и возможность распознавания основных его компонентов.
5. Разработать алгоритм построения кардиоинтервалограммы на основе ФКГ-сигнала для последующего анализа динамических характеристик ритма сердца.
6. Исследовать возможность применения нейросетевой технологии классификации ФКГ - сигнала по типу «Норма/Аномалия».

Научная новизна работы заключается в **разработке** и **реализации**:

1. **Алгоритма** идентификации и сегментации основных компонентов ФКС (S1, систола; S2, диастола) на основе его энергических свойств;
2. **Методика** построения кардиоинтервалограммы на основе ФКГ-сигнала, позволяющая анализировать динамические характеристики ритма сердца без параллельной регистрации ЭКГ.
3. **Методика** классификации фонокардиографического сигнала по типу «Норма/Аномалия» на основе технологии нейросетевого анализа.

Практическая значимость работы заключается в:

1. Расширении возможности применения и повышении информативности метода фонокардиографии путём построения на основе ФКС кардиоинтервалограммы и ее последующего анализа для оценки динамических характеристик ритма сердца, в том числе его вариабельность. Для сопоставления результатов применения разработанного алгоритма был проведен корреляционный анализ кардиоинтервалограмм, полученных на основе ФКГ и ЭКГ. Коэффициент корреляции составил порядка 0,99, что подтверждает тесную взаимосвязь полученных результатов.

2. Применении нейросетевой технологии классификации ФКГ-сигнала по типу «Норма/Аномалия», позволяющей повысить эффективность постановки первичного диагноза при использовании простой технологии фонокардиографии, что подтверждается значениями известных критериев: чувствительности (90.06%) и специфичности (88%).

3. Разработке комплекса программ, обеспечивающих регистрацию и предварительную обработку ФКС, в т.ч. фильтрация, а также построение ритмограммы сердца на основе ФКС и последующий анализ для оценки параметров вариабельности сердца.

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

– результатами тестирования с использованием верифицированных баз данных записей фонокардиографического сигнала из архива PhysioNet, экспериментальных исследований и апробации разработанных специализированных нейросетевых блоков анализа фонокардиографического сигнала на предмет наличия аномалий;

– оценкой эффективности функционирования, разработанной нейросетевой системы классификации фонокардиограммы на основе использования общепризнанного инструмента ROC-анализа и критериев чувствительности, специфичности и точности.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. **Предложенный алгоритм** идентификации и сегментации основных компонентов фонокардиографического сигнала на основе его энергических свойств не требует применения дополнительных (вспомогательных) биоэлектрических сигналов.

2. **Разработанная методика** построения и анализа кардиоинтервалов на основе ФКГ- сигнала позволяет оценить вариабельность ритма сердца с достаточной степенью достоверности.

3. **Разработанная методика** нейросетевой технологии классификации функциональных состояний сердца по типу «Норма/Аномалия» на основе ФКГ – сигнала способствует повышению эффективности ранней диагностики работы сердца.

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 заключается в выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая формирование экспериментальных баз данных фонокардиографического сигнала, разработку алгоритмов экспериментальных исследований, проведение исследований, анализ и оформление результатов в виде публикаций и научных докладов.

Апробация работы

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: IV Всероссийской научной конференции для молодых ученых, студентов и школьников «Актуальные вопросы биомедицинской инженерии» (Саратов, 2014); XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов "Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы", (Рязань, 2015); XI Международной научной конференции "Перспективные технологии в средствах передачи информации" (Владимир-Суздаль, 2015); XII Международной научной конференции "Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии" (Владимир-Суздаль, 2016).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ,

из них три – в журналах, входящих в перечень ВАК РФ. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка, включающего 103 наименований, списка сокращений и 4 приложения. Объём диссертации составляет 130 страниц машинописного текста, 62 рисунков и 16 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи работы, перечислены предмет, объект, область и методы исследования, показаны научная новизна и достоверность основных научных результатов работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, показаны 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 фонокардиографического сигнала. Представлен анализ фонокардиограмм, рассмотрены наиболее характерные виды помех, неизбежно присутствующих в фонокардиосигнале при его регистрации. На основе обзора литературы проведен анализ современных методов и алгоритмов обработки и анализа, фонокардиографических сигналах. А именно решения задачи фильтрации, сегментации и классификации. Рассмотрены различные варианты цифровой фильтрации ФКГ сигнала. Результаты анализа современных методов

сегментации биомедицинских сигналов показали, что при решении задачи сегментации ФКГ следует отдавать предпочтение такому методу, который не требует применения дополнительных (вспомогательных) биоэлектрических сигналов. Показано, что одним из перспективных направлений решения задачи классификации ФКГ сигнала является применение искусственных нейронных сетей.

Во второй главе рассматриваются теоретические предпосылки решения задачи обработки и анализа в ФКГ-сигнале. Рассмотрены предлагаемые в литературных источниках методы предварительной обработки ФКС. Данные методы основаны преимущественно на математическом аппарате частотной и адаптивной цифровой фильтрации и выполняют две основные функции: подавление имеющихся в сигнале помех и выделение информативных признаков для дальнейшего анализа сигнала. Предложена и обоснована следующая последовательность этапов предварительной обработки ФКС: устранение внешних помех; фильтрация нижних частот; фильтрация верхних частот. При количественной оценке изменения уровня шума отфильтрованного сигнала относительно исходного часто применяется отношение сигнал/шум (ОСШ; англ. signal-to-noise ratio, сокр. SNR), которое определяется отношением мощности полезного сигнала к мощности шума:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}}\right)^2, \qquad (1)$$

где P – средняя мощность, а А- среднеквадратичное значение амплитуды;

Рассмотрены существующие подходы к решению задачи сегментации ФКГ-сигнала, в основе которых лежат следующие группы методов: частотная цифровая фильтрация; энергия сигнала; методы на основе опорных сигналов. Рассмотрены возможности построения кардиоинтервалаграмм и анализ ритмограммы сердца на основе ФКГ-сигнала. Также в данной главе рассмотрены теоретические основы ИНС, описаны их различные структуры и методы обучения.

Рассмотрены методы и средства оценки качества разрабатываемых алгоритмов сегментации и классификации, а именно: чувствительность (ошибка первого рода), специфичность (ошибка второго рода) и точность, характеризующая диагностическую эффективность метода. Данные критерии определяются по формулам, приведенным в таблице 1.

Таблица 1- Формулы критериев оценки эффективности алгоритмов сегментации и классификации ФКГ-сигнала.

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.

На основе результатов данной главы сформулированы задачи для дальнейшего исследования.

Анализ рассмотренных методов позволил прийти к выводу о том, что нейронные сети является подходящим инструментом для классификации ФКГ-сигнала по типу «Норма/Аномалия» благодаря их гибкости и способности обучаться.

В третьей главе рассматриваются вопросы описания обучающих и тестовых верифицированных база данных фонокардиографических сигналов, необходимых для разработки системы обработки и анализа ФКГ - сигнала. Ставятся задачи разработки и исследования алгоритмов предварительной фильтрации ФКС от шумов и помех; сегментации ФКС в основе, которой лежит задача обеспечения наилучших условий для выделения тонов сердца S1 и S2 на фоне других компонент кардиоцикла; построения кардиоинтервалограммы на основе ФКГ-сигнала и рассматривается возможности применения ИНС для классификации ФКГ- сигнала по типу «норма / аномалия».

Для проведения исследований использовалась база верифицированных данных фонокардиосигналов, собранная в рамках международного конкурса «Классификация нормальных / аномальных звуков сердца: PhysioNet / Computing in Cardiology Challenge 2016». И включающая в себя 4430 записей. С целью унификации базы данных ФКС, имеющих разные частоты дискретизации, была проведена процедура передискретизации до 2000 Гц.

По результатам научной литературы исследования процедур низкочастотной и высокочастотной фильтрации. Были определены диапазоны оптимальных значений частоты среза для обоих видов фильтров, значения которых составили: для ФНЧ $f_c = 400\,Гц$, для ФВЧ $f_c = 25\,Гц$, что отражает разумный компромисс между достижением удовлетворительной точности представления ФКС и стремлением к снижению вычислительных затрат при обработке сигнала.

Рассмотрен вопрос необходимости и важности процедуры сегментации при решении задачи классификации ФКГ-сигнала, а также для извлечения информативных признаков и выделения основных компонентов сигнала. Поэтому в данной работе основной задачей является идентификация тонов S1 и S2 и, соответственно, периодов систолы и диастолы, необходимых для дальнейшего анализа и классификации звуков сердца.

Одним из известных подходов сегментации ФКС являются методы на основе вычисления и оценки энергии сигнала. Для выделения тонов сердца был реализован метод определения уровня свободной энергии ФКГ-сигнала. Выбор метода связан с его высокой эффективностью при выделении и идентификации тонов сердца на фоне шумов и помех. Кроме того, в отличие от требований метода вейвлет-анализа ФКГ, нет необходимости разделять полосу исследуемого сигнала на поддиапазоны. Исходя из изложенного, разработан алгоритм сегментации ФКГ-сигнала на основе вычисления и оценки его энергии (рисунок 1). На первом этапе осуществляется предварительная

обработка сигнала, которая заключается в нормировании и фильтрации сигнала от шумов, наложенных на ФКГ-сигнал (рисунок 2). Фильтрация проводится при помощи фильтров нижних и высоких частот (частоты среза 400 Гц и 25 Гц, соответственно).

Выбор частотного диапазона фильтрации обусловлен тем, что в данном диапазоне сосредоточена полезная информация фонокардиографического сигнала. ФКС был нормализован в соответствии с формулой.

$$x_{norm}(t) = \left(\frac{x(t)}{\max(|x(t)|)}\right)^2, \qquad (2)$$

где x(t) - исходный сигнал, возведение которого в квадрат приводит к тому, что его пик становится более заметным, при этом ослабляется шум.

Следующий шаг заключается в вычислении и определении уровня свободной энергии ФКС (рисунок 3). Расчет уровня свободной энергии производился по известной формуле:

$$E = -S^2(t)\log S^2(t), \qquad (3)$$

где S(t) – значение нормализованного сигнала в момент времени t.

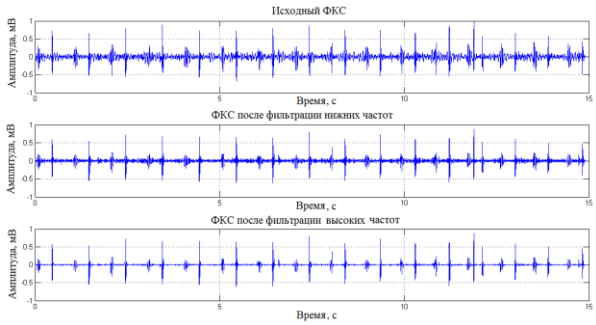

Рисунок 2. Результаты фильтрации ФКС от нижних и высоких частотных помех

Нормализация сигнала заключалась в установлении единого уровня изолинии профиля в промежутках между выбросами свободной энергии. Для идентификации тонов сердца уровень свободной энергии ФКС был установлен в пределах 20–25% максимальной амплитуды пиков ее выбросов. Все колебания свободной энергии, лежащие

Рисунок 1. Блок-схема алгоритм сегментации ФКС

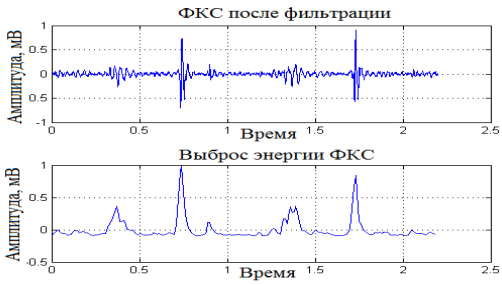

Рисунок 3. Профиль свободной энергии Шеннона для ФКС

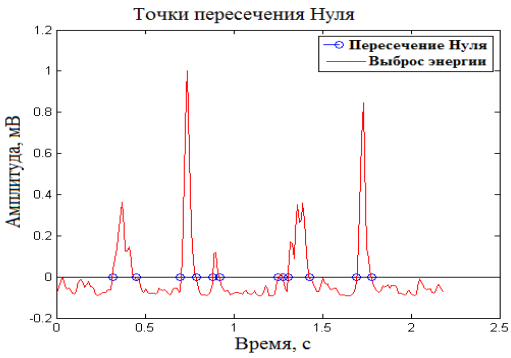

Рисунок 4. Результаты определения начала и конца тонов сердца

ниже этого уровня, воспринимались как шумы (рисунок 4). Далее следовал этап определения точки пересечения нуля, позволяющие находить начало и конец тонов сердца S1 и S2, как показано на рисунке 5. Анализу рисунка 5 показывает, что идентификация отдельных тонов сердца по длительности выброса свободной энергии затрудняется наличием артефактов, образование последовательности локальных кратковременных выбросов энергии, но относящихся к одному тону сердечного ритма.

Поэтому для идентификации S1 и S2, оценивается продолжительность звуков и временной интервал между звуками, а также величина пиковой энергии звуков с учетом следующих рекомендаций:

а) Как для здоровых, так и больных людей все звуки должны быть в интервале между 30мс. и 250мс., Любые звуки за пределами этого диапазона считаются помехами и отбрасываются при дальнейшей обработке (рисунок 6).

б) Если интервал времени между двумя звуками, меньше, чем 40мс, то это означает, что звук был разделен. При этом звук с наибольшей энергией хранится для дальнейшей обработки, а другие считаются помехами и отбрасываются, как показано на рисунке 6. Известно заранее, что продолжительность систолы короче, чем продолжительность диастолы. На основе этой реальности можно идентифицировать тонов сердца S1, S2, систола и диастола. На основе этого осуществляется идентификация тонов сердца S1, S2, систола и диастола (рисунок 7).

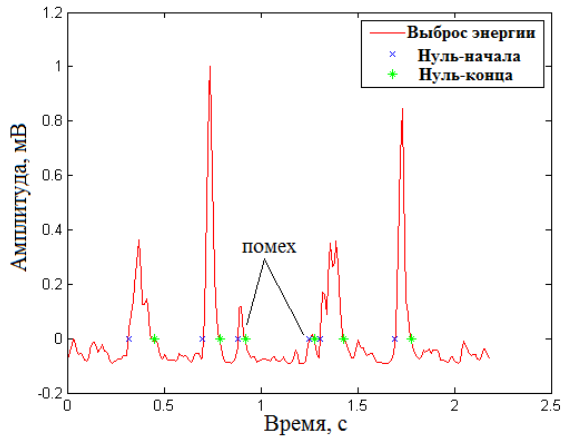

Рисунок 5. Результаты определения начала и конца тонов сердца.

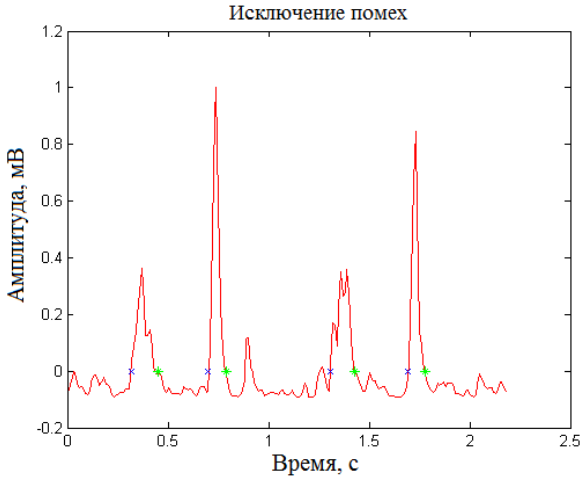

Рисунок 6 Исключение помех из ФКГ-сигнала

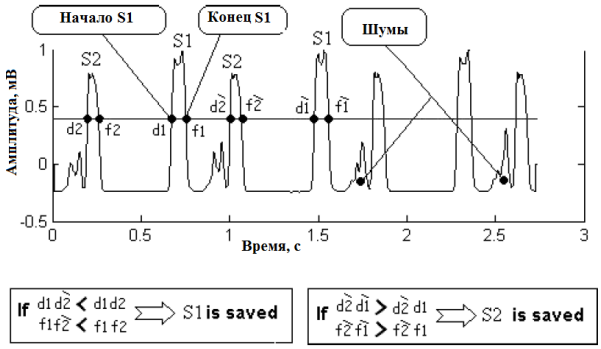

Рисунок 7. Принцип разделения тонов сердца

После сравнения интервала времени между полученными точками определяется положение S1 и S2. Результаты определения S1 и S2 представлены на рисунке 8. Заключительным этапом является сегментация систолы и диастолы на основе первого и второго тона.

На рисунке 9 показан пример набора полученных сегментов ФКС, подготовленных по описанной выше методике.

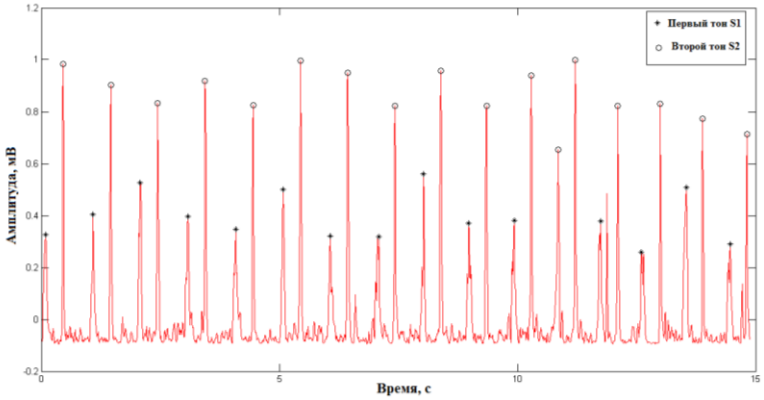

Рисунок 8. Локализация S1 и S2.

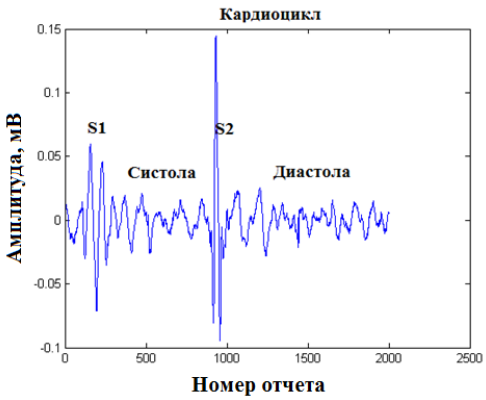

Рисунок 9 Пример набора полученных сегментов КЦ

С целью расширения возможностей применения ФКГ в задачах медицинской диагностики, в частности, для оценки вариабельности ритма сердца. В данном разделе также исследуется возможности построения кардиоинтервалограмм (КИГ) на основе ФКГ- сигнала. Разработана методика и соответствующий алгоритм вычисления и анализа кардиоинтервалов (КИ) на базе основных тонов сердца (S1,S2), полученных с помощью разработанного выше алгоритма сегментации ФКГ-сигнала.

Алгоритм реализован в среде MATLAB и представлен на рисунке 10. Результаты исследований показали возможность применения ФКГ для построения КИГ. На основе полученных значений пиков первого тона S1 вычисляется КИГ, как разница их времен локализации для соседних кардиоциклов (SS- интервалограмма). Результаты вычислений показаны на рисунке 11, на которых по оси y отложены длительности SS-интервалов по отношению к номеру кардиоинтервала (оси x).

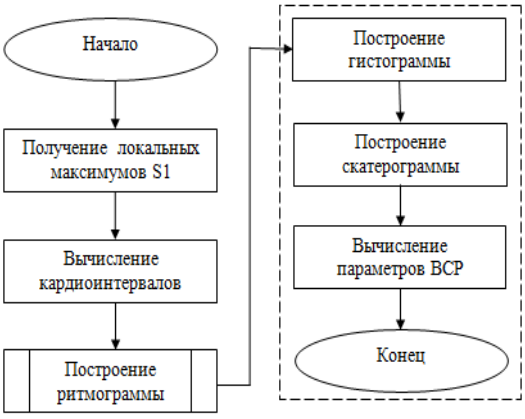

Рисунок 10. Блок-схема алгоритма вычисления КИГ и построения ритмограммы

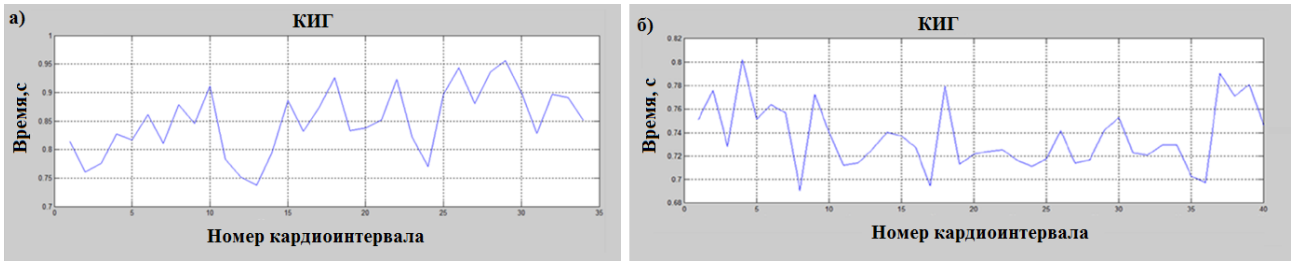

Рисунок 11. КИГ (SS- интервалограмма): КИГ здорового человека (а); КИГ для больного человека (б)

Анализ S-S интервалограммы. Как и в случае для R-R-интервалограммы полученной на основе ЭКГ-сигнала для анализа S-S интервалограммы

полученной на основе ФКГ-сигнала используются статистические и геометрические методы анализа. К стандартным статистическим характеристикам таких динамических рядов относятся: **частота сердечных сокращений**, **дисперсия, среднеквадратическое отклонение.** К стандартным геометрическим характеристикам относится **гистограмма** и **скатеррграмма**. Примеры гистограмм исследованных ФКГ- сигналов представлены на рисунке 12, слева. Гистограмма показывает распределение значений длительности кардиоинтервалов (КИГ) относительно их среднего значения. Это позволяет судить о динамике изменения сердечного ритма с течением времени. На рисунке 12, справа представлены скатеррграмма для ФКС. Важным достоинством этого метода является то, что он позволяет эффективно распознавать и анализировать сердечные аритмии.

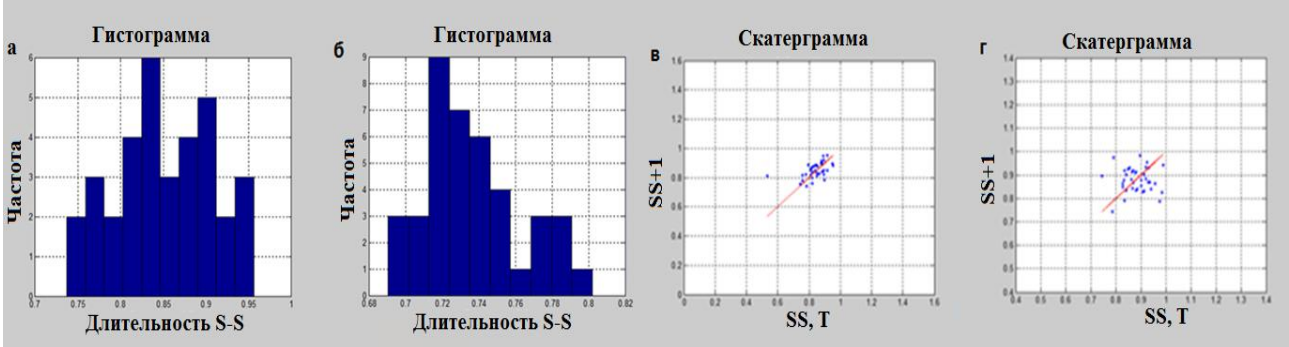

Рисунок 12. Гистограмма и скатерграмма кардиоинтервалограммы, полученной на основе ФКГ- сигналов: здорового человека (а,в); больного человека (б,г)

Третья глава также посвящена исследованию нейросетевого подхода для решения задачи классификации ФКС по типу «норма/аномалия». Сформированы обучающая и тестовая базы данных (БД) фонокардиографических сигналов, необходимые для разработки системы классификации ФКС. Для функционирования и обучения ИНС на вход подается сигнал определённой формы - образ фонокардиосигнала. Далее рассматривается технология предварительной обработки сигнала для построения входных образов ФКС. От методики подготовки образов ФКС, соответствующих той или иной категории, зависит качество распознавания функционального состояния сердечно-сосудистой системы. Суть методики формирования образов для БД заключается в выделении кардиоциклов и нормировании их, поскольку они имеют разные амплитуды. Анализ существующих современных регистраторов ФКГ показал, что для совместимости разрабатываемого нейросетевого блока классификации ФКС с большинством регистраторов ФКГ была выбрана частота дискретизации Fs входных образов 200 Гц.

При обучении нейросетового классификатора в работе исследовалась следующие варианты входной информации (рисунок 13): а) исходные кардиоциклы (КЦ), полученные в результате выше рассмотренной сегментации; б) частотный спектр КЦ, полученных с помощью преобразования

Фурье. в) огибающая КЦ, полученных с помощью преобразования Гильберта. Выбор указанных вариантов для исследования обусловлен следующим: использование исходного КЦ обосновано отсутствием информационных признаков, необходимых для классификатора и обеспечения требуемой точности классификации; применение спектр Фурье в качестве входной информации НС для классификации ФКС обусловлено тем, что частотный состав ФКС в норме отличается от аномалиями; применение огибающей ФКС, полученной с помощью преобразования Гильберта, позволяет определить мгновенную амплитуду и мгновенную частоту сигнала.

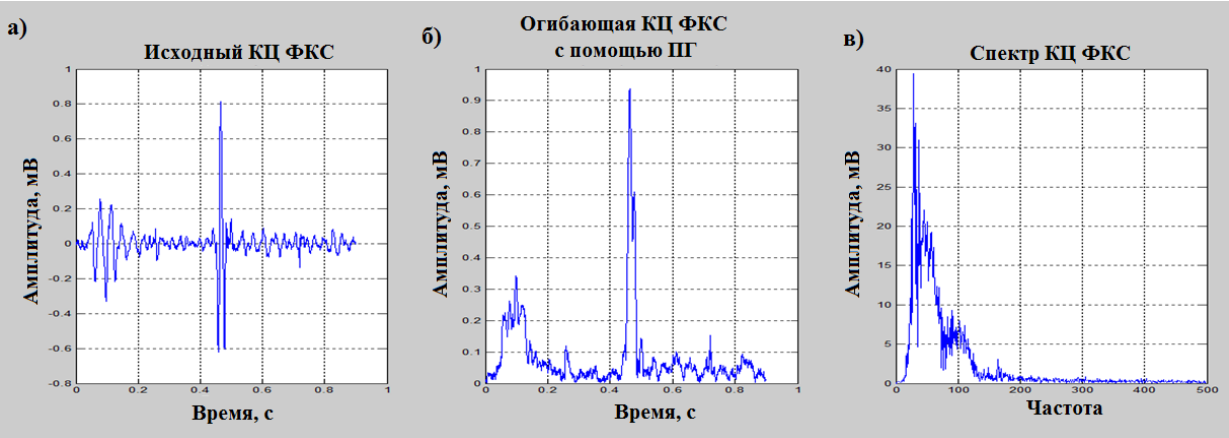

Рисунок 13. Примеры рассмотрены и исследованы три варианта входного образа

Показано, что наилучшим вариантом архитектуры ИНС для решения задачи анализа ФКС является многослойный персептрон.

При обучении НС были использованы следующие параметры: количество циклов обучения - 10000; минимальная ошибка, при достижении которой прерывается обучение, равна 0.0001. При этом в качестве алгоритма обучения- был использован градиентный метод.

В качестве программной среды для проведения исследований был выбран широко известный пакет MATLAB, имеющий большие возможности работы с *нейронными сетями* в том числе "Neural Network Toolbox", входящий в стандартную поставку MATLAB.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований обработки и анализа ФКГ-сигнала. На этапе предварительной обработке ФКС была решена задача фильтрации. Показана, что адаптивная фильтрация позволяет устранить из ФКС внешние помехи окружающей среды. Исследованы методы ее реализации, а именно: нерекурсивный фильтр наименьших квадратов (LMS) и рекурсивной фильтр наименьших квадратов (RLS) в условиях моделирования таких помех, как: случайный шум, речевая помеха, периодический сигнал с частотой 1 кГц и 10 кГц, импульсный шум. Анализ результатов эффективности адаптивных фильтров типа LMS и RLS по критерию отношения сигнал/шум (ОСШ) свидетельствует о том, что адаптивный фильтр RLS типа является более предпочтительным вариантом для

фильтрации ФКС. Исходя из этого разработано соответствующее программное обеспечение (ПО) адаптивной фильтрации ФКС в системе Matlab.

Оценка качества решения задачи сегментации ФКГ – сигналов проведена путем сравнения результатов работы предложенного алгоритма с эталонной аннотированной обучающей БД ФКС, полученной с использованием алгоритма сегментации Шпрингера (Springer и др., 2016) с последующей ручной коррекцией опытными врачами - специалистами. Результаты оценки качества сегментации основных компонентов ФКГ – сигнала, полученные с использованием записей из верифицированной БД, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты оценки качества алгоритма сегментации основных компонентов ФКГ – сигнала.

Основные компоненты ФКГ – сигнала	Показатель	
	Чувствительность Se, %	Специфичность Sp, %
S1	99,13	98,76
Систола	99,29	98,06
S2	98,93	98,34
Диастола	98,02	98,05

Для оценки и анализа эффективности разработанного алгоритма построения и исследования ритмограммы сердца на основе ФКС использовалась верифицированная БД, которая имеет записи ФКГ и ЭКГ, зарегистрированные синхронно для одного и того же исследуемого. Основные характеристики записей сигналов: количество каналов – 2 (1-ый канал- ФКГ, 2-ой канал – ЭКГ), частота отсчетов – 2000 Гц, длительность записи – 23 и 20 секунд, масштаб сигнала – произвольные единицы.

Необходимым этапом данной работы является верификация разработанного алгоритма, которая заключается в сравнении результатов построения КИГ на основе ФКГ с КИГ, полученной из ЭКГ. Результаты сравнения представлены на рисунке 14.

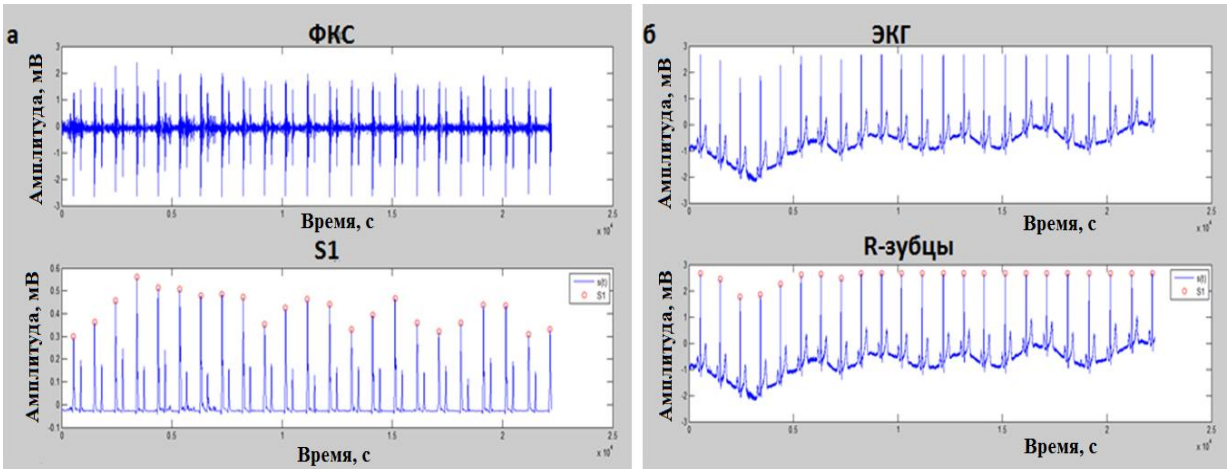

Рисунок 14. Точность нахождения: а) S1-тонов на ФКГ и б) R-зубцов на ЭКГ.

Для сопоставления результатов разработанного алгоритма был проведен корреляционный анализ КИГ, полученной на основе ФКГ, и КИГ, полученной на основе ЭКГ. Коэффициент корреляции составил порядка 0,99, что подтверждает тесную линейную связь между полученными результатами. Из рисунка 15 видно совпадение КИГ, полученной из ФКГ (пунктирная линия), и КИГ, полученной из ЭКГ (сплошная линия).

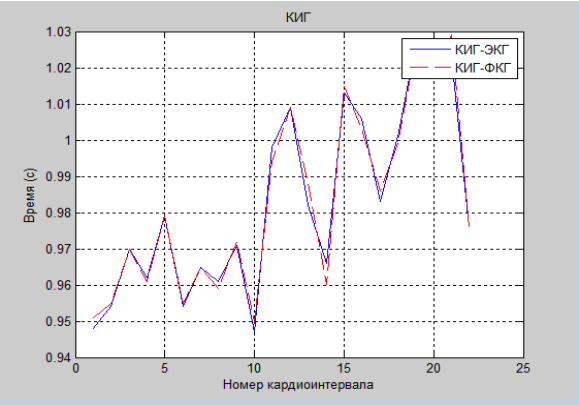

Рисунок 15. КИГ, полученные из ФКГ и ЭКГ

Качественный анализ результатов иллюстрирует точность разработанного алгоритма. Для более подробной оценки был проведен количественный анализ полученных КИГ, построены гистограммы и скатерограммы (рис.16), а также рассчитаны ряд статистических параметров и разница между ними в процентном соотношении (таблица 3).

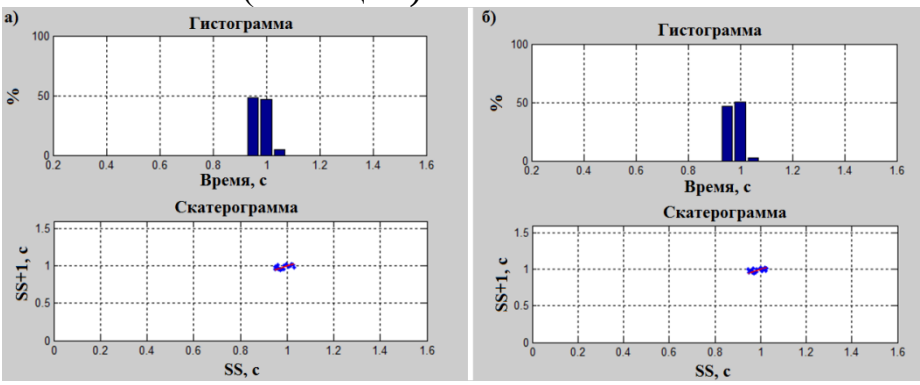

Рисунок 16. Гистограммы и скатерограммы на основе КИГ, полученных на основе ФКГ (а) и ЭКГ (б)

В примере разница между значениями параметров средней длительности сердечного ритма (СР), минимальной длительности СР, максимальной длительности СР, вариационного размаха, моды, амплитуды моды и ЧСС стремится к нулю, а для параметров СКО и эксцесса разница составляет 1,3 %.

Таблица 3- Результаты анализа КИГ на основе ФКГ и ЭКГ

Параметр	**ФКГ**	**ЭКГ**	**Расхождение**
Средняя длительность СР	1.2722	1.2721	0.007%
Минимальная длительность СР	1.0480	1.0480	0 %
Максимальная длительность СР	1.3990	1.3990	0%
среднеквадратическое отклонение	0.1172	0.1188	1.3 %
ЧСС	48	48	0%
мода	1.3	1.3	0%
Амплитуда мода	52.6316	52.6316	0%
Вариационный размах	0.3782	0.3822	0%
Эксцесс	1.8343	1.8088	1.3%
Коэффициент корреляции	0.9995		

С точки зрения статистического подхода при построении КИГ такое расхождение между ФКГ и ЭКГ- сигналами является несущественным. Обработка других фонокардиограмм предложенными методами также дала идентичные результаты, что свидетельствует об устойчивости разработанного алгоритма. В среде MATLAB был разработано программно-алгоритмическое обеспечение построения и анализа ритмограммы сердца на основе ФКС.

В данной главе также приводятся результаты экспериментальных исследований применения технологии нейронных сетей для классификации ФКГ-сигнала по типу «Норма / Аномалия». В качестве входной информации для исследования ИНС использовались: а) исходные кардиоциклы (ИКЦ), полученные с помощью разработанного алгоритма сегментации; б) частотный спектр кардиоциклов, полученных с помощью преобразования Фурье (ЧсКЦ); в) огибающая КЦ, полученных с помощью преобразования Гильберта (ОКЦ).

Результаты тестирования трех вариантов исследования ИНС показаны на рисунке 17. Сравнительный анализ результатов трех указанных подходов показал преимущество варианта использования в качестве входной информации при обучении ИНС огибающей КЦ, полученной с помощью преобразования Гильберта.

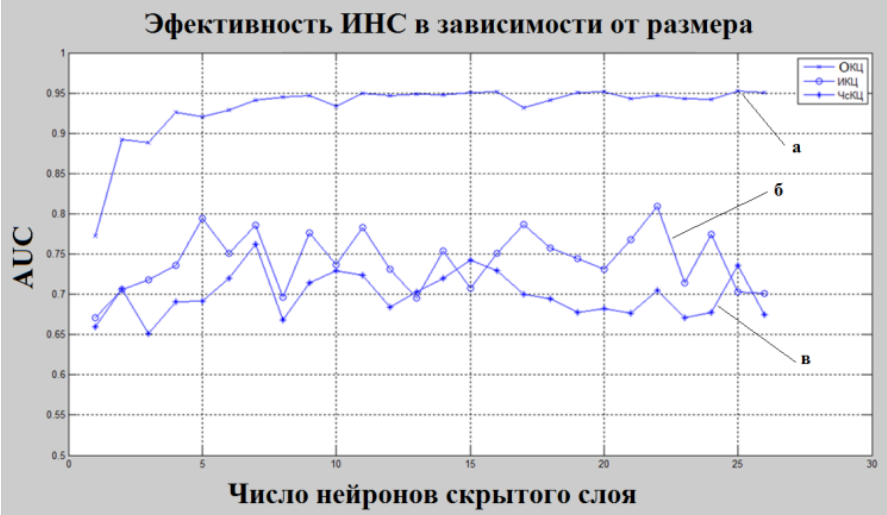

Рисунок 17 – Результаты исследования влияния количества нейронов скрытого слоя на эффективность работы МП: а) ОКЦ; б) ИКЦ; в) ЧсКЦ

В таблице 4 сведены результаты исследования трех указанных выше подходов. Количественный анализ полученных результатов служит основой для дальнейшего выбора оптимального варианта решения задачи классификации ФКС при его автоматическом распознавании.

Таблица 4. Количественное сравнение результатов работы ИНС с применением ИКЦ, ЧсКЦ и ОКЦ.

Входной сигнал	**Чувствительность Se, %**	**Специфичность Sp, %**	**Точность %**	**AUC**
ИКЦ	73	74	73.5	0.79
ЧсКЦ	70	70	70	0.76
ОКЦ	**90**	**88**	**89**	**0.95**

Из таблицы видно, что вариант использования огибающей КЦ в качестве входной информации при обучении ИНС является более эффективным по сравнению с вариантами, где входной информацией для ИНС является ИКЦ и ЧсКЦ, а именно повышение значений чувствительности, специфичности и точности на 17%, 14% и 16% соответственно.

Результаты классификации фонокардиосигнала на основе нейросетевого анализа приведены на рисунке 18. На графике видно, что максимальное значение AUC (соответствует **0.95)** получено для МП с количеством нейронов в первом скрытом слое, равным 242. Согласно выбранной сужающейся структуре ИНС количество нейронов во втором скрытом слое составляет 121 нейрона. При этом, значения чувствительности, специфичности и точности для этого МП составили **90.06%**, 87.9**%** и 88.9**%** соответственно. Результаты исследования ИНС, при использовании в качестве входной информация для обучения нейросети огибающих кардиоциклов (КЦ), приведены на рисунке 18.

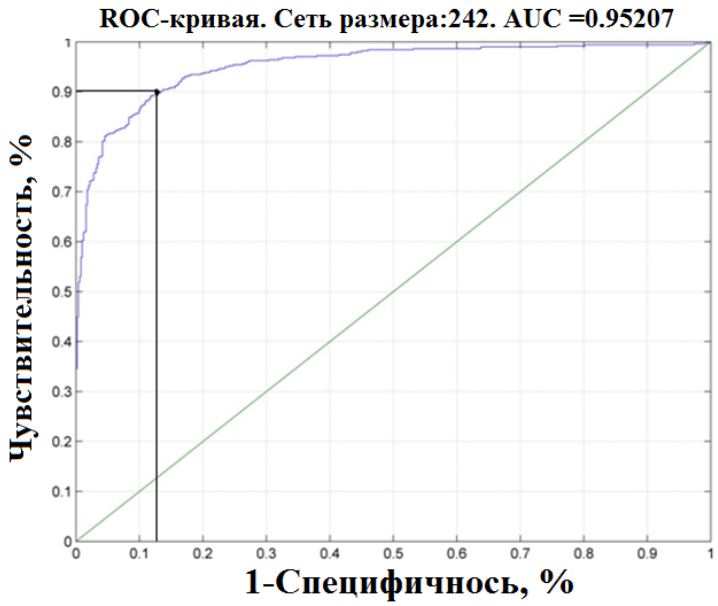

Рисунок 18 - Результаты исследования влияния количества нейронов скрытого слоя на эффективность работы МП: входная информация – огибающие КЦ

Далее был проведен сопоставительный анализ полученных в диссертационной работе результатов с аналогом, описанным в работе, посвященной классификации ФКГ-сигнала по типу «норма / аномалия»,

представленной на конкурс «Computing in Cardiology Challenge 2016» (проводится ежегодно известным сайтом PhysioNet), и занявшим первое место. Полученные результаты показывают, что эффективность классификации ФКС выше, чем результаты аналога на величину порядка 10% по критерию специфичности и порядка 3% по точности, характеризующей диагностическую эффективность классификации.

На основе полученных результатов разработана структурная схема системы обработки и анализа ФКГ-сигнала, представленная на рисунке 20. Работа системы обработки и анализа ФКГ-сигнала начинается с цифровой регистрации ФКГ-сигнала и помех окружающей среды. После чего, ФКГ в цифровом виде поступает на ЭВМ, обеспечивающей выполнение процедур цифровой фильтрации, сегментации ФКС, анализа и классификации КЦ, построения и анализ ритмограмы сердца, а также принятия и исполнения решений. Полученные КЦ подвергаются анализу на предмет наличия в них аномалий в блоке, представляющим собой разработанный в настоящей работе нейросетевой классификатор В зависимости от результата классификации принимается диагностической решение. Данная система может быть использована в кардиологии для регистрации, анализа ФКС по типу «Норма / Аномалия», обнаружения шумов сердца, построения и анализа ФКС. Разработанная система дает качественный инструмент врачу для постановки первичного диагноза при использовании простой технологии фонокардиографии.

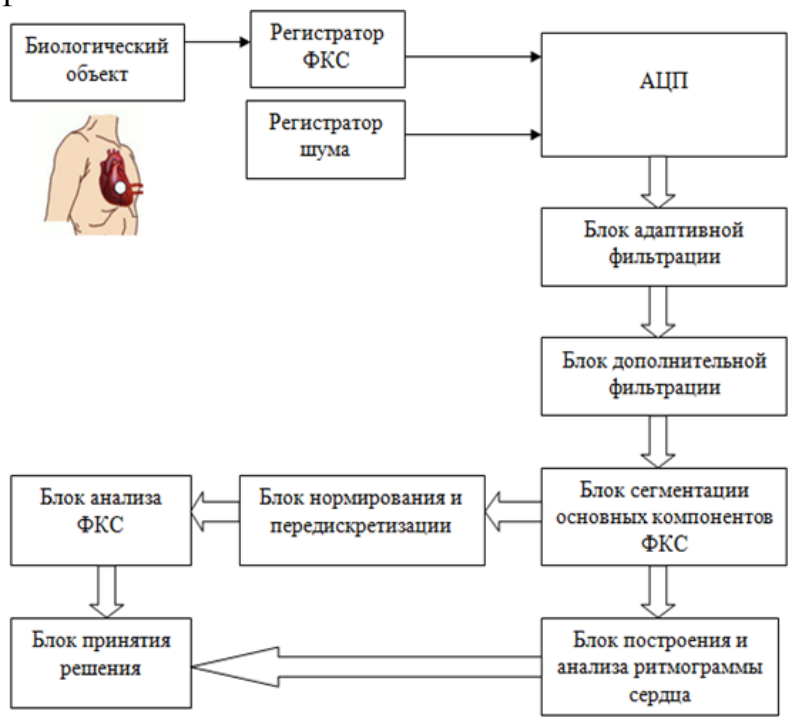

Рис.20. – Система обработки и анализа ФКГ-сигнала

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. На основе проведенного анализа литературы по существующим подходам, методам и алгоритмам обработки и анализа ФКГ-сигнала было

показано, что одним из перспективных направлений решения задач фильтрации ФКС является применение адаптивной фильтрации, а для решения задачи сегментации основных компонентов ФКГ-сигнала (тоны S1, S2) необходима разработка эвристических алгоритмов на основе использованием энергических свойств. Также показано, что искусственные нейронные сети являются эффективным инструментом классификации ФКГ-сигнала.

2. Для повышения качества обработки и анализа ФКГ-сигнала был разработан алгоритм адаптивной компенсации внешних помех, построенного на основе получения образца шумового сигнала путём установления второго микрофона, позволяющего уменьшить влияние звуковых помех окружающей среды, а для дополнительной фильтрации использована полосовая фильтрация в полосе от 25 Гц до 400 Гц.

3. С целью идентификации и сегментации основных компонентов фонокардиографического сигнала (S1, систола; S2, диастола) разработана методика и соответствующий алгоритм вычисления и определения уровня свободной энергии ФКГ- сигнала, не требующие применения дополнительных (вспомогательных) биоэлектрических сигналов, эффективность работы которых подтверждается значениями критериев: чувствительности (порядка 98-99 %) и специфичности (98%) по сравнению с эталонной аннотированной обучающей базой данных ФКС.

4. Для расширения возможности применения фонокардиографии в задачах медицинской диагностики, в частности, для оценки вариабельности ритма сердца разработана методика и соответствующий алгоритм построения кардиоинтервлограмм на основе ФКС. Корреляционный анализ кардиоинтервалограмм, полученных с помощью разработанного алгоритма и кардиоинтервалограмм, полученных на основе ЭКГ, показал коэффициент корреляции порядка 0,99, что подтверждает тесную взаимосвязь сравниваемых подходов и возможность использования ФКС для оценки динамических характеристик работы сердца.

5. Для осуществления классификации ФКС по типу «Норма/Аномалия» выбрана ИНС, при обучении и тестировании которой были использованы записи ФКС, собранные для международного конкурса «Классификация нормальных / аномальных звуков сердца: PhysioNet / Computing in Cardiology Challenge 2016».

6. Для обоснования выбора структуры и параметров ИНС, способствующих более эффективному анализу ФКГ-сигнала, в диссертационной работе проведен анализ литературы эффективности функционирования ИНС в зависимости от: выбора типовых функций активации; количества скрытых слоев и соотношения нейронов в первом и втором скрытых слоях, определяющих типы структуры ИНС (сужающаяся, равная или расширяющаяся). Результаты проведенного анализа показали, что наиболее эффективной структурой для обнаружения типовых искажений в ФКС является нейросетевая система типа многослойный персептрон с сигмоидальными функциями активации.

7. С целью поиска более эффективного варианта построения системы классификации ФКГ-сигнала проведены исследования и количественный анализ работы ИНС для трех вариантов входного образа, а именно: исходные кардиоциклы (КЦ), полученные в результате разработанной процедуры сегментации; частотный спектр КЦ, полученных с помощью преобразования Фурье; огибающая КЦ, полученная с помощью преобразования Гильберта. Показано преимущество варианта использования огибающей КЦ, а именно, повышение значений чувствительности, специфичности и точности на 17%, 14% и 16% соответственно.

8. Проведенные экспериментальные исследования разработанной нейросетевой системы классификации ФКГ-сигнала по типу «Норма / Аномалия» показали следующие результаты: чувствительность 90%, специфичность 88% и точность 89%. При сопоставительном анализе полученных результатов с аналогом, представляющим собой работу, занявшую первое место в конкурсе «Computing in Cardiology Challenge 2016» на базе известного сайта PhysioNet, показал повышение эффективности классификации ФКГ по критериям специфичности и точности на 10% и 3% соответственно.

9. Полученные результаты позволили разработать систему цифровой обработки и нейросетевого анализа ФКГ-сигнала, способствующей расширению функциональных возможностей фонокардиографии и повышению достоверности и информативности ранней диагностики работы сердца.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. **Аед, В.М.** Обзор методов сегментации фонокардиограмм / **В.М. Аед,** Р.В. Исаков, Л.Т. Сушкова.// Наукоемкие технологии. – 2015. - №10 –С.72-82.

2. **Аед, В.М.** Алгоритм построения кардиоинтервалограммына основе фонокардиограммы / **В.М. Аед.,** Р.В. Исаков., Л.Т. Сушкова, В.А. Аль- Хайдри. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2016. - №2 – С.34-43.

3. **Аед, В.М.** Возможности применения искусственных нейронных сетей для классификации фонокардиографических сигналов / **В.М. Аед.,** В.А. Аль- Хайдри, Р.В. Исаков, Л.Т. Сушкова. // Динамика сложных систем – XXI век. – 2017. - №1 – С.33-39.

Свидетельства о государственной регистрации программы на ЭВМ

4. **Аед В.М.А.** Программный комплекс адаптивной фильтрации фонокадриографического сигнала **/ В.М.А. Аед**., Л.Т. Сушкова // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017616188, – рег. 02.06.2017. – Заявлено 07.04.2017., № 2017613305. – Опубл. 21.06.2017.

5. **Аед В.М.А.** Формирователь ритмограммы сердца на основе фонокардиографического сигнала **/ В.М.А. Аед.,** Л.Т. Сушкова // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017617951, – рег. 018.06.2017. – Заявлено 07.04.2017., № 2017612995. – Опубл. 21.06.2017.

Статьи в других журналах и научных сборниках

6. **Аед, В.М.** Методы анализа фонокардиографического сигнала / **В.М. Аед,** Р.В. Исаков, Л.Т. Сушкова. // IV Всероссийской научной конференции для молодых ученых, студентов и школьников «Актуальные вопросы биомедицинской инженерии», 20 октября - 15 декабря 2014. - №1 – С. 14-17.

7. **Аед, В.М.** Аппаратно-программный комплекс для регистрации фонокардиосигнала с адаптивной компенсацией внешних помех / **В.М. Аед,** А.К. Аль-Малахи, Р.В. Исаков, Л.Т. Сушкова. // IV Всероссийской научной конференции для молодых ученых, студентов и школьников «Актуальные вопросы биомедицинской инженерии», 20 октября - 15 декабря 2014. - №1 – С. 14-17.

8. **Аед, В.М.** Сегментация фонокардиосигнала на основе вейвлет-преобразование / **В.М. Аед,** Л.Т. Сушкова. // XXVIII Всероссийскую научно-техническую конференцию студентов [Текст], Сборник_БМС-2015_А5 с. 145-149.

9. **Аед, В.М.** Фильтрация фонокардиосигнала с применением адаптивной компенсацией внешнихпомех / **В.М. Аед,** А.К. Аль-Малахи, Р.В. Исаков, Л.Т. Сушкова. // XI Международную научную конференцию Перспективные технологии в средствах передачи информации « ПТСПИ-2015». Владимир,2015.– Владимир, ВлГУ, 2015. С. 12 – 14.

10. **Аед, В.М** Обзор методов обработки фонокардиограммы / **В.М. Аед,** Р.В. Исаков, Л.Т. Сушкова. // 12-я Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ’2016» Книга 1, Суздаль, 5-7 июля 2016. – Владимир, ВлГУ, –С. 138-144.

11. **Аед, В.М** Программный комплекс построения ритмограммы сердца на основе фонокардиограммы / **В.М. Аед,** А.А. Аль-Кавати, Р.В. Исаков, Л.Т. Сушкова. // 12-я Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ’2016» Книга 1, Суздаль, 5-7 июля 2016. – Владимир, ВлГУ, –С. 144-148.

12. **Аед, В.М.** Применение спектрограммы в задачах анализа фонокардиограммы / **В.М. Аед,** Р.В. Исаков, Л.Т. Сушкова. // 12-я Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ’2016» Книга 1, Суздаль, 5-7 июля 2016. – Владимир, ВлГУ, –С. 307-311.

Подписано в печать 20 . 10 .2017.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз.
Издательство
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87