

На правах рукописи



**БЛИНОВ ПАВЕЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**АЛГОРИТМЫ УСТРАНЕНИЯ ДРЕЙФА ИЗОЛИНИИ  
ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА НА ОСНОВЕ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЕГО СПЕКТРА**

Специальность: 05.11.17 – Приборы, системы и изделия  
медицинского назначения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

- Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
Михеев Анатолий Александрович
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой радиотехники и медицинских систем Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева, г. Самара  
Калакутский Лев Иванович
- кандидат технических наук, директор научно-технического центра  
ОАО «Елатомский приборный завод», г. Рязань  
Соломаха Валентин Николаевич
- Ведущая организация - ФГБОУ ВПО «Пензенская государственная технологическая академия», г. Пенза

Защита состоится « 14 » октября 2011 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Автореферат разослан « 30 » августа 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Борисов А. Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Сердечно-сосудистые заболевания по статистике занимают первое место среди причин смертности россиян. В связи с этим актуальна задача точной и своевременной диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы. Одним из наиболее распространенных методов диагностики сердечно-сосудистой системы является электрокардиография.

В настоящее время интенсивно развиваются системы автоматической обработки электрокардиосигнала (ЭКС). Достоверность постановки диагноза с помощью этих систем напрямую зависит от точности получаемых исходных кардиологических данных. Неизбежное действие помех на ЭКС искажает эти данные, поэтому при разработке и внедрении высокоэффективных медицинских диагностических систем необходимо предусматривать и разработку средств устранения помех. Создание способов и средств, направленных на повышение качества автоматического анализа ЭКС и достоверности диагностики состояния миокарда, способствует оптимизации лечения заболеваний сердечно-сосудистой системы.

Ограничения на точность кардиологических данных связаны с наличием помех на снимаемом ЭКС. Среди помех, действующих на ЭКС, наиболее трудноустранимой является аддитивная низкочастотная помеха (дрейф изолинии). Это обусловлено тем обстоятельством, что спектр дрейфа изолинии полностью перекрывается со спектром ЭКС. Наличие дрейфа изолинии вносит искажения в амплитудно-временные параметры элементов ЭКС, которые не выявляются при автоматическом анализе электрокардиосигнала.

Таким образом, устранение дрейфа изолинии является одной из ключевых задач при автоматической обработке электрокардиосигнала.

Теоретические и практические аспекты предварительной обработки электрокардиосигнала, включая вопросы выделения и устранения дрейфа изолинии ЭКС, рассмотрены в работах отечественных и зарубежных авторов: Барановского А.Л., Истоминой Т.В., Калакутского Л.И., Михеева А.А., Мельник О.В., Манило Л.А., Ifeachor E.C., Outram N.J., Van Eetvelt P.W.J., Wu J., Allen E.M., Wimalaranta S.K., Rangajan R.M. Как следует из этих работ, наибольшее распространение в настоящее время получили методы устранения дрейфа ЭКС во временной и частотной областях.

Для устранения дрейфа изолинии во временной области используются интерполяционные методы. Они не требовательны к вычислительным затратам, но имеют принципиальные ограничения на частотный диапазон выделяемого дрейфа изолинии. Следует отметить, что погрешность аппроксимации является методической, то есть принципиально неустранимой. При увеличении частоты сигнала помехи ухудшается точность его восстановления, а при достижении половины частоты сердечных сокращений, являющейся частотой дискретизации для сигнала дрейфа изолинии, восстановление становится невозможным в силу невыполнения условия теоремы отсчетов. Применение простых способов интерполяции требует выбора более высокой частоты дискретизации, что следует из теоремы В. А. Котельникова. Получающаяся в результате такой дискре-

тизации последовательность отсчетов с информационной точки зрения обладает определенной избыточностью. В связи с этим реальная частота сигнала дрейфа изолинии, которая может быть устранена, не превышает 0,1-0,2 Гц.

Данных недостатков лишены методы, работающие в частотной области и основанные на фильтрации ЭКС фильтрами верхних частот или фильтрами нижних частот. В первом случае низкочастотная аддитивная помеха отфильтровывается от ЭКС. Во втором случае низкочастотная аддитивная помеха выделяется из смеси ЭКС и помехи и далее вычитается из этой смеси. Из-за перекрывания спектра исходного ЭКС и спектра помехи в обоих случаях неизбежны потери части полезной составляющей спектра ЭКС.

Для исключения этих потерь может быть использовано предварительное преобразование отсчетов ЭКС, взятых на ТР-сегменте, где присутствуют только сигналы помех, в импульсные сигналы сложной формы (ИССФ), которые обеспечивают преобразование спектра сигнала, отделяя его составляющие от составляющих дрейфа изолинии. По этой причине при последующей фильтрации возможно выделение именно сигнала дрейфа изолинии. Однако предложенные в известных работах методы формирования ИССФ с позиции задачи устранения дрейфа изолинии обладают рядом существенных недостатков, связанных с ограничением длительности ТР-сегмента. В силу этого представляет интерес задача разработки алгоритма формирования ИССФ в условиях изменения частоты сердечных сокращений (ЧСС) и действия аддитивной низкочастотной помехи.

Таким образом, разработка более совершенных алгоритмов и средств устранения дрейфа изолинии ЭКС является одной из актуальных задач при создании эффективной медицинской техники, предназначенной для автоматической диагностики в кардиологии.

**Цель диссертационной работы:** повышение эффективности устранения дрейфа изолинии электрокардиосигнала в режиме реального времени без искажения его амплитудно-временных параметров за счет расширения частотного диапазона выделяемого сигнала помехи до частот, достигающих частоты сердечных сокращений, на основе алгоритмов преобразования спектра отсчетов ТР-сегмента.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи.

1. Определение структуры сигналов, сформированных из отсчетов электрокардиосигнала, взятых на ТР-сегменте, обеспечивающей при преобразовании спектра сигнала дрейфа изолинии отделение его от спектра электрокардиосигнала при различной частоте сердечных сокращений.

2. Анализ влияния ограниченной разрядности представления отсчетов электрокардиосигнала на точность преобразования спектра отсчетов исходного электрокардиосигнала с помощью импульсных сигналов сложной формы и соответственно на точность выделения сигнала дрейфа изолинии.

3. Разработка способа и алгоритма формирования в каждом цикле сердечных сокращений опорных отсчетов на ТР-сегменте, предназначенных для

построения импульсных сигналов сложной формы в условиях наличия дрейфа изолинии электрокардиосигнала.

4. Разработка алгоритма устранения дрейфа изолинии на основе преобразования опорных отсчетов электрокардиосигнала на TP-сегменте в импульсные сигналы сложной формы с заданным спектральным составом и последующей их низкочастотной фильтрацией.

5. Разработка аппаратных и программных средств, реализующих предложенные способы и алгоритмы. Экспериментальная проверка предложенных способов и алгоритмов для подтверждения теоретических выводов.

**Методы исследования.** В работе использовались методы спектрального анализа сигналов, цифровой фильтрации и интерполяции, современные алгоритмы цифровой обработки сигналов.

Для подтверждения правильности теоретических выводов проводились экспериментальные проверки теоретических положений с использованием реальных электрокардиосигналов из стандартной базы ЭКГ-данных MIT-BIH Массачусетского технологического института США, пакетов программ имитационного моделирования (MathCAD, MATLAB).

**Научная новизна.** В рамках диссертационной работы получены следующие новые научные результаты.

1. Установлена взаимосвязь структуры импульсных сигналов сложной формы с частотой сердечных сокращений, позволяющая определить количество подавляемых спектральных зон в их спектре, необходимое для выделения дрейфа изолинии с заданной шириной спектра в широком диапазоне изменения частоты сердечных сокращений (40-140 уд./мин), разработан алгоритм формирования ИССФ.

2. Установлена аналитическая зависимость разрядности цифрового представления отсчетов ЭКС на TP-сегменте, образующих ИССФ с заданным спектральным составом, от относительной погрешности выделения дрейфа изолинии, частоты сердечных сокращений и частоты дискретизации ЭКС, позволяющая определять предельные значения разрядности АЦП и регистров МПС для обеспечения заданной точности восстановления дрейфа изолинии.

3. Предложены способ и реализующий его алгоритм формирования опорных отсчетов для построения импульсных сигналов сложной формы на TP-сегменте, основанные на корреляционных свойствах электрокардиосигнала, позволяющие выделять опорные отсчеты при наличии дрейфа изолинии с частотой, достигающей частоты сердечных сокращений.

4. Разработан алгоритм устранения дрейфа изолинии без искажения информативных составляющих ЭКС на основе преобразования спектра группы отсчетов электрокардиосигнала на TP-сегменте, образующих ИССФ с заданными амплитудно-временными и спектральными параметрами, с последующей низкочастотной фильтрацией ИССФ, обеспечивающий расширение частотного диапазона устраняемого дрейфа изолинии до частот сердечных сокращений при погрешности, не превышающей 1 %, и вычислительных затратах, на порядок меньших, чем у известных методов.

**Достоверность.** Достоверность научных положений и выводов подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами модельных экспериментов, подтверждающими эффективность предложенных способов и алгоритмов, а также результатами практического использования программных средств.

**Практическая ценность работы.** Предложенные в работе способы и алгоритмы обеспечивают более точное выделение и устранение дрейфа изолинии электрокардиосигнала при расширении частотного диапазона устраняемого дрейфа (вплоть до ЧСС) без искажений амплитудно-временных параметров ЭКС и могут быть использованы в существующих и вновь разрабатываемых системах автоматической обработки ЭКС, предназначенных для оценки состояния сердечно-сосудистой системы.

Программно-аппаратные решения, реализующие предложенные алгоритмы выделения и устранения дрейфа изолинии электрокардиосигнала, могут быть использованы для повышения эффективности решения исследовательских и практических задач в кардиологии.

**Реализация результатов работы.** Предложенные методы устранения дрейфа изолинии представляют собой основу учебного пособия по курсу «Методы обработки биомедицинских сигналов и данных» и используются в учебном процессе Рязанского государственного радиотехнического университета при подготовке специалистов по направлению 200401 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» и 200402 «Инженерное дело в медико-биологической практике». Результаты работы, касающиеся средств подготовки электрокардиосигналов к обработке в микропроцессорных системах, использованы при выполнении гранта Российского фонда фундаментальных исследований «Теория и проектирование медицинских измерительно-информационных систем на основе нейробионических технологий» (№ 10-08-97525-р\_центр-а, 01.2010) и ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала Высшей школы» по гранту № РНП 2.1.2.6390 от 12.12. 2008 г. Практическая реализация программы устранения дрейфа изолинии ЭКС осуществлена в МУЗ «Ижевская районная больница».

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Аналитическая зависимость между разрядностью цифрового представления амплитудно-временных параметров ИССФ с заданным спектральным составом, относительной погрешностью выделения сигнала дрейфа изолинии, частотой сердечных сокращений и частотой дискретизации ЭКС, позволяющая определять предельные значения разрядности АЦП и регистров МПС для обеспечения заданной точности восстановления дрейфа изолинии.

2. Способ и алгоритм формирования опорных отсчетов для построения импульсных сигналов сложной формы на ТР-сегменте, основанные на корреляционных свойствах кардиосигнала, позволяющие выделять опорные отсчеты при наличии дрейфа изолинии с вероятностью не ниже 0,99.

3. Алгоритм устранения дрейфа изолинии без искажения информативных составляющих ЭКС на основе преобразования спектра группы отсчетов электрокардиосигнала на ТР-сегменте, образующих ИССФ с заданными амплитуд-

но-временными и спектральными параметрами, с последующей низкочастотной фильтрацией ИССФ, обеспечивающий расширение частотного диапазона устраняемого дрейфа изолинии до частот сердечных сокращений при погрешности, не превышающей 1 %, и вычислительных затратах, на порядок меньших, чем у известных методов.

4. Аппаратно-программные средства выделения и устранения дрейфа изолинии с использованием языка псевдокода, позволяющего упростить процедуру проектирования программного средства на любом языке высокого уровня, и программа на языке C# платформы .NET Framework.

**Апробация работы.** Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

*международные конференции:* V международный симпозиум «Электроника в медицине. Мониторинг, диагностика, терапия» («КАРДИОСТИМ») (г. С.-Петербург, 2006 г.); XII международная научно-техническая конференция «Медико-экологические информационные технологии», 2009 г., г. Курск; XIII международная научно-практическая конференция-выставка «Актуальные проблемы информатики и информационных технологий», 2009 г., г. Тамбов; IV международная научная конференция молодых ученых-медиков, 2010 г., г. Курск; IV международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научный потенциал студенчества в XXI веке», 2010 г., г. Ставрополь; XVI международная научно-техническая конференция «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», 2010 г., г. Рязань;

*всероссийские конференции:* XVIII, XIX, XX, XXI, XXII всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы» («Биомедсистемы»), 2005-2009 гг., г. Рязань; XIV всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании» («НИТ»), 2009 г., г. Рязань; VII всероссийская научно-техническая конференция «Приоритетные направления развития науки и технологий», 2010 г., г. Тула.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 29 научных работ, включая один патент на изобретение, выданный Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 3 статьи в журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для кандидатских диссертаций, 8 статей в межвузовских сборниках, 17 тезисов докладов в материалах российских и международных научно-технических конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 113 наименований и 2 приложений. Основная часть работы изложена на 122 страницах машинописного текста. Работа содержит 57 рисунков и 9 таблиц. Общий объем составляет 148 страниц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована ее цель, кратко изложены основные решаемые задачи и полученные результаты, включая научную новизну и практическую ценность, рассмотрены используемые методы исследования, приведены научные положения, выносимые на защиту, а также результаты апробации работы.

В **первой главе** («Обзор методов устранения дрейфа изолинии электрокардиосигнала») проведен анализ проблем, связанных с выделением и устранением дрейфа изолинии. Рассмотрены достоинства и недостатки фильтрационных и интерполяционных методов устранения.

Проведен анализ использования методов выделения и устранения дрейфа изолинии. Установлено, что при фильтрационных методах вместе с дрейфом изолинии происходит устранение части спектра полезного сигнала, приводящее к искажению формы электрокардиосигнала и его амплитудных параметров до 10-12 %.

Интерполяционные методы имеют принципиальные ограничения на частотный диапазон выделяемого дрейфа изолинии, поскольку в качестве узлов интерполяции используется по одному отсчету в каждом цикле сердечных сокращений, следовательно, частота дискретизации теоретически не может превышать половину частоты сердечных сокращений (ЧСС). При частотах дрейфа изолинии, составляющих  $0,25 \cdot F_{\text{ЧСС}}$ , погрешность при использовании интерполяционных методов составляет 5-10 %.

Повышения частоты устраняемого дрейфа изолинии можно достичь на основе преобразования отсчетов ЭКС в импульсные сигналы сложной формы (ИССФ). ИССФ обеспечивают преобразование спектра отсчетов ЭКС, заключающееся в подавлении заданного количества спектральных зон при сохранении нулевой спектральной зоны, содержащей составляющие дрейфа изолинии. Для подавления выбранных спектральных зон необходимо выполнение условия:

$$U_0 + 2 \sum_{i=1}^n U_i \cos 2k\pi \frac{\tau_i}{T} = 0; k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $k$  - номер подавляемой спектральной зоны,  $n$  - число подавляемых спектральных зон,  $\tau_i$  - сдвиг во времени импульсов  $i$ -й дополнительной последовательности отсчетов ИССФ относительно опорных отсчетов ИССФ.

На основе анализа известных методов и выявленных присущих им недостатков сформулированы задачи диссертационного исследования.

**Вторая глава** («Анализ влияния погрешностей преобразования спектра отсчетов электрокардиосигнала на точность выделения дрейфа изолинии») посвящена анализу влияния шума квантования аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и регистров микропроцессорной системы (МПС) на точность подавления заданных спектральных зон преобразования спектра ЭКС в ИССФ.

Определена взаимосвязь структуры ИССФ с ЧСС. Получено выражение для определения максимального количества подавляемых спектральных зон, которого можно достигнуть при формировании ИССФ на TP-сегменте:



$$k_{\max} = \frac{T_{TP}}{2} \cdot f_D - 1, \quad (2)$$

где  $T_{TP}$  - длительность ТР-сегмента,  $f_D$  - частота дискретизации сигнала.

Погрешность неточности задания амплитудно-временных параметров можно свести к минимуму, увеличивая разрядность АЦП и МПС, что может привести к передискретизации сигнала и, как следствие, повысит требования к памяти МПС и увеличит вычислительные затраты на обработку отсчета ЭКС. Получены аналитические выражения зависимостей погрешностей задания амплитудно-временных параметров ИССФ от амплитуды шума квантования, частоты сердечных сокращений и частоты дискретизации ЭКС, позволяющие определять значения разрядности АЦП и регистров МПС, необходимые для обеспечения заданной точности восстановления сигнала дрейфа изолинии.

Действие шума квантования на отсчеты ИССФ приводит к невыполнению условия (1) подавления  $k$ -й спектральной зоны, что выражается в появлении составляющих в подавленных спектральных зонах. Для выявления влияния шума квантования на амплитудно-временные параметры ИССФ и, как следствие, на точность выделения дрейфа изолинии проведен анализ, в результате которого были получены аналитические выражения для оценки спектральных составляющих, появляющихся при нарушении условия (1) из-за действия шума квантования.

Выражение для оценки влияния шума квантования на амплитудные параметры  $k$ -й спектральной зоны имеет вид:

$$\delta K_k = \frac{\sin\left(k\pi \frac{f_{ЧСС}}{f_D}\right)}{k\pi \frac{f_{ЧСС}}{f_D}} \cdot 2^{1-b} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \cos\left(2\pi k \frac{m_i \cdot f_{ЧСС}}{f_D}\right)}{1 + 2 \sum_{i=1}^n K_i}, \quad (3)$$

где  $f_{ЧСС}$  - частота сердечных сокращений;  $m_i$  - количество отсчетов сигнала за время  $\tau_i$ , определяемое частотой дискретизации ЭКС, и равное  $m_i = \tau_i \cdot f_D$ , где  $f_D$  - частота дискретизации ЭКС;  $b$  - разрядность АЦП.

В случае формирования отсчетов ИССФ при максимально возможном значении  $\tau_i$ , т.е. на границах ТР-интервала, выражение (3) примет вид:

$$\delta K_k = \frac{\sin\left(k\pi \frac{f_{ЧСС}}{f_D}\right)}{k\pi \frac{f_{ЧСС}}{f_D}} \cdot 2^{1-b} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \cos\left(2\pi k \left(\frac{T_{TP}}{2} - \frac{1}{f_D}\right) f_{ЧСС}\right)}{1 + 2 \sum_{i=1}^n K_i}, \quad (4)$$

где  $T_{TP}$  - длительность ТР-интервала.

При влиянии ограниченности разрядности регистров МПС на временные параметры ИССФ аналитическое выражение относительного изменения амплитуды  $k$ -й спектральной зоны ИССФ примет следующий вид:

$$\delta \tau_k = \frac{1}{2^{b-1}} \cdot 2f_D \cdot \tau_{\max} \cdot \sin\left(k\pi \frac{f_{ЧСС}}{f_D}\right) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n K_i \sin\left(2\pi k \frac{m_i \cdot f_{ЧСС}}{f_D}\right)}{1 + 2 \sum_{i=1}^n K_i}, \quad (5)$$

где  $b$  - разрядность МПС;  $\tau_{\max}$  - максимальное значение сдвига дополнительных отсчетов относительно опорного.

В случае формирования отсчетов ИССФ на границах ТР-интервала выражение (5) примет вид:

$$\delta\tau_k = \frac{1}{2^{b-1}} \cdot 2f_D \cdot \tau_{\max} \cdot \sin\left(k\pi \frac{f_{qCC}}{f_D}\right) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n K_i \sin\left(2\pi k \left(\frac{T_{TP}}{2} - \frac{1}{f_D}\right) f_{qCC}\right)}{1 + 2 \sum_{i=1}^n K_i}. \quad (6)$$

Обобщенное аналитическое выражение, связывающее требуемую разрядность АЦП и МПС с относительной погрешностью восстановления дрейфа изолинии ( $\delta_{\Sigma k}$ ), частотой сердечных сокращений ( $f_{qCC}$ ), частотой дискретизации ЭКС ( $f_D$ ) и числом подавляемых спектральных зон ( $n$ ), полученное с учетом (3)-(5), имеет вид:

$$b = 1 - \log_2 \delta_{\Sigma k} - \log_2 \left( \frac{\sin\left(k\pi \frac{f_{qCC}}{f_D}\right)}{1 + 2 \sum_{i=1}^n K_i} \times \sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^n \cos\left(2\pi k \frac{m_i \cdot f_{qCC}}{f_D}\right)}{k\pi \frac{f_{qCC}}{f_D}} \right)^2 + 4f_D^2 \cdot \tau_{\max}^2 \cdot \sin^2\left(k\pi \frac{f_{qCC}}{f_D}\right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n K_i \sin\left(2\pi k \frac{m_i \cdot f_{qCC}}{f_D}\right) \right)^2} \right), \quad (7)$$

где  $\delta_{\Sigma k}$  - общее относительное изменение амплитуды дрейфа изолинии за счет неполного подавления  $k$ -й спектральной зоны ИССФ из-за ограниченной разрядности АЦП и МПС.

Для предельного случая формирования ИССФ на границах ТР-интервала аналитическое выражение (7) для разрядности АЦП и МПС преобразуется к виду:

$$b = 1 - \log_2 \delta_{\Sigma k} - \log_2 \left( \frac{\sin\left(k\pi \frac{f_{qCC}}{f_D}\right)}{1 + 2 \sum_{i=1}^n K_i} \times \sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^n \cos\left(2\pi k \frac{\left(\frac{T_{TP}}{2} - \frac{1}{f_D}\right) \cdot f_{qCC}}{f_D}\right)}{k\pi \frac{f_{qCC}}{f_D}} \right)^2 + 4f_D^2 \cdot \tau_{\max}^2 \cdot \sin^2\left(k\pi \frac{f_{qCC}}{f_D}\right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n K_i \sin\left(2\pi k \frac{\left(\frac{T_{TP}}{2} - \frac{1}{f_D}\right) \cdot f_{qCC}}{f_D}\right) \right)^2} \right). \quad (8)$$

На основе полученных выражений (7), (8) можно определить требуемую разрядность устройств МПС, при которой обеспечивается заданная точность восстановления дрейфа изолинии.

Например, для достижения минимального значения относительного изменения амплитуды первой спектральной зоны ИССФ под влиянием шума квантования не более 0.01 необходимо при формировании ИССФ обеспечить разрядность АЦП не менее 20 и регистров МПС не менее 15 при частоте дискретизации ЭКС, равной 200 отсч./с.

Проанализирована зависимость количества вычислительных операций для реализации процедуры фильтрации ИССФ от числа подавляемых спектральных зон и получено математическое выражение, связывающее число вычислительных операций со структурой формируемого ИССФ и требуемого для его фильтрации порядка ФНЧ:

$$M = N \cdot (N - 1) \cdot (2n + 1), \quad (9)$$

где  $M$  - количество вычислительных операций,  $N$  - требуемый порядок фильтра,  $n$  - количество подавляемых спектральных зон ИССФ.

**Третья глава** («Алгоритмы устранения дрейфа изолинии электрокардиосигнала») посвящена разработке способа и алгоритмов устранения дрейфа изолинии ЭКС.

Расширение частотного диапазона выделяемого дрейфа изолинии достигается за счет добавления к исходному отсчету (опорной точке) дополнительных отсчетов ЭКС, взятых на ТР-сегменте, т.е. за счет формирования ИССФ и увеличения длительности обрабатываемого сигнала. Длительность ТР-сегмента уменьшается при увеличении частоты сердечных сокращений, поэтому формирование ИССФ целесообразно начинать как можно ближе к началу ТР-сегмента.

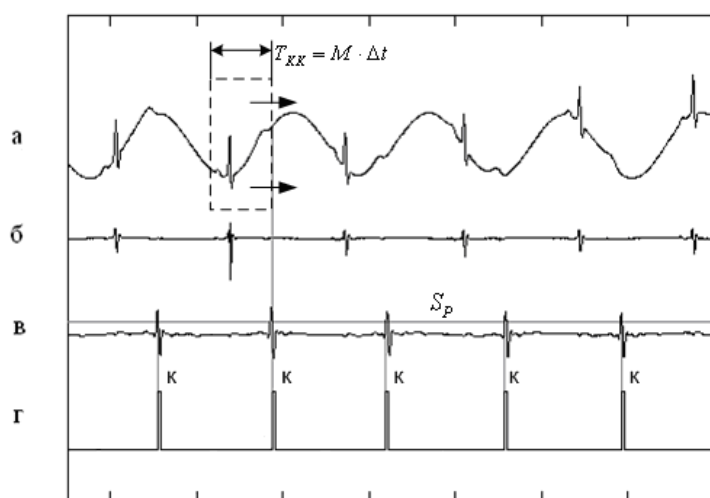


Рисунок 1 – Обнаружение окончания кардиокомплекса (пояснения в тексте)

В связи с этим решена задача определения окончания кардиокомплекса (КК) в условиях наличия дрейфа изолинии (рисунок 1,а).

Для определения окончания КК предложен способ выделения опорной точки на ТР-сегменте в условиях дрейфа изолинии. Предложено выражение для определения опорных точек на ЭКС:

$$S_k = \sum_{i=1}^M (X_{k-i} - X_{k-i-1}) \cdot V_i, \quad (10)$$

где  $X_k$  - амплитуды отсчетов

исходного ЭКС;  $V_i$  - полученные на основе среднестатистических значений элементов ЭКС амплитуды отсчетов типового КК;  $M = \frac{T_{KK}}{\Delta t}$ ,  $T_{KK}$  - длительность окна, равная длительности типового КК;  $\Delta t$  - интервал дискретизации.

Показано, что последовательность (10) имеет максимальное значение в окончании временного окна длительностью  $T_{KK}$  в случае корреляции последовательности  $X_k - X_{k-1}$  (рисунок 1,б) в окне с предварительно заданными значениями окна  $V_i$ . Полученное максимальное значение сравнивают с пороговым значением  $S_p$  (рисунок 1,в) в момент пересечения сигнала отклика с пороговым уровнем и получают окончание КК (рисунок 1,г, К- окончание КК).

Получено выражение, позволяющее определить значение порогового уровня для выявления окончания КК:

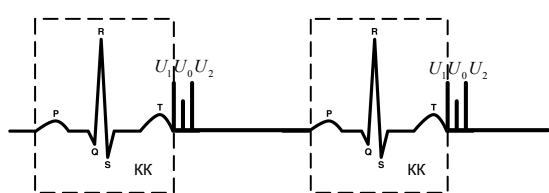


Рисунок 2 – Формирование ИССФ

$$S_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (V \min_i - V \min_{i-1}) \cdot V \min_i, \quad (11)$$

где  $V \min_i$  - отсчеты минимальных амплитудных значений типового КК при его минимальной длительности.

Показано, что во избежание задержек и ложного формирования ИССФ необходимо формировать импульсы ИССФ сразу после обнаружения КК. В месте обнаружения окончания КК необходимо взять отсчет ЭКС  $U_1$ , следующий за ним опорный отсчет  $U_0$  и далее отсчет  $U_2$  (рисунок 2).

На основании предложенного способа разработан алгоритм формирования опорных отсчетов (рисунок 3).

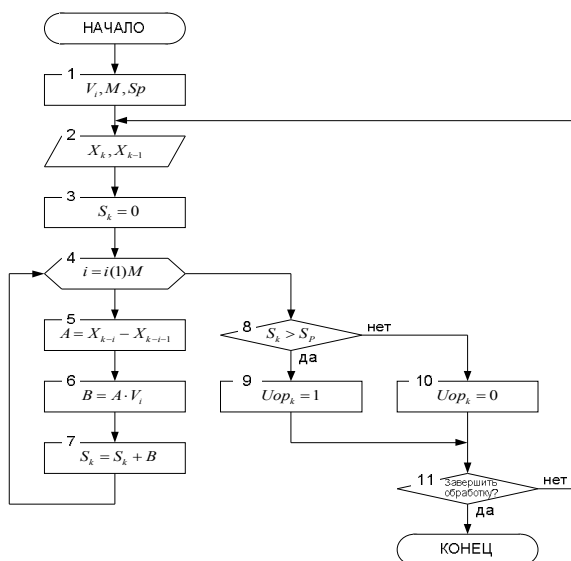


Рисунок 3 – Алгоритм формирования опорных отсчетов

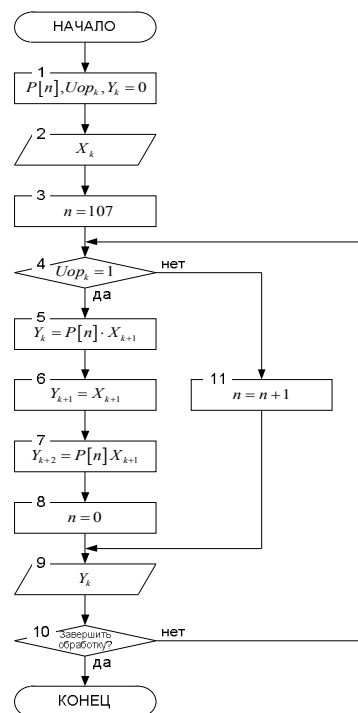


Рисунок 4 – Алгоритм формирования ИССФ

Предложен алгоритм формирования ИССФ (рисунок 4) с предварительно рассчитанными масштабными коэффициентами для диапазона ЧСС от 40 до 140 уд./мин, позволяющий выиграть в быстродействии за счет отсутствия вычислений значений масштабных коэффициентов.

Для снижения вычислительных затрат на обработку ИССФ предложено использовать многоскоростную обработку сигналов, заключающуюся в децимации частоты дискретизации. Показано, что использование децимации частоты дискретизации исходной последовательности ИССФ приводит к неполному подавлению заданных спектральных зон.

Показано, что децимация исходного сигнала ИССФ для снижения вычислительных затрат может привести к децимации одного из отсчетов ЭКС, используемых для преобразования в отсчеты ИССФ, поэтому целесообразно использование децимации импульсной характеристики фильтра. В этом случае исключается возможность искажения ИССФ за счет выпадения децимированных отсчетов и соответственно неполного подавления выбранной спектральной зоны. Показано, что для выделения нулевой спектральной зоны с дрейфом изолинии ЭКС целесообразно использовать двухкаскадный фильтр, первый каскад которого имеет децимированную импульсную характеристику. Получено аналитическое выражение, связывающее порядок фильтров и коэффициент децимации, при котором достигается наименьший объем вычислительных операций на один отсчет электрокардиосигнала. Спроектирован двухкаскадный фильтр выделения нулевой спектральной зоны ИССФ с дрейфом изолинии ЭКС. Предложен алгоритм фильтрации (рисунок 5) исходной последовательности ИССФ с меньшими вычислительными затратами по сравнению с однокаскадной структурой за счет использования двухкаскадной эффективной структуры фильтров. Количество вычислительных операций снижается на порядок.

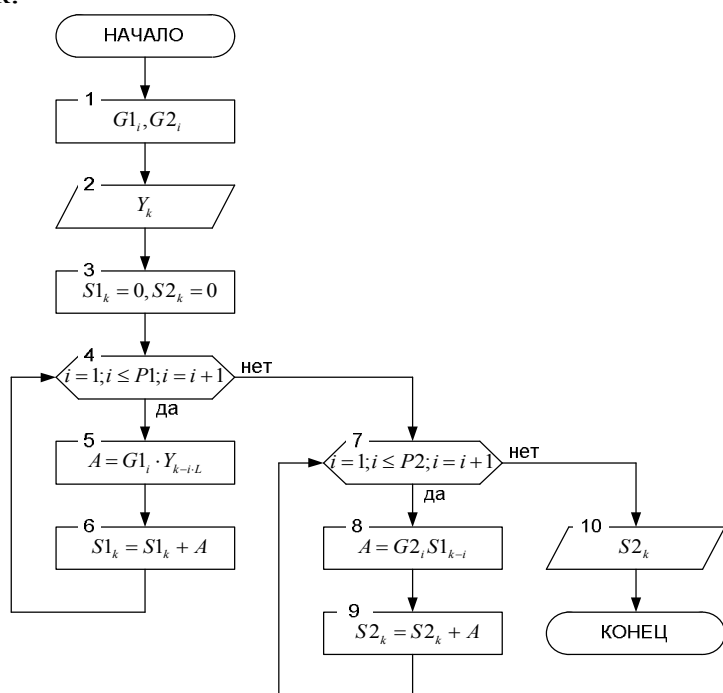


Рисунок 5 – Алгоритм выделения нулевой спектральной зоны

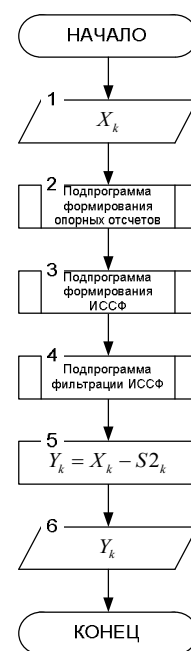


Рисунок 6 – Алгоритм устранения дрейфа изолинии электрокардиосигнала

Предложен алгоритм устранения дрейфа изолинии ЭКС, изображенный на рисунке 6, обеспечивающий расширение частотного диапазона устраняемого дрейфа до частоты сердечных сокращений при сохранении всех информативных составляющих самого электрокардиосигнала.

В **четвертой главе** («Возможности практической реализации предложенных подходов устранения дрейфа изолинии электрокардиосигнала») приведены варианты практической реализации предложенных подходов выделения и устранения дрейфа изолинии ЭКС.

Разработаны программы выделения опорных отсчетов в каждом цикле сердечных сокращений на TP-сегменте, формирования ИССФ, фильтрации ИССФ и устранения дрейфа изолинии на языке псевдокода, что позволяет в дальнейшем трансформировать их в программы для аппаратного или программного устранения дрейфа изолинии ЭКС. Предложено программное обеспечение для выделения и устранения дрейфа изолинии на языке C# платформы .NET Framework.

Работоспособность алгоритмов выделения и устранения дрейфа изолинии была апробирована на синтезированных электрокардиосигналах, взятых из базы ЭКГ МП-ВИН, и ЭКГ, снятых с пациентов в МУЗ «Ижевская больница». Остаточный дрейф электрокардиосигнала не превышал 0,96 % от первоначального дрейфа при частотах дрейфа, достигавших половины частоты сердечных сокращений, что показало эффективность использования предложенных алгоритмов для решения задачи выделения и устранения дрейфа изолинии и их преимущества перед известными методами.

В **заключении** излагаются основные результаты теоретических исследований и практических разработок, представленных в диссертационной работе.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В результате проведенных исследований предложены и исследованы методы для выделения и устранения дрейфа изолинии ЭКС, позволяющие расширить частотный диапазон устраняемого дрейфа до частоты сердечных сокращений (0,6-2,2 Гц, что соответствует 40-140 уд./мин) при обеспечении остаточного дрейфа не более 1 % от исходного и сохранении составляющих электрокардиосигнала.

1. Проанализирована предметная область задачи устранения дрейфа изолинии ЭКС. Показано, что решение данной задачи остается актуальным в настоящее время при построении автоматических систем анализа и интерпретации диагностических параметров электрокардиосигнала. Проанализированы существующие методы устранения дрейфа изолинии ЭКС и выявлены их недостатки. Обоснованы целесообразность использования преобразования отсчетов ЭКС на TP-сегменте в импульсные сигналы сложной формы и возможность выделения сигнала дрейфа изолинии низкочастотной фильтрацией полученных ИССФ для расширения частотного диапазона дрейфа до частоты сердечных сокращений.

2. Проанализированы источники неточного устранения дрейфа изолинии ЭКС: шумы квантования аналого-цифровых преобразователей и ограниченная разрядность регистров микропроцессорной системы. Произведена оценка влия-

ния шума квантования на амплитудные параметры преобразуемых отсчетов электрокардиосигнала в импульсные сигналы сложной формы. Получены аналитические выражения, связывающие относительную погрешность выделения дрейфа изолинии, разрядности аналого-цифрового преобразователя и регистров микропроцессорной системы, частоту сердечных сокращений и частоту дискретизации ЭКС, позволяющие выбирать разрядности, необходимые для обеспечения требуемой точности выделения и устранения дрейфа изолинии электрокардиосигнала.

3. Предложен способ формирования опорных отсчетов ЭКС изолинии, позволяющий в условиях наличия дрейфа изолинии производить преобразование исходных отсчетов электрокардиосигнала на TP-сегменте в импульсные сигналы сложной формы непосредственно после окончания кардиокомплекса, не чувствительный к изменению частоты сердечных сокращений.

4. Проанализирована возможность сокращения объема вычислительных затрат в процедуре устранения дрейфа изолинии с прореживанием по частоте и времени. Показана целесообразность использования прореживания по времени. Разработана двухкаскадная структура фильтра для выделения из спектра отсчетов ЭКС на TP-сегменте нулевой спектральной зоны с дрейфом изолинии, обеспечивающая необходимый уровень снижения интермодуляционных искажений при меньшем объеме вычислительных затрат по сравнению с однокаскадной структурой.

5. Предложены алгоритмы для устранения дрейфа изолинии электрокардиосигнала. Предложен подход к преобразованию отсчетов электрокардиосигнала в импульсные сигналы сложной формы на основе заранее сформированной матрицы коэффициентов преобразования.

6. Разработана программа устранения дрейфа изолинии на языке псевдокода, игнорирующая несущественные подробности и специфический синтаксис языков программирования.

7. Полученные результаты позволяют разрабатывать пригодные для практической реализации устройства и программные продукты, осуществляющие эффективное устранение дрейфа изолинии электрокардиосигнала. Предложенные подходы устранения дрейфа изолинии электрокардиосигнала просто поддаются алгоритмизации и программированию, что подтверждено программой на языке псевдокода и полученным на его основе приложением для устранения дрейфа изолинии электрокардиосигнала. Предложенные подходы были экспериментально апробированы на электрокардиосигналах из базы ЭКГ ВIT-MIN и модельных электрокардиосигналах. Результаты апробации подтвердили эффективность предложенных алгоритмов устранения дрейфа изолинии электрокардиосигнала.

8. Все предложенные научно-технические идеи, изложенные в диссертации, были представлены на всероссийских и международных научно-технических конференциях, опубликованы в виде статей. Новизна предложенных подходов и реализующих их технических решений подтверждена патентом на изобретение. Практическая ценность предложенных идей и технических решений подтверждена соответствующими актами апробации и использования в

МУЗ «Ижевская больница» и в учебном процессе Рязанского государственного радиотехнического университета в курсе «Методы обработки биомедицинских сигналов и данных» при подготовке специалистов по направлению 200401 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» и 200402 «Инженерное дело в медико-биологической практике». Результаты работы, касающиеся средств подготовки электрокардиосигналов к обработке в микропроцессорных системах, использованы при выполнении гранта Российского фонда фундаментальных исследований «Теория и проектирование медицинских измерительно-информационных систем на основе нейробионических технологий» (№ 10-08-97525-р\_центр-а, 01.2010) и ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала Высшей школы» по гранту № РНП 2.1.2.6390 от 12.12.2008 г.

Вышеизложенное позволяет утверждать, что все поставленные задачи решены и цель диссертационной работы достигнута.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Блинов П.А. Использование НЧ фильтров при выделении аддитивной помехи из электрокардиосигнала // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы – 2005: тез. докл. науч.-техн. конф. [Текст]: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2005. – С. 133-134.
2. Блинов П.А. Многокаскадное включение фильтров для выделения аддитивной помехи из электрокардиосигнала // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы – 2006: тез. докл. науч.-техн. конф. [Текст]: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2006. – С. 84-86.
3. Блинов П.А. Фильтр для выделения низкочастотных составляющих биомедицинских сигналов // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы 2007: тез. докл. науч.-техн. конф. [Текст]: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2007. – С. 22-24.
4. Блинов П.А. Применение неравномерной интерполяции при выделении дрейфа изолинии электрокардиосигнала // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы – 2007: тез. докл. науч.-техн. конф. [Текст]: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2007. – С. 24-26.
5. Блинов П.А. Устройство компенсации дрейфа изолинии электрокардиосигнала // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы – 2008: тез. докл. науч.-техн. конф. [Текст]: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2008. – С. 43-45.
6. Блинов П.А. Актуальность использования цифровых сигнальных процессоров для обработки электрокардиосигналов // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы – 2008: тез. докл. науч.-техн. конф. [Текст]: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2008. – С. 122-125.



7. Блинов П.А., Андреев А.Н. Система комплексной обработки кардиосигналов // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы – 2008: тез. докл. науч.-техн. конф. [Текст]: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2008. – С. 195-197.
8. Блинов П.А. Применение интерполяции с неравномерным шагом для выделения дрейфа изолинии // Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства. – Рязань: РГРТУ, 2008. – С. 17-19.
9. Блинов П.А., Андреев А.Н. Информационная обработка электрокардиосигнала // Медико-экологические информационные технологии – 2009 [Текст]: сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. / Курск. гос. техн. ун-т. – Курск, 2009. – С. 95-97.
10. Блинов П.А., Андреев А.Н. Компьютерное моделирование кардиосигналов // Актуальные проблемы информатики и информационных технологий: сб. науч. тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов: Издательский дом ТГУ им. Г.Р. Державина, 2009. – С. 303-305.
11. Блинов П.А. Анализ интерполяционных методов компенсации дрейфа изолинии электрокардиосигнала // Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства. – Рязань: РГРТУ, 2009. – С. 20-22.
12. Блинов П.А. Компенсация дрейфа изолинии в частотной области // Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства. – Рязань: РГРТУ, 2009. – С. 22-25.
13. Блинов П.А. Многоскоростная обработка электрокардиосигнала с целью выделения дрейфа изолинии // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы – 2009: тез. докл. науч.-техн. конф. [Текст]: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2009. – С. 424-427.
14. Блинов П.А. Аппаратный компенсатор дрейфа изолинии электрокардиосигнала // Медицинские приборы и технологии: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. д-ра мед. наук А.З. Гусейнова и д-ра техн. наук В.В. Савельева. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – С. 62-63.
15. Блинов П.А. Устройство обнаружения кардиокомплекса на основе циклической свертки // Медицинские приборы и технологии: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. д-ра мед. наук А.З. Гусейнова и д-ра техн. наук В.В. Савельева. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – С. 63-66.
16. Блинов П.А., Михеев А.А. Анализ методов компенсации дрейфа изолинии электрокардиосигнала // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. №4. 2009. – С. 94-97.
17. Блинов П.А. Обнаружение кардиокомплекса на основе циклической свертки // Медицинская техника. №6. 2009. С. 37-38.
18. Блинов П.А. Алгоритм компенсации дрейфа изолинии электрокардиосигнала // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань: РГРТУ, 2009. С. 340-342.

19. Блинов П.А., Андреев А.Н. Программный эмулятор электрокардиосигналов // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2009. – С. 117-118.
20. Блинов П.А. Метод выделения аддитивной помехи на основе децимации частоты дискретизации // Материалы IV Международной научной конференции молодых ученых-медиков. 25-26 февраля 2010 года. Том I / под ред. В.А. Лазаренко – Курск: ГОУ ВПО КГМУ Росздрава, 2010. – С. 127-128.
21. Блинов П.А. Фильтр ограничения спектра электрокардиосигнала // Научный потенциал студенчества в XXI веке: материалы IV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. СМУС СевКавГТУ, 2010. – С. 240-242.
22. Блинов П.А. Эффективный двухкаскадный фильтр для выделения дрейфа электрокардиосигнала // Приоритетные направления развития науки и технологий: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. ТООХО им. Д.И. Менделеева, 2010. – С. 140-142.
23. Blinov P.A. Detection of Cardiac Complex Using Cyclic Convolution // Bio-medical Engineering, Vol. 43, No 6, 2010. PP. 274-275.
24. Патент РФ № 2387367, А61В5/0452. Способ выявления кардиокомплекса и устройство для его осуществления / П.А. Блинов, А.А. Михеев //Открытия. Изобретения. 2010. №4.
25. Блинов П.А. Алгоритм фильтрации импульсных сигналов сложной формы с целью выделения дрейфа изолинии электрокардиосигнала // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: материалы 16-й Международной научн.-техн. конф. – Рязань: РГРТУ, 2010. – С. 27-29.
26. Блинов П.А. Предварительная аналоговая обработка электрокардиосигналов // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: материалы 16-й Международной научн.-техн. конф. – Рязань: РГРТУ, 2010. – С. 29-31.
27. Блинов П.А. Влияние частоты сердечных сокращений на компенсацию дрейфа изолинии электрокардиосигнала // Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства. – Рязань: РГРТУ, 2010 – С. 34-41.
28. Блинов П.А. Синтез параллельных эффективных структур многокаскадных фильтров для выделения аддитивной помехи электрокардиосигнала // Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства. – Рязань: РГРТУ, 2010. – С. 41-43.
29. Блинов П.А. Разработка аппаратно-программного средства предварительной обработки электрокардиосигнала в режиме реального времени // Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи «Актуальные проблемы развития нано-, микро- и оптоэлектроники». – Рязань: РГРТУ, 2010. – С. 93-96.

Соискатель  /П.А. Блинов/

Блинов Павел Александрович

АЛГОРИТМЫ УСТРАНЕНИЯ ДРЕЙФА ИЗОЛИНИИ  
ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА НА ОСНОВЕ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЕГО СПЕКТРА

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Редактор Р.К. Мангутова

Подписано в печать                      Формат бумаги 60X84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.  
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.  
Заказ №

Участок оперативной полиграфии Рязоблстатуправления  
390013, Рязань, ул. Типанова, 4