

На правах рукописи



ГРИГОРЬЕВ ЕВГЕНИЙ БОРИСОВИЧ

**МЕТОД И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОБРАБОТКИ
МНОГОКАНАЛЬНЫХ ЗАПИСЕЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА ДЛЯ
ДИАГНОСТИКИ ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНИ СЕРДЦА**

Специальность 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения

Автореферат

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») на кафедре радиотехнических систем.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент кафедры радиотехнических систем Красичков Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

Мельник Ольга Владимировна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» (г. Рязань);

Кирик Дмитрий Игоревич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (г. Санкт-Петербург);

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (г. Владимир)

Защита диссертации состоится «26» марта 2019 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.10 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.eltech.ru

Автореферат разослан «25» января 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.10
к.т.н., доцент



Садыкова Е. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Ишемическая болезнь сердца (ИБС) является распространённым заболеванием сердечно-сосудистой системы. При отсутствии должного лечения ИБС может привести к таким осложнениям как внезапная коронарная смерть, инфаркт миокарда, хроническая сердечная недостаточность.

Развитие эпизодов ишемии миокарда обычно связано с физической или эмоциональной нагрузкой и, как правило, сопровождается болевыми ощущениями, однако возможно протекание ИБС и в безболевогой форме.

На сегодняшний день одним из самых простых и популярных методов диагностики ИБС является электрокардиография в условиях нагрузочных тестов или мониторинга электрокардиосигнала (ЭКС). Между тем, в процессе регистрации на электрокардиосигнал воздействуют различные виды шумов и искажений, которые затрудняют анализ ЭКС. Особенно актуальна данная проблема при обработке суточных мониторограмм, содержащих зашумлённые фрагменты электрокардиосигнала, зарегистрированные в процессе выполнения физической нагрузки, когда появление эпизодов ишемии наиболее вероятно.

На основании медицинских исследований установлено, что использование информации о структуре и параметрах ЭКС, регистрируемого в нескольких отведениях, может значительно повысить достоверность выявления эпизодов ишемии. В настоящее время в медицинской практике при мониторинге электрокардиосигнала практически обязательным является использование многоканальных систем регистрации.

Значительный вклад в теорию обработки электрокардиосигнала внесли известные ученые К.В. Зайченко, А.Н. Калиниченко, Л.А. Манило, О. В. Мельник, А.П. Немирко, Т. Л. Сушкова, Y. Goletsis, S. Murugan, C. Papaloukas, J. Park, H. Rabbani, R. Silipo и др.

Несмотря на большое количество исследований, остаётся открытым вопрос о разработке автоматизированных методов анализа многоканальных записей ЭКС в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки. Следует отметить, что создание автоматизированных алгоритмов анализа многоканальных электрокардиограмм сдерживается сложностью модели совместного изменения электрокардиосигнала в различных каналах, необходимостью учёта совместного влияния шумов, в том числе и коррелированных между собой в различных отведениях.

Решение этих проблем требует новых методов и программных средств обработки многоканальных записей ЭКС.

Целью диссертационной работы является разработка метода и программного комплекса для обработки многоканальных записей электрокардиосигнала, обеспечивающих повышенную помехоустойчивость при выявлении эпизодов ишемии миокарда.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать корреляционные связи миографической помехи между различными отведениями электрокардиосигнала.

2. Разработать многомерную модель изменения электрокардиосигнала в различных отведениях при развитии эпизодов ишемии миокарда, в том числе описывающую воздействие миографической помехи.

3. Найти оценку средней мощности миографической помехи в различных отведениях для задачи обработки многоканальных записей электрокардиосигнала.

4. Разработать помехоустойчивый алгоритм автоматизированного выявления эпизодов ишемии миокарда на основе анализа многоканальных записей электрокардиосигнала.

5. Разработать программный комплекс для реализации предложенных алгоритмов обработки электрокардиосигнала.

6. Провести экспериментальную апробацию предложенных алгоритмов обработки электрокардиосигнала.

Методы исследования. При выполнении работы были использованы методы математической статистики и теории вероятностей, методы теории принятия решений, методы математического анализа, методы матричного анализа, методы математического моделирования, методы объектно-ориентированного программирования.

Новые научные результаты.

1. Учёт выявленных корреляционных связей миографической помехи между различными отведениями регистрации электрокардиосигнала позволяет повысить точность оценок средней мощности миографической помехи (в различных отведениях) и помехоустойчивость алгоритмов выявления эпизодов ИБС.

2. Многомерная модель электрокардиосигнала, учитывающая совместное изменение электрокардиосигнала и коррелированность шумовых отсчётов в различных отведениях, позволяет описать взаимосвязи, в том числе и синхронные изменения электрокардиосигнала, между различными отведениями ЭКГ как при развитии эпизодов ишемии миокарда, так и для нормального состояния больного ИБС. Предложенная модель является основой для синтеза помехоустойчивого алгоритма автоматизированного выявления эпизодов ишемии миокарда.

3. Алгоритм нахождения совместных оценок средней мощности миографической помехи в различных отведениях электрокардиосигнала позволяет учесть влияние миографической помехи во всех отведениях и использовать для повышения эффективности выявления эпизодов ишемии миокарда решающее правило с адаптивной решающей статистикой и с адаптивным порогом сравнения.

4. Помехоустойчивый алгоритм автоматизированного выявления эпизодов ишемии миокарда, отличающийся использованием информации о развитии данной патологии, сосредоточенной в смежных отведениях электрокардиосигнала, с учетом влияния миографической помехи, позволяет повысить точность диагностики ишемической болезни сердца в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки.

Практическую значимость работы заключается в получении результатов для разработки программного комплекса обработки многоканальных записей электрокардиосигнала с целью автоматизированного выявления эпизодов ишемии миокарда, реализующего разработанные автором методы и подходы.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

1. При разработке помехоустойчивых алгоритмов автоматизированного выявления эпизодов ишемии миокарда необходимо использовать многомерную модель изменения электрокардиосигнала, которая должна учитывать динамические изменения сигнала при развитии эпизодов ишемии, а также проявление миографической помехи в различных отведениях электрокардиосигнала.

2. Нахождение совместных оценок средней мощности миографической помехи в различных отведениях электрокардиосигнала позволяет уменьшить дисперсию данных оценок.

3. Для повышения помехоустойчивости алгоритма автоматизированного выявления эпизодов ишемии миокарда необходимо использовать информацию о развитии данной патологии, сосредоточенную в смежных отведениях электрокардиосигнала, с учетом влияния миографической помехи.

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, содержащихся в работе, подтверждается соответствием полученных выражений результатам математического моделирования, соответствия характеристик обнаружения, полученных на основе обработки архивных записей электрокардиосигнала, результатам, представленным в мировой литературе и экспертным оценкам.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (СПб, 2015–2018 гг.), конференция Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова (СПб, 2013–2016 гг.), 1st Russian-Germany conference on biomedical engineering (1-я Российско-Немецкая конференция по биомедицинской инженерии), 2nd Russian-Germany conference on biomedical engineering (2-я Российско-Немецкая конференция по биомедицинской инженерии), XVI Научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных (2013, СПб), Национальный медицинский инновационный форум «Медицина XXI века – интеграция знаний на перекрестке наук» (СПб, 2018 г.), XIII Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2018) (Суздаль, 2018 г.)

Внедрение результатов работы.

Основные результаты работы получены в процессе выполнения НИР, в рамках

- базовой части государственного задания в сфере научной деятельности № 8.7130.2017/БЧ по теме «Теория создания и моделирования когнитивных технологий формирования и обработки информационных потоков в перспективных радиоэлектронных системах инфокоммуникации, локации и навигации», 2017-2019 г.;

- проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 8.324.2014/К «Оптимизация технологий контроля и управления состоянием

объектов и сред различной физической природы на основе системного анализа», 2014-2016 г.;

- гранта РФФИ № 16-38-00738 «Разработка технологий автоматизированного выявления ранних стадий патологических изменений состояния сердечно-сосудистой системы человека на основе совместного анализа биомедицинских сигналов различной физической природы» (рук. Григорьев Е. Б.);

- гранта фонда содействия инновациям по программе «Умник» №11745ГУ/2017 «Разработка системы автоматизированного выявления патологических изменений состояния сердечно-сосудистой системы человека»;

- гранта фонда содействия инновациям по программе «Старт» № С1 – 06860 «Разработка автоматизированной системы защиты миокарда человека от ишемического повреждения».

Разработанный в рамках исследования метод обнаружения эпизодов ишемии миокарда внедрен в лечебный процесс ПСПбГМУ им. акад. И.П. Павлова. Разработанные алгоритмы анализа многомерных записей электрокардиосигнала использованы при создании опытного образца аппаратно-программного комплекса экспресс оценки состояния сердечно-сосудистой системы «Кардиоскрин» (совместная разработка СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и ООО «Научные приборы»).

Публикации. По итогам диссертационной работы было опубликовано 18 научных работ, среди которых 4 научные статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 4 статьи были опубликованы в зарубежных изданиях, индексируемых в базах WoS и Scopus, 6 свидетельств программ ЭВМ, 4 – статьи, опубликованные в других изданиях и материалах конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 102 наименований и 2 приложения. Основная часть работы изложена на 133 страницах. Работа содержит 51 рисунок и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, приведены новые научные результаты, используемые методы исследования, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту, описана степень достоверности и апробация результатов работы. Приведено краткое содержание работы.

В первой главе приведено описание электрофизиологических процессов, протекающих при развитии эпизода ишемии миокарда. На основе анализа медицинской литературы и клинических рекомендаций определены основные комбинации отведений, в которых одновременное выявление ишемических изменений сегмента ST трактуется как появление ишемии миокарда (грудные отведения V1 – V2, V2 – V3, V3 – V4, V4 – V5, V5 – V6, отведения от конечностей II – III, I – aVL, II – aVF, III – AVF).

Приводится анализ основных проблем, возникающих при мониторинге за пациентами с ишемической болезнью сердца в условиях активной жизнедеятельности, в том числе дано описание основных факторов, затрудняющих анализ многоканальных записей электрокардиосигнала, с учётом которых была сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Вторая глава посвящена построению многомерной модели ЭКС, которая является фундаментом при разработке алгоритма выявления эпизодов ишемии миокарда на основе анализа многоканальных записей ЭКС, отличающегося повышенной помехозащищённостью. Предложенная математическая модель наблюдаемого ЭКС в i -ом отведении $y^{(i)}(q)$ (q – номер отсчёта) учитывает аддитивное влияние миографической помехи $n^{(i)}(q)$, а также отражает изменения электрокардиосигнала на сегменте ST при развитии эпизодов ишемии миокарда, которые описываются полиномом второго порядка с коэффициентами $b_j, \Delta b_j$, изменяющимися по линейному закону:

$$S_{ST_k}(q) = (b_2 + k\Delta b_2)q^2 + (b_1 + k\Delta b_1)q + (b_0 + k\Delta b_0), \quad (1)$$

где k – номер кардиоцикла с момента начала смещения сегмента ST.

Предполагается, что другие виды помех, например, дрейф изоэлектрической линии, были устранены на этапе предварительной обработки.

В большинстве литературных источников рассматривается одноканальная математическая модель миографической помехи, которая представляет собой нормальный широкополосный процесс с нулевым средним значением. Вопрос же построения модели, описывающей миографическую помеху, присутствующую одновременно в нескольких отведениях, остается открытым. Исследование по данной проблематике в диссертационной работе основывается на анализе зашумлённых фрагментов суточных мониторограмм пациентов, полученных с помощью двенадцати канального кардиомонитора «КАРДИОТЕХНИКА-07-3/12» фирмы «Инкарт», которые были предоставлены ПСПбГМУ им. акад. И.П. Павлова.

Для выделения миографической помехи $n^{(i)}(q)$ из записи наблюдаемой реализации электрокардиосигнала $y^{(i)}(q)$ предложен метод, основанный на оценке истинной формы ЭКС $\hat{S}^{(i)}(q)$ в каждом отведении с помощью аппроксимации полиномами второй степени небольших фрагментов ЭКС $\hat{S}_k^{(i)}(q) = \hat{b}_{2,k}^{(i)}q^2 + \hat{b}_{1,k}^{(i)}q + \hat{b}_{0,k}^{(i)}$ (рис. 1а), где оценки коэффициентов полинома \hat{b} находятся методом наименьших квадратов.

Кроме того, осуществляется процедура весового усреднения перекрывающихся аппроксимационных кривых в скользящем окне

$$\hat{S}(q) = \sum_{x=1}^l \beta_x \hat{S}_{q-x+1}(x), \quad \text{где } \beta_x \text{ – весовые коэффициенты, обеспечивающие}$$

минимальное значение дисперсии $D\{\hat{S}(q)\}$, находящиеся путём решения задачи квадратичного программирования с одним ограничением (рис. 1б).

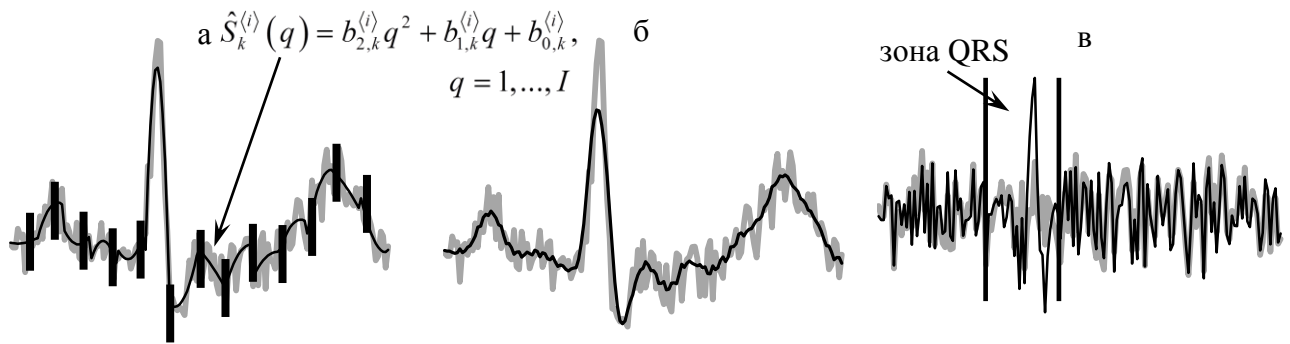


Рисунок 1 – Пример оценки истинной формы ЭКС (а-б) и оценки миографической помехи (в)

Вычитая оценку истинной формы ЭКС $\hat{S}^{(i)}(q)$ из наблюдаемой реализации электрокардиосигнала $y^{(i)}(q)$, становится возможным выделить миографическую помеху $\hat{n}^{(i)}(q) = y^{(i)}(q) - \hat{S}^{(i)}(q)$. Наибольшая ошибка при определении миографической помехи возникает в области нахождения QRS комплекса (рис. 1в), в связи с чем, при дальнейшем исследовании статистических свойств миографической помехи, отсчёты лежащие в зоне QRS комплекса отбрасываются из рассмотрения.

Были получены усреднённые значения выборочного коэффициента корреляции между отсчётами многоканальной миографической помехи, выделенной из мониторограмм с частотой дискретизации 1000 Гц, зарегистрированных у 15 пациентов и 10 здоровых испытуемых в условиях стационара ПСПБГМУ им. акад. И.П. Павлова (рис. 2).

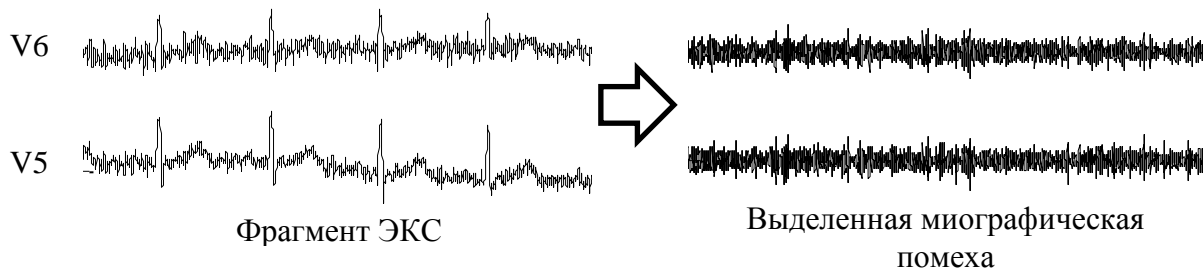


Рисунок 2 – Зашумлённые фрагменты ЭКС (слева) и результат выделения миографической помехи (справа)

Было установлено, что выборочное значение коэффициента корреляции

$$\hat{r} = \sum_{q=1}^N \hat{n}^{(i)}(q) \hat{n}^{(j)}(q) \left(\sum_{q=1}^N (\hat{n}^{(i)}(q))^2 \sum_{q=1}^N (\hat{n}^{(j)}(q))^2 \right)^{-1/2}$$

можно считать несмещённой оценкой, т.е. $m\{\hat{r}\} \cong \rho$ (где ρ – истинное значение коэффициента корреляции) при использовании количества отсчётов $N > 100$.

Установлено, что между отсчётами миографической помехи из смежных отведений присутствует значимая корреляционная взаимосвязь (табл. 1), зависящая от вида физической нагрузки.

Проведенные исследования показали, что совместные кумулянтные коэффициенты (определяющиеся как $\gamma_{p_1, p_2}^{\xi_1, \xi_2} = \frac{\chi_{p_1, p_2}^{\xi_1, \xi_2}}{\sigma_{\xi_1}^{p_1} \sigma_{\xi_2}^{p_2}}$, где $\chi_{p_1, p_2}^{\xi_1, \xi_2}$ – кумулянт двумерного распределения, σ_{ξ_1} – среднеквадратическое отклонение (СКО) случайной величины ξ_1) отсчётов миографической помехи из двух смежных

отведений третьего и четвёртого порядков близки к нулю, а также имеет место схожесть форм эмпирических и теоретических двумерных плотностей вероятностей (рис. 3).

Таблица 1 – Значения выборочного коэффициента корреляции между отсчётами миографической помехи в грудных отведениях ЭКС

Отв.	V1	V2	V3	V4	V5	V6
V1	1,00	0,82	0,64	0,72	0,74	0,76
V2	0,82	1,00	0,65	0,74	0,75	0,76
V3	0,64	0,65	1,00	0,71	0,66	0,65
V4	0,72	0,74	0,71	1,00	0,84	0,79
V5	0,74	0,75	0,66	0,84	1,00	0,86
V6	0,76	0,76	0,65	0,79	0,86	1,00

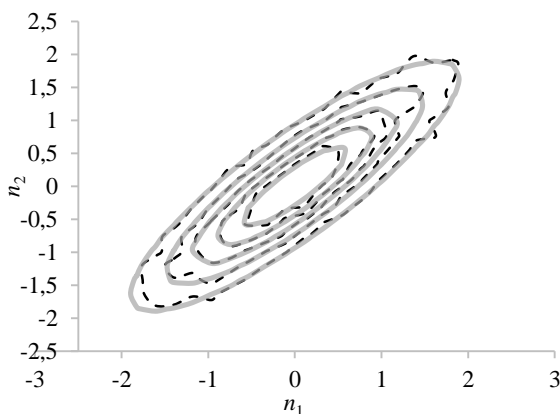


Рисунок 3 – Линии одинакового уровня совместной плотности вероятности между отсчётами шума из отведений V5 – V6

На основании полученных экспериментальных результатов была построена статистическая модель миографической помехи, в соответствии с которой, отсчёты миографической помехи принадлежащих одному кардиоциклу, из двух смежных отведений ЭКС представляют собой многомерный нормальный случайный вектор $\mathbf{n} = (\mathbf{n}(1), \mathbf{n}(2), \dots, \mathbf{n}(N))^T$, где $\mathbf{n}(q) = (n^{(1)}(q), n^{(2)}(q))^T$ – отсчёты шума в один и тот же момент времени из смежных отведений:

$$w(\mathbf{n}) = \prod_{q=1}^N \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^2 \det(\mathbf{K})}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{n}(q))^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{n}(q)\right),$$

где $\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & K_{12} \\ K_{21} & \sigma_2^2 \end{pmatrix}$, $K_{12} = K_{21} = m \{n^{(1)}(q)n^{(2)}(q)\}$ – ковариация между отсчётами шума из двух рассматриваемых отведений ЭКС в один и тот же момент времени, $D\{n^{(i)}(q)\} = \sigma_i^2$ – дисперсия миографической помехи в i -ом отведении, значение которой остаётся постоянным на протяжении всего рассматриваемого кардиоцикла.

Третья глава посвящена построению помехоустойчивого алгоритма обнаружения эпизодов ишемии миокарда на основе обработки многоканальных записей ЭКС. Для построения данного алгоритма необходимо производить учёт средней мощности шума, присутствующего в каждом канале ЭКС. С учётом наличия корреляционных взаимосвязей между отсчётами миографической помехи на основе метода максимального правдоподобия найдены совместные оценки средней мощности миографической помехи

$$\hat{\sigma}_1^2 = \frac{1}{N(\rho^2 - 1)} \left(\rho B \sqrt{\frac{A}{C}} - A \right), \quad \hat{\sigma}_2^2 = \frac{1}{N(\rho^2 - 1)} \left(\rho B \sqrt{\frac{C}{A}} - C \right),$$

где $A = \sum_{q=1}^N (n^{(1)}(q))^2$, $B = \sum_{q=1}^N n^{(1)}(q)n^{(2)}(q)$, $C = \sum_{q=1}^N (n^{(2)}(q))^2$, ρ – истинное значение коэффициента корреляции между отсчётами шума из рассматриваемых отведений.

Использование оценки коэффициента корреляции вместо истинного значения коэффициента корреляции ρ приводит к ухудшению качества оценок.

На рис. 4 показано отношение СКО одноканальной оценки $\sigma_n^2 = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N (\hat{n}(q))^2$ к

СКО совместных оценок дисперсии шума от истинного значения коэффициента корреляции ρ . При расчёте оценок дисперсии использовалось $N = 100$ отсчётов, а для оценки коэффициента корреляции использовалось $N_\rho = KN$ отсчётов, где $K = 1, 2, 5, 8, 10$. Количество испытания составляло $3 \cdot 10^4$.

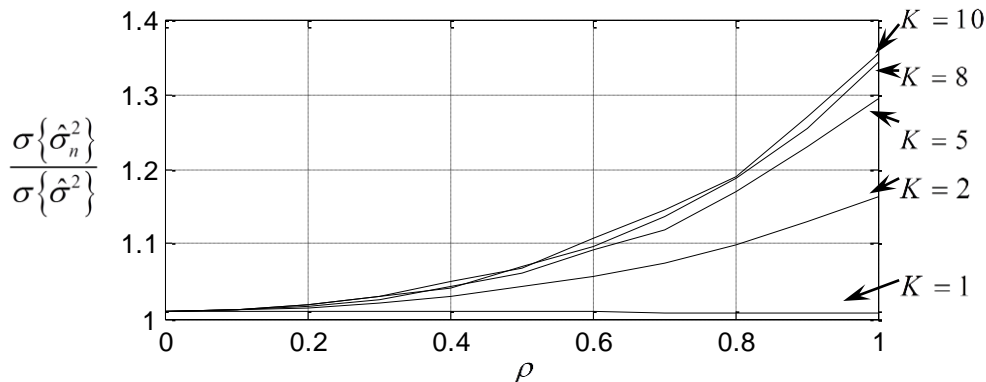


Рисунок 4 – Зависимость отношения СКО одноканальной оценки к СКО совместных оценок от истинного значения коэффициента корреляции ρ

Из рисунка 4 следует, что использование совместных оценок средней мощности миографической помехи позволяет уменьшить дисперсию данных оценок по сравнению с одноканальными оценками. Причём для достижения данного результата для нахождения оценки коэффициента корреляции достаточно использовать выборку в 5 раз большую, чем при расчёте оценки средней мощности.

Построение помехоустойчивого алгоритма выявления эпизодов ишемии миокарда основывается на разработанной статистической модели ЭКС, в соответствии с которой наблюдаемая реализация ЭКС представляет собой аддитивную смесь “истинного” (незашумлённого) электрокардиосигнала и миографической помехи. Кроме того, считается, что известны моменты начала и окончания ST-сегментов для всех кардиоциклов.

Задача обнаружения ишемии миокарда сводится к задаче проверки сложных гипотез:

– H_0 – ишемия миокарда отсутствует, т.е. смещения ST-сегмента в точке J60/J80 за наблюдаемый интервал времени (за M кардиоциклов) не достигает диагностически значимой величины Π_{ST} : $S_{ST_k}(q_{ST_k}) < \Pi_{ST}$, где q_{ST_k} – момент

времени, соответствующий точке J60/J80 для k -го кардиоцикла (рис. 5);

– H_1 – в результате развития эпизода ишемии миокарда смещение ST-сегмента (в точке J60/J80) достигло или превысило пороговую величину Π_{ST} , строго определяемую клиническими рекомендациями т.е. $S_{ST_k}(q_{ST_k}) \geq \Pi_{ST}$.

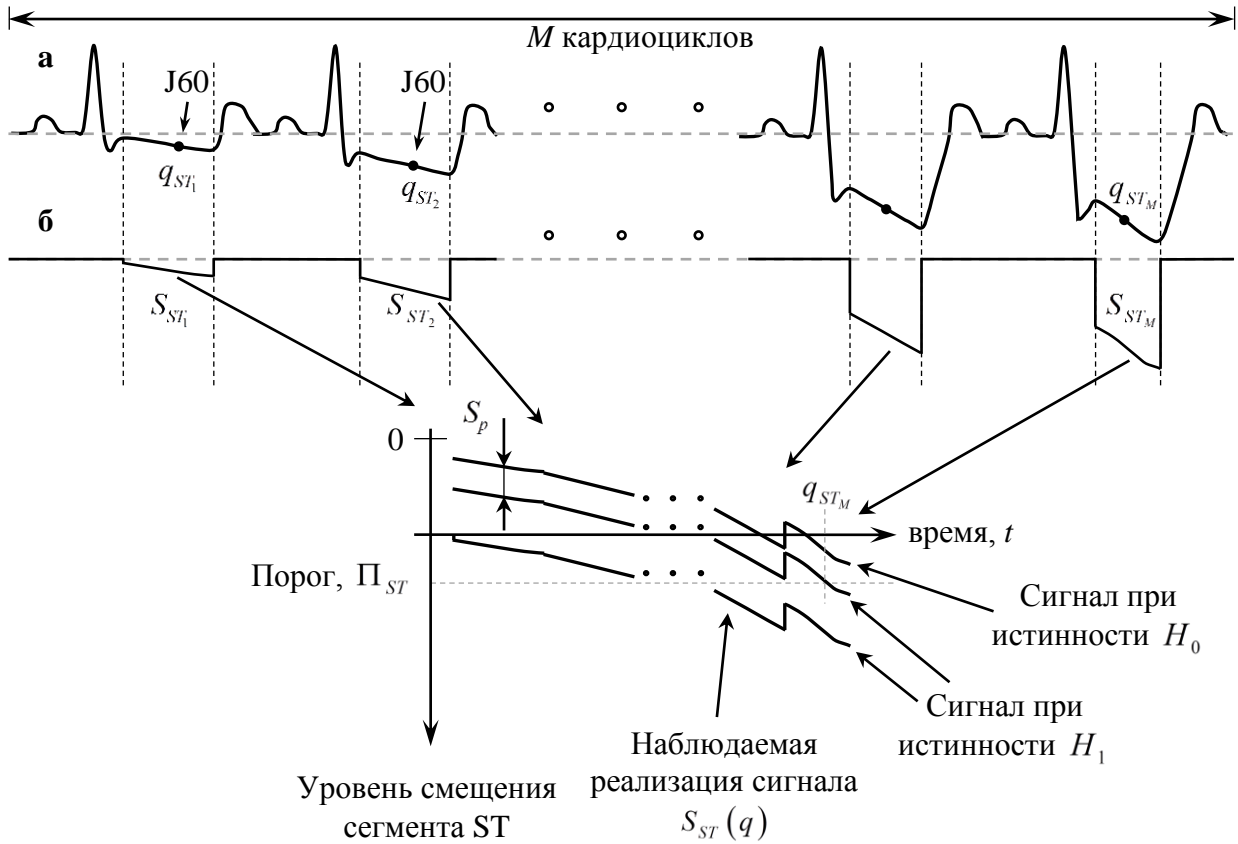


Рисунок 5 – Схематичное представление процесса формирования сигналов для задачи обнаружения эпизода ишемии миокарда

Наихудшие случаи для различения гипотез H_0 и H_1 , в смысле получения наибольших значений вероятностей ложной тревоги и пропуска сигнала, будут при достижении сигналом (1) значений, близких к пороговой величине Π_{ST} , при удалении от которой показатели качества обнаружения будут увеличиваться.

В диссертационной работе под оптимальным обнаружителем понимается обнаружитель, обеспечивающий заданную вероятность правильного обнаружения эпизода ишемии миокарда при заданной вероятности ложной тревоги. Данным условиям будет удовлетворять обнаружитель, использующий два порога, т.е. обнаружитель с требуемыми показателями качества будет выдавать решения о наличии либо отсутствии эпизода ишемии миокарда. В тоже время возможна ситуация, при которой значение решающей статистики будет находиться между порогами, при этом обнаружитель не сможет вынести решение ни в одну из сторон. В случае наступления такого события принимается решение о необходимости проведения дополнительного обследования пациента с применением иных методов диагностики.

Таким образом, изначальную задачу различения сложных гипотез H_0 и H_1 можно свести к задаче проверки простых гипотез: различению двух сигналов –

сигнала $S_{дк}(q)$, соответствующего предкритической ишемизации миокарда (далее называемого докритическим сигналом) и сигнала $S_{крк}(q)$, соответствующего критической ишемизации миокарда (далее называемого критическим сигналом), т.е. под критическим сигналом $S_{крк}(q)$ понимается сигнал вида (1), для которого в точке J60/J80 (обозначенной q_{ST_M}) M -го кардиоцикла выполняется равенство $S_{ST_k}(q_{ST_k}) > \Pi_{ST}$ (при депрессии сегмента ST), а под докритическим сигналом $S_{дк}(q)$ понимается сигнал $S_{дк}(q) = S_{крк}(q) - S_p$ (сигнал, который не достиг порогового значения Π_{ST} на величину S_p , называемую разностным сигналом).

Решающее правило обнаружения эпизода ишемии миокарда находится на основании отношения правдоподобия. В результате решающая статистика равна

$$Z = \sum_{k=1}^M \sum_{q=1}^{N_k} \sum_{i=1}^2 I_{k,i} \left(y_{ST_k}^{(i)}(q) - \hat{S}_{дк}^{(i)}(q) \right), \quad \text{где } I_{k,i} \text{ — коэффициенты, зависящие от}$$

элементов обратной ковариационной матрицы шума. Решающая статистика Z

распределена по нормальному закону со средним значением $m\{Z\} = \sum_{k=1}^M \sum_{q=1}^{N_k} \sum_{i=1}^2 I_{k,i} u S_p$

$$\text{и дисперсией } D\{Z\} = \sum_{k=1}^M \sum_{q=1}^{N_k} \left[\sum_{i=1}^2 \left(\sigma_k^{(i)} H_{k,q,i} \right)^2 + 2\rho_k \sigma_k^{(1)} \sigma_k^{(2)} H_{k,q,1} H_{k,q,2} \right], \quad \text{где } \rho_k \text{ —}$$

значение коэффициента корреляции между отсчётами шума из двух отведений в один момент времени при наблюдении k -го кардиоцикла.

Решение о наличии либо отсутствии эпизода ишемии миокарда принимается в соответствии со следующим правилом:

- при депрессии сегмента ST: $Z \leq C_{п}'$ — ишемия есть, $Z \geq C_{п}''$ — ишемия отсутствует, $C_{п}' < Z < C_{п}''$ — необходимо дополнительное исследование;
- при элевации сегмента ST: $Z \geq C_{п}'$ — ишемия есть, $Z \leq C_{п}''$ — ишемия отсутствует, $C_{п}'' < Z < C_{п}'$ — необходимо дополнительное исследование.

Значение порогов $C_{п}'$ и $C_{п}''$ определяется исходя из заданной вероятности ложной тревоги и пропуска эпизода ишемии миокарда.

На рисунке 6 показана структурная схема алгоритма выявления эпизодов ишемии миокарда.

В четвёртой главе приведена практическая реализация и экспериментальная апробация программного комплекса для автоматизированного выявления эпизодов ишемии миокарда.

Внешний вид главного диалогового окна программного комплекса показан на рисунке 7, а соответствующая последовательность действий, реализуемых программным комплексом для выявления эпизодов ишемии приведена на рисунке 8.



Рисунок 6 – Структурная схема алгоритма выявления эпизодов ишемии миокарда

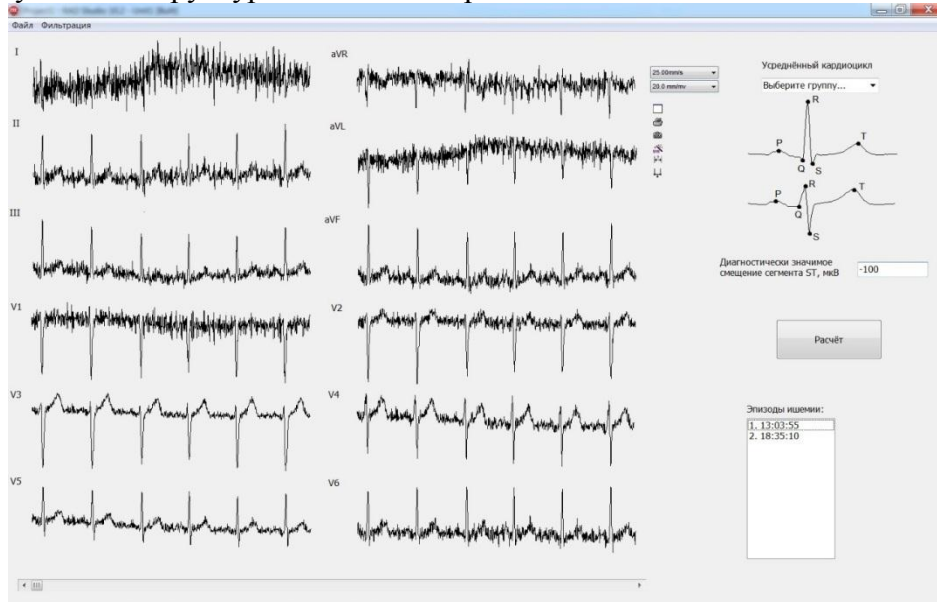


Рисунок 7 – Главное диалоговое окно программного комплекса

После открытия и чтения файла с записью ЭКС осуществляется предварительная обработка электрокардиосигнала с целью уменьшения дисперсии шумов. Дальнейшее обнаружение R-зубцов позволяет определить границы кардиоциклов, после чего произвести сортировку по группам норма/патология, а также получить усреднённые кардиоциклы, на основе которых производится разметка ЭКС и в частности определяются границ ST-сегментов.

Также осуществляется расчёт дисперсии миографической помехи и коэффициента корреляции, используемых в алгоритме выявления эпизодов ишемии миокарда, выполнение которого осуществляется на заключительном этапе обработки.

Апробация предложенных в диссертационной работе методов и алгоритмов обработки ЭКС проводилась с помощью имитационного (тестового) электрокардиосигнала и на основе верифицированных записей электрокардиосигнала из архивных баз данных.



Рисунок 8 – Последовательность выполнения функциональных блоков программного обеспечения

На рисунке 9 показаны вероятности правильного обнаружения эпизода ишемии миокарда (кривые 1), вероятности правильного необнаружения эпизода ишемии миокарда (кривые 2) и вероятности непринятия решения о наличии или отсутствии эпизода ишемии миокарда (кривые 3) при использовании двухпорогового алгоритма обнаружения. Сплошными светлыми линиями показаны результаты аналитического расчёта, сплошными тёмными линиями отображаются результаты компьютерного моделирования с использованием истинных значений элементов ковариационной матрицы шума, штриховые линии – результат компьютерного моделирования с использованием оценок элементов ковариационной матрицы шума, пунктирные линии – результат компьютерного моделирования с использованием оценок ковариационной матрицы и учётом ошибок, связанных с процедурой устранения дрейфа изоэлектрической линии.

Порог C_{π}' был выбран исходя из вероятности ложной тревоги, равной 0,001, а порог C_{π}'' – исходя из вероятности пропуска сигнала, равной 0,05. Критический

уровень ишемизации миокарда составлял -100 мкВ, количество одновременно анализируемых ST-сегментов составляло $M = 50$ кардиоциклов. Количество испытаний при моделировании было равно 5000.

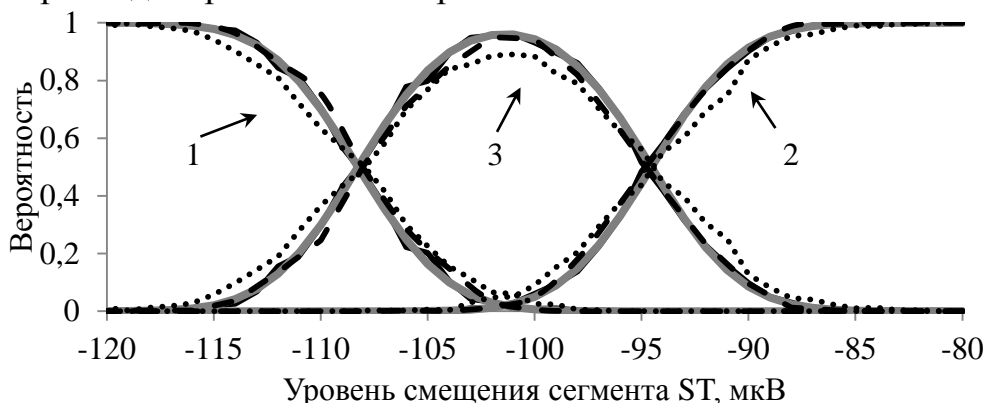


Рисунок 9 – Вероятности правильного обнаружения эпизода ишемии миокарда (кривые 1), правильного необнаружения (кривые 2) и отсутствия принятия однозначного решения (кривые 3).

Теоретические кривые практически совпадают с результатами моделирования (отклонение не более 5% от аналитических расчётов). Использование вместо истинных значений элементов ковариационных матриц шума их оценок незначительно ухудшает качественные характеристики обнаружения. Самое заметное влияние оказывает дополнительное смещение ST-сегментов, возникающее при удалении дрейфа изоэлектрической линии.

Клиническая апробация предложенных алгоритмов обработки электрокардиосигнала с целью выявления эпизодов ишемии миокарда в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки, а также их сравнение с лучшими из существующих алгоритмов, представляла собой обработку 142 фрагментов мониторограмм (длительностью от полутора до десяти минут) 96 пациентов в возрасте $58,64 \pm 11,1$ лет (в том числе 37 женщин и 59 мужчин) из которых 49 человек имели доказанную ишемическую болезнь сердца, подтвержденную данными стресс-эхокардиографических исследований. Фрагменты были подвержены воздействию помех, содержали артефакты и были исключены экспертами из анализа ввиду невозможности визуально определить наличие или отсутствие диагностически значимого смещения сегмента ST, при расшифровке мониторограмм. Имеющиеся записи ЭКС были проанализированы с использованием разработанного алгоритма.

В итоге апробация алгоритма показала, что 68 фрагментов мониторограмм, соответствующих группе здоровых, были правильно отнесены к своей группе, т.е. $Sp = 0,957$. 65 фрагментов мониторограмм, соответствующих группе больных ИБС, также были правильно определены ($Se = 0,915$). Для одной записи из группы здоровых и 6-ти записей из группы больных алгоритмом было выработано решение о необходимости проведения дальнейших углубленных исследований на предмет выявления наличия или отсутствия ишемии миокарда с применением иных методов диагностики (стресс-эхо, сцинтиграфия миокарда, коронарография) с учётом клинических данных (например, анализ субъективных ощущений больного).

Таким образом, результаты апробации, приведённые в данной главе, показывают возможность использования разработанного помехоустойчивого

автоматизированного алгоритма выявления эпизода ишемии миокарда для анализа сильно зашумленных записей электрокардиосигнала.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан метод выделения миографической помехи из наблюдаемой реализации электрокардиосигнала, который базируется на нахождении оценки истинной формы электрокардиосигнала с помощью полиномиальной аппроксимации небольших фрагментов ЭКС с последующим весовым усреднением аппроксимирующих кривых.

2. На основе анализа фрагментов многоканальной миографической помехи (выделенных из мониторограмм) было установлено, что совместная функция распределения миографической помехи для комбинаций отведений ЭКС является многомерным нормальным распределением.

3. Установлено наличие корреляционных взаимосвязей между отсчётами миографической помехи для различных отведений электрокардиосигнала, причем для некоторых смежных отведений выборочный коэффициент корреляции между отсчетами миографической помехи достигал величины 0,7, что свидетельствует о необходимости учета данных взаимосвязей при обработке ЭКС.

4. Разработана статистическая модель миографической помехи, учитывающая корреляционные взаимосвязи между отсчётами шума из различных отведений ЭКС. Разработана модель изменения электрокардиосигнала, в соответствии с которой при развитии эпизода ишемии миокарда в определённых комбинациях отведений ST-сегмент может быть описан с помощью полинома второго порядка, причём изменение коэффициентов данного полинома носит линейный характер.

5. Найдены совместные оценки средней мощности миографической помехи при многоканальной обработке ЭКС, которые учитывают коррелированность шумовых отсчётов в смежных отведениях электрокардиосигнала.

6. Разработан двухпороговый помехоустойчивый алгоритм выявления эпизодов ишемии миокарда, основанный на совместном анализе наблюдаемых последовательностей из ST-сегментов в смежных отведениях ЭКС с учётом корреляционных взаимосвязей и оценок средней мощности миографической помехи (присутствующей в данных отведениях).

7. Разработан программный комплекс, реализующий предложенные методы и алгоритмы обработки электрокардиосигнала. Основное назначение программного комплекса заключается в выявлении эпизодов ишемии миокарда в сильно зашумлённых фрагментах многоканальных записей ЭКС.

8. На основе имитационных, а также на основе архивных верифицированных записей ЭКС проведена экспериментальная апробация предложенных алгоритмов обработки электрокардиосигнала и программного комплекса в целом. Результаты апробации свидетельствуют о возможности использования предложенных методов и алгоритмов обработки электрокардиосигнала и разработанного программного комплекса для анализа сильнозашумленных записей электрокардиосигнала.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Григорьев, Е. Б. Оценка отношения сигнал/помеха при обработке электрокардиосигнала / А. С. Красичков, Е. Б. Григорьев, А. А. Соколова, А. А. Федоров // Биотехносфера. – 2012. – №3-4. – С. 116–118.
2. Григорьев, Е. Б. Характеристики оценки дрейфа изоэлектрической линии кардиосигнала при анализе длительных мониторограмм / А. С. Красичков, Е. Б. Григорьев, В. Н. Михайлов, М. А. Шевченко // Известия ВУЗов России – Радиоэлектроника. – 2013. – №3. – С. 44-48.
3. Григорьев, Е. Б. Система персонального мониторинга и дистанционной диагностики состояния здоровья пациента на основе стандарта беспроводной связи ZigBee/ А. П. Аникин, А. С. Красичков, Е. Б. Григорьев, А. И. Виноградов, Е. И. Железняк // Известия ВУЗов России – Радиоэлектроника. – 2013. – №3. – С. 23-29.
4. Григорьев, Е. Б. Оценка статистических характеристик миографической помехи при многоканальной регистрации электрокардиосигнала / Е. Б. Григорьев, А. С. Красичков, Е. М. Нифонтов. // Известия ВУЗов России – Радиоэлектроника. – 2018. – № 6. – С. 118-125.

Статьи, опубликованные в зарубежных изданиях, включённых в системы цитирования Scopus и Web Of Science:

5. Григорьев, Е. Б. Влияние миографической помехи и дрейфа изоэлектрической линии на коэффициент корреляции при классификации кардиокомплексов / А. С. Красичков, Е. Б. Григорьев, Е. М. Нифонтов // Медицинская техника. – 2015. – №4. – С. 23-26.
6. Grigoriev, E. B. Shape anomaly detection under strong measurement noise: An analytical approach to adaptive thresholding / A. S. Krasichkov, E. B. Grigoriev, M. I. Vogachev, E. M. Nifontov // Physical Review E. – 2015. – Т.92. – №4. – Р. 1-9.
7. Григорьев, Е. Б. Алгоритм обнаружения и сортировки кардиокомплексов в задаче обработки данных длительного мониторинга кардиосигнала / А. С. Красичков, Е. Б. Григорьев, Е. М. Нифонтов, В. В. Шаповалов // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2016. – Т.50. – №.6. – С. 70-78.
8. Григорьев, Е. Б. Оценка допустимых границ выборочного коэффициента взаимной корреляции в задаче классификации кардиокомплексов / А. С. Красичков, Е. Б. Григорьев, Е. М. Нифонтов, В. В. Шаповалов. // Медицинская техника. – 2017. – №6. – С. 10-13.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

9. Григорьев, Е. Б. Программа анализа и представления данных для терминала беспроводного кардиоанализатора: программа для ЭВМ №2018610469 Рос. Федерация / Е. Б. Григорьев, А. С. Красичков, А. И. Степанов, В. В. Шаповалов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – № 2017661692; заявл. 14.11.2017; опубл. 11.01.2018.
10. Григорьев, Е. Б. Программа оценки уровня миографической помехи и отношения шум/сигнал для задач обработки мониторограмм: программа для ЭВМ №2013613664 Рос. Федерация / Е. Б. Григорьев, А. С. Красичков; заявитель и

патентообладатель ФГБОУ ВПО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – № 2013611378; заявл. 26.02.2013; опубл. 20.06.2013.

11. Григорьев, Е. Б. Программный комплекс сопряжения носимого кардиомонитора Alive с мобильным устройством под управлением ОС Android по протоколу Bluetooth: программа для ЭВМ №2015611775 Рос. Федерация / Е. Б. Григорьев, А. С. Красичков, А. И. Степанов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – № 2014662766; заявл. 10.12.2014; опубл. 20.03.2015.

12. Григорьев, Е. Б. Программный комплекс преобразования формата данных ЭКГ и сопутствующих данных принимаемых от носимого кардиомонитора: программа для ЭВМ №2015611191 Рос. Федерация / Е. Б. Григорьев, А. С. Красичков, А. И. Степанов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – № 2014663082; заявл. 10.12.2014; опубл. 20.02.2015.

13. Григорьев, Е. Б. Программный комплекс импорта-экспорта данных мониторинга ЭКГ на устройстве под управлением ОС Android: программа для ЭВМ №2015611776 Рос. Федерация / Е. Б. Григорьев, А. С. Красичков, А. И. Степанов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – № 2014662759; заявл. 10.12.2014; опубл. 20.03.2015.

14. Григорьев, Е. Б. Программный комплекс для визуализации данных, принимаемых от носимого кардиомонитора, на устройствах под управлением ОС Android: программа для ЭВМ №2015611826 Рос. Федерация / Е. Б. Григорьев, А. С. Красичков, А. И. Степанов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – № 2014662764; заявл. 10.12.2014; опубл. 20.03.2015.

Статьи, опубликованные в других изданиях и материалах конференций:

15. Grigoriev, E. B. Evaluation threshold of comparison for the correlation algorithm of sorting cardiocomplexes in a complex signal-jamming environment / E. B. Grigoriev, A. S. Krasichkov, N. Tkachenko // Proceedings of the 1st Russian-Germany conference on biomedical engineering. October 24-26 2013, Hanover, Germany.

16. Grigoriev, E. B. Influence of the cardiocomplex temporary markings accuracy on assessment of the cardio baseline drift in the analysis of long-term ECG / E. B. Grigoriev, A. S. Krasichkov, N. Tkachenko // Proceedings of the 10 Russian-Germany conference on biomedical engineering. June 25-27 2014, Saint-Petersburg, Russia. – P. 79-81.

17. . Григорьев, Е. Б. Оценка влияния миографической помехи и дрейфа изоэлектрической линии на коэффициент корреляции при классификации кардиокомплексов / Е. Б. Григорьев, А. С. Красичков // Труды юбилейной 70-ой всероссийской научно-технической конференции, посвящённой дню Радио. 21-29 апреля 2015. – Том 1. – С. 23-24.

18. Григорьев, Е. Б. Метод оценки помеховой обстановки при многоканальной обработке электрокардиосигнала / Е. Б. Григорьев, А. С. Красичков // Труды XIII международной научной конференции “Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии”. 3-5 июля 2018. – Том 1. – С. 250-254.