

На правах рукописи

КРИВОНОГОВ Леонид Юрьевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ ОБРАБОТКИ
ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

**Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации**

**А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

ПЕНЗА 2003

Работа выполнена в Пензенском государственном университете.

Научный руководитель — доктор технических наук,
доцент **Истомина Т. В.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор **Лебедев В. Б.**;
кандидат технических наук
Исаков С. А.

Ведущее предприятие — ФГУП НИИЭМП, г. Пенза.

Защита диссертации состоится 30 октября 2003 г., в 14 часов,
на заседании диссертационного совета Д 212.186.04 в Пензенском
государственном университете по адресу: 440026, г. Пенза,
ул. Красная, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенско-
го государственного университета.

Автореферат разослан 28 сентября 2003 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Смогунов В. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Борьба с заболеваниями сердечно-сосудистой системы, занимающими первое место по числу смертельных исходов, является одной из наиболее важных задач современной медицины. Прогресс в этом направлении может быть достигнут за счет привлечения в медицину новых диагностических средств, созданных на основе применения теории информации и анализа биотехнических систем, цифровой обработки сигналов, измерительной техники, а также последних достижений микрокомпьютерных и информационных технологий. Для своевременного выявления, предупреждения и лечения заболеваний сердечно-сосудистой системы широко используется информация, полученная в результате автоматической обработки ее физического носителя — электрокардиосигнала.

Основными этапами получения и обработки электрокардиографической (ЭКГ) информации являются: обнаружение и распознавание информативных кардиоимпульсов, измерение амплитудно-временных параметров сигнала, принятие диагностических решений. Выполнение перечисленных операций обеспечивается средствами автоматической обработки электрокардиосигнала (кардиомониторами), которые в комплексе с биообъектом образуют биотехническую систему. Отдельные элементы этой системы обладают разнообразными взаимными связями, поэтому ее исследование необходимо проводить в рамках системного анализа сложных прикладных объектов.

Основой современных методов автоматической обработки электрокардиосигнала является обнаружение информативных кардиоимпульсов на фоне помех, то есть определение их временного положения. Информация, полученная при этом, используется для дальнейшей обработки и измерения параметров электрокардиосигнала с целью принятия диагностических решений, а также для реализации задач биоуправления (синхронизации работы кардиоправляемых приборов).

Для принятия диагностических решений при автоматической обработке электрокардиосигнала (в том числе при анализе сердечных аритмий) необходима информация не только о длительностях кардиоциклов ($R-R$ интервалов), но и о форме кардиоимпульсов, при этом наиболее важно определить, является ли очередная импульс нормальным (типичным) или патологическим.



Обнаружение и распознавание формы кардиоимпульсов осложняется их изменчивостью и многообразием (особенно при различных патологиях сердечно-сосудистой системы), а также наличием помех, различных по своему происхождению, интенсивности, спектральному составу и функциям распределения. В некоторых случаях (при длительном исследовании электрокардиосигнала в режиме свободной двигательной активности, нагрузочных пробах, кардиостимуляции, передаче сигнала по различным каналам связи) эти помехи могут превышать уровень полезного сигнала в несколько раз. Поэтому получение достоверной диагностической информации при автоматической обработке электрокардиосигнала требует применения системного подхода, заключающегося в учете взаимного влияния функциональных подсистем общей биотехнической системы.

Большой вклад в теорию и практику автоматической обработки электрокардиографической информации и принятия диагностических решений внесли российские ученые А. П. Немирко, А. И. Калинин, Л. А. Манило, В. М. Колтун, В. А. Калантар, С. В. Селищев, Л. И. Титомир, а также зарубежные специалисты J. Pan, W. Tompkins, H. Wan, J. P. Cammorota, A. Akin, E. Skordalakis, P. Trahinias и др.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые за более чем сорокалетнюю историю автоматического анализа электрокардиографической информации, остаются вопросы, требующие дополнительной проработки. К ним относится проблема обнаружения и распознавания кардиоимпульсов в условиях интенсивных помех и нестабильности информативного сигнала. Подавляющее большинство существующих методов и средств обработки электрокардиосигнала не предназначено для работы в условиях интенсивных помех (при отношении сигнал/помеха менее 10 дБ). В таких ситуациях кардиомониторы либо прекращают исследование и информируют пользователя о недопустимом уровне помех, либо имеют низкую эффективность.

Все это дает достаточно оснований для утверждения, что разработка новых помехоустойчивых методов и алгоритмов распознавания кардиоимпульсов и создание систем автоматической обработки электрокардиографической информации на их основе являются актуальными задачами в современной медицинской промышленности.

Цель работы — создание помехоустойчивых методов и алгоритмов обработки электрокардиографической информации и разработка кардиомониторов, обеспечивающих принятие решений в реальном масштабе времени.

Задачи исследования. Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1) анализ и систематизация помех, возникающих при получении и обработке электрокардиографической информации;

2) анализ и систематизация методов обнаружения и распознавания информативных кардиоимпульсов с точки зрения повышения помехоустойчивости кардиомониторов;

3) разработка новых методов и алгоритмов, обеспечивающих повышение эффективности распознавания кардиоимпульсов в условиях интенсивных помех;

4) разработка методики и критериев для сравнительного исследования эффективности алгоритмов распознавания информативных кардиоимпульсов;

5) разработка алгоритма принятия диагностических решений, основанного на обработке информации о форме и периодичности следования кардиоимпульсов;

6) создание на основе предложенных методов и разработанных алгоритмов технических средств для автоматической обработки электрокардиографической информации в реальном масштабе времени.

Методы исследования. Теоретическая часть диссертационной работы выполнена на базе методов непараметрической статистики, теории сигналов и распознавания образов, алгебры логики. Результаты исследований получены в программных средах Microsoft Excel, Matlab-Simulink и Delphi.

Научная новизна работы

1. Систематизированы помехи, возникающие при получении и обработке электрокардиографической информации, и проведен сравнительный анализ методов распознавания информативных кардиоимпульсов, на основе чего определены пути повышения их помехоустойчивости.

2. Предложен укрупненный структурный подход к обработке электрокардиографической информации в условиях интенсивных

помех, в рамках которого разработаны структурно-интегральный и структурно-ранговый методы распознавания информативных кардиоимпульсов.

3. На основе структурно-интегрального метода разработан и исследован помехоустойчивый структурно-интегральный скользящий алгоритм распознавания информативных кардиоимпульсов, базирующийся на разложении сигнала по дискретным функциям Уолша, отличающийся высокой скоростью обработки электрокардиосигнала.

4. В рамках структурно-рангового метода распознавания информативных кардиоимпульсов разработаны и исследованы структурный корреляционно-ранговый алгоритм, отличающийся повышенной помехоустойчивостью, и алгоритм бинарного квантования дискретных разностей сигнала, имеющий простую техническую реализацию.

5. Создан комплексный алгоритм принятия диагностических решений, основанный на обработке информации о форме и периодичности следования кардиоимпульсов и обеспечивающий обнаружение наиболее распространенных и опасных нарушений сердечного ритма.

6. Разработаны схмотехнические и программные решения, реализующие предложенные методы и алгоритмы распознавания кардиоимпульсов, на базе которых создан ряд помехоустойчивых средств автоматической обработки электрокардиографической информации, обеспечивающих работу в реальном масштабе времени.

Практическое значение диссертации. В работе обобщены проведенные при непосредственном участии автора в Пензенском государственном университете теоретические исследования, способствующие решению научно-технической проблемы создания методов и средств автоматической обработки электрокардиографической информации. Практические результаты диссертации получены в ходе выполнения министерской программы «Новая медицинская техника», хоздоговорных и госбюджетных НИР и ОКР, в которых автор являлся ответственным исполнителем. На основе предложенных в диссертации методов и алгоритмов был изготовлен и внедрен ряд средств автоматической обработки электрокардиосигнала.

Реализация результатов работы. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований автора использованы

при создании средств автоматической обработки электрокардиосигнала и внедрены в практику и учебный процесс в Пензенском государственном университете. Результаты работы в виде алгоритмов и технических средств внедрены на предприятиях городов Пензы и Кузнецка. Всего представлено 9 актов внедрения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Структурно-интегральный метод распознавания электрокардиосигнала и реализующий его структурно-интегральный скользящий алгоритм, основанный на разложении сигнала по дискретным базисным функциям Уолша, обеспечивающий высокую скорость обработки информации.

2. Структурно-ранговый метод распознавания электрокардиосигнала и алгоритмы на его основе: структурный корреляционно-ранговый алгоритм, отличающийся повышенной помехоустойчивостью, и алгоритм бинарного квантования дискретных разностей сигнала, имеющий простую техническую реализацию.

3. Методика и система критериев для исследования эффективности алгоритмов автоматического распознавания и обнаружения электрокардиографической информации.

4. Комплексный алгоритм принятия диагностических решений, основанный на обработке информации о форме и периодичности следования кардиоимпульсов и позволяющий обнаружить наиболее распространенные и опасные нарушения сердечного ритма.

5. Схемотехнические и программные решения, реализующие разработанные алгоритмы и обеспечивающие работу кардиомониторов в реальном масштабе времени.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались и докладывались на конгрессах и конференциях различного уровня, а именно: на всесоюзной НТК «Актуальные вопросы применения радиоэлектроники в медицине» (г. Москва–Куйбышев, 1988 г.); международных НТК «Диагностика, информатика, метрология-95», «ДИМЭБ-96» (г. Санкт-Петербург, 1995, 1996 гг.); научной сессии МИФИ-98 (г. Москва, 1998 г.); международных симпозиумах «Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем» (г. Пенза, 1997 и 1998 гг.); НТК «Измерения, контроль и автоматизация производственных процессов» (г. Барнаул, 1997 г.); IV Всесоюзном съезде кардиологов (г. Пенза, 1991 г.); II и III меж-

дународных конгрессах «КАРДИОСТИМ» (г. Санкт-Петербург, 1995, 1998 гг.); XI научных чтениях памяти акад. Н. Н. Бурденко (г. Пенза, 1998 г.); НТК «Медико-технические технологии на страже здоровья» (г. Геленджик, 2000 г.); международной НТК «Биомедприбор 2000» (г. Москва, 2000 г.); международной НТК «Измерения 2000» (г. Пенза, 2000 г.); IV международном симпозиуме «Надежность и качество 2001» (г. Пенза, 2001 г.); IV международной НТК «Радиоэлектроника в медицинской диагностике» (г. Москва, 2001 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 54 печатные работы, в том числе 4 авторских свидетельства на изобретения, 2 патента РФ и свидетельство на полезную модель. Исследования и разработки отражены в 4 отчетах о НИР и ОКР. Основные положения работы докладывались и обсуждались на 16 научно-технических и медицинских конференциях, симпозиумах, съездах и конгрессах различного ранга, в том числе на 10 международных.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного материала, заключения, списка литературы из 147 наименований и приложений. Общий объем работы составляет 203 страницы основного текста, включая 55 рисунков и 17 таблиц. Приложения содержат листинги программ и материалы, подтверждающие внедрение результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследования, дана общая характеристика выполненной работы, показана новизна решаемых проблем.

В первой главе рассмотрены особенности исследования, информативные параметры, структура, статистические и спектральные характеристики электрокардиосигнала (ЭКС) как физического носителя информации. Выявлено, что, несмотря на нестационарность, ЭКС является структурированным сигналом, и это позволяет создать формализованное описание информативных кардиоимпульсов (ИКИ).

Определено, что разработка методов и средств обработки ЭКС должна основываться на системном подходе, заключающемся в учете взаимных связей элементов сложноорганизованной биотехнической системы (БТС). Проведен анализ и систематизированы

помехи, которые возникают при получении и обработке ЭКС (рисунок 1). Особое внимание уделено помехам при свободной двигательной активности. В общем случае ЭКС содержит помехи, различные по своему происхождению, интенсивности, форме, спектральному составу, законам распределения; их свойства меняются в процессе получения и обработки сигнала.



Рисунок 1

Установлено, что результирующая помеха является вектором суммы составляющих от всех источников помех, в общем случае представляющих случайные составляющие с различными законами распределения вероятностей. Поэтому совместное распределение результирующей помехи в конкретный момент времени нель-

зя рассматривать как гауссовское, а суммарный помеховый процесс нельзя считать стационарным. Влияние помех на ЭКС носит в основном аддитивный характер. Кроме того, обычно наблюдается статистическая независимость полезного сигнала и помех, то есть ЭКС и помехи некоррелированы.

Проанализированы методы и приемы повышения помехозащищенности при исследовании ЭКС. Проведен сравнительный анализ методов распознавания элементов ЭКС, разработана систематизация информативных параметров формы ИКИ. Особенности формирования и получения ЭКС (изменчивость формы ИКИ, перекрытие спектров сигнала и помех) ограничивают выбор методов распознавания в условиях интенсивных помех. В результате исследований выявлено, что существующие методы и средства автоматической обработки не обеспечивают эффективного анализа ЭКС в условиях интенсивных помех (менее 10 дБ), поэтому необходим поиск и обоснование новых теоретических подходов к обработке электрокардиографической информации, которые позволят создать помехоустойчивые методы и алгоритмы распознавания ЭКС и разработать кардиологическую аппаратуру на их основе. Сделан вывод о том, что наиболее помехоустойчивыми являются интегральные методы, основанные на суммировании значений сигнала в скользящем временном окне и использовании априорной информации о свойствах сигнала и помех.

Во второй главе обоснован и предложен укрупненный структурный подход к распознаванию ЭКС в условиях интенсивных помех, заключающийся в представлении ИКИ как совокупности его простейших элементов — фронтов и спадов, из которых составляется последовательная кодовая цепочка. Фронт и следующий за ним спад (или, наоборот, спад и следующий за ним фронт) являются сегментом ИКИ. Один или несколько сегментов, следующих друг за другом, составляют кардиоимпульс. Предложенный подход обеспечивает повышенную помехоустойчивость при распознавании, при этом выполняется принцип структурности, т.е. из одних и тех же элементов может быть составлен ИКИ любой формы. В рамках укрупненного структурного подхода созданы формализованное описание ИКИ и опорные структуры для их распознавания, показанные на рисунке 2.

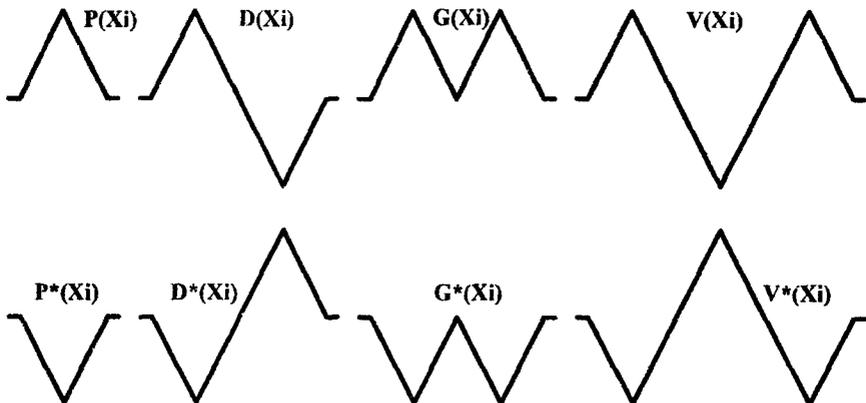


Рисунок 2

С целью сравнения результативности алгоритмов обнаружения и распознавания в работе предложены методика и система критериев, составленная на основе наиболее эффективных показателей.

1. Для алгоритмов, которые распознают кардиоимпульсы как единый структурный образ, целесообразно использовать следующие критерии сопоставления:

- вероятность правильного распознавания (вероятность ошибки распознавания) ИКИ;
- вероятность правильного обнаружения (вероятность пропусков) ИКИ;
- вероятность ложных обнаружений ИКИ.

2. Для алгоритмов, которые распознают ИКИ как совместное наступление нескольких независимых событий, вероятность распознавания будет определяться произведением вероятностей соответствующих событий

$$P_R = \prod_{l=1}^K P_l,$$

где P_l — вероятности событий, совместное наступление которых определяет отнесение ИКИ к определенной опорной структуре.

3. Для алгоритмов обнаружения важной характеристикой является точность определения временного положения ИКИ и его опорных точек в случае обнаружения самого кардиоимпульса. В качестве критерия оценки точности определения временного положения автором предложено использовать временную неопределенность обнаружения, т. е. временной интервал между положением опорной точки ИКИ t_N и его значением t_i , полученным в результате работы алгоритма. Временная неопределенность обнаружения характеризуется усредненной абсолютной систематической погрешностью Δ_t и среднеквадратическим отклонением σ_t от временного положения опорной точки. При этом зависимости Δ_t и σ_t от отношения сигнал/шум в полной мере характеризуют точность определения временного положения ИКИ.

4. Для любых алгоритмов обработки ЭКС важными показателями являются:

- сложность, определяемая количеством операций N_0 , выполняемых на каждом шаге обработки;
- быстродействие V , то есть общее количество операций в единицу времени.

Таким образом, для сравнительной оценки алгоритмов распознавания ИКИ автором предложено использовать систему критериев, в совокупности повышающих качество определения наиболее эффективного из них. Для сопоставления результативности алгоритмов обработки ЭКГ информации была создана электронная цифровая база электрокардиосигналов, соответствующая системе разработанных к ней требований.

На основе предложенного укрупненного структурного подхода разработан структурно-интегральный метод распознавания электрокардиосигнала, основанный на использовании в качестве интегральных информативных параметров ИКИ вектора бинарных признаков, являющихся результатом сравнения с пороговыми коэффициентами разложения по системе дискретных базисных функций (БФ) Уолша.

Коэффициенты разложения по дискретным базисным функциям Уолша определяются следующим образом:

$$W(j) = \sum_{i=0}^{N-1} X(i) \text{Wal}(j, i),$$

где $X(i)$ – исследуемый дискретный сигнал; $Wal(j,i)$ – дискретная функция Уолша; j – порядковый номер базисной функции. При этом необходимо, чтобы интервал определения исследуемого сигнала совпадал с интервалом определения базисных функций.

Вектор бинарных признаков определяется как

$$F_j^W = h(W(j) - C_j^W),$$

где C_j^W – пороги сравнения; $h(z)$ – функция единичного скачка Хевисайда;

$$h(z) = \begin{cases} 1, & z \geq 0; \\ 0, & z < 0. \end{cases}$$

Исследования, проведенные на реальных участках ЭКС, однозначно показали возможность распознавания ИКИ с применением такого вектора бинарных признаков, что позволяет разработать знаковые алгоритмы распознавания кардиоимпульсов, имеющие простую техническую реализацию.

На основании исследований был сделан вывод о целесообразности использования при распознавании лишь трех коэффициентов разложения $W1, W2, W3$ по БФ Уолша (упорядочение по Хармуту) и одного порога C , при этом можно записать вектор бинарных признаков F^W :

$$F^W = \begin{cases} F1 = h(W1 - C); \\ F2 = h(-W1 - C); \\ F3 = h(-W2 - C); \\ F4 = h(W2 - C); \\ F5 = h(-W3 - C); \\ F6 = h(W3 - C). \end{cases}$$

Истинность признаков $F1-F6$ соответствует отнесению исследуемого ИКИ к одной из опорных структур.

На основе разработанного структурно-интегрального метода автором создана группа алгоритмов распознавания ИКИ (неадаптивный, адаптивный и скользящий), основанных на разложении ЭКС по дискретным базисам Уолша.

Первые два алгоритма требуют для распознавания обнаружение опорных точек ИКИ, что затруднено в условиях интенсивных по-

мех. Для преодоления проблем, связанных с определением опорных точек, предложен структурно-интегральный скользящий (СИС) алгоритм распознавания, определяющий на каждом шаге n коэффициенты разложения $W1$, $W2$, $W3$ и вектор первичных бинарных признаков F^W . При равенстве одного из признаков "1" точка n принимается за опорную точку q -го ИКИ S_n^q и от нее откладывается интервал $T_C = \text{const}$, в котором предполагается наличие ИКИ. В диапазоне $[S_n^q, S_n^q + T_C]$ определяется выходной вектор бинарных признаков Q_m^q :

$$Q_m^q = \begin{cases} Qk_m = h\left(\sum_{n=1}^{T_C} f k_n\right) - K); \\ Ql_m = h(m_{F1} - m_{F1}), \end{cases}$$

где $m = n + K$, K — количество срабатываний (превышений порогов).

Признаки Ql_m несут информацию о том, какой из признаков Qk_m одного k -го порядка появился позже (номер m его признака больше). Использование рекуррентных процедур существенно уменьшает число математических операций и увеличивает, таким образом, скорость вычислений при реализации скользящих алгоритмов распознавания ИКИ.

Разработанный СИС алгоритм позволяет распознавать ИКИ при отношении сигнал/помеха $Q \geq 10$ дБ и обнаруживать его при $Q \geq 5$ дБ с вероятностью $D = 0,98$. Графическая интерпретация процесса распознавания ИКИ представлена на рисунке 3.

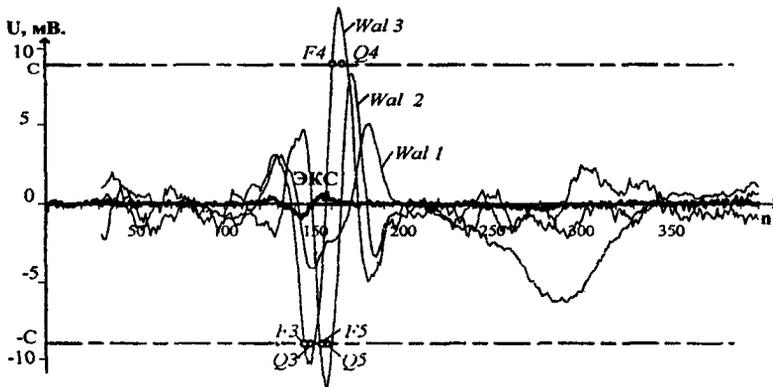


Рисунок 3

В третьей главе разработан структурно-ранговый метод распознавания формы ИКИ, основанный на последовательном ранговом обнаружении фронтов и спадов кардиоимпульсов в условиях интенсивных помех (при отношении сигнал/шум менее 10 дБ). Надежное обнаружение элементов ИКИ данным методом позволяет с высокой достоверностью отнести исследуемый кардиоимпульс к одной из опорных структур.

Для обнаружения элементов ИКИ обоснована целесообразность и предложено использование ранговых алгоритмов проверки статистических гипотез. Проведен сравнительный анализ и систематизированы ранговые алгоритмы. Разработан структурный корреляционно-ранговый (СКР) алгоритм распознавания, заключающийся в установлении взаимосвязи между исследуемым участком сигнала и опорным элементом ИКИ и выявлении статистических различий между этим участком и опорной помехой. Предложенные решающие правила для обнаружения фронтов (А) и спадов (В) ИКИ имеют следующий вид:

$$A = h \left\{ \sum_{j=1}^p \left[h \left(\sum_{i=1}^n R_i \Omega_i^+ - C1^* \right) \right] - K1 \right\};$$

$$B = h \left\{ \sum_{j=1}^p \left[h \left(C1^{**} - \sum_{i=1}^n R_i \Omega_i^+ \right) \right] - K1 \right\},$$

а для положительных (Р) и отрицательных (N) элементов ИКИ

$$P = h \left\{ \sum_{j=1}^p \left[h \left(\sum_{i=1}^n R_i^x - C2^+ \right) \right] - K2 \right\};$$

$$N = h \left\{ \sum_{j=1}^p \left[h \left(C2^- - \sum_{i=1}^n R_i^x \right) \right] - K2 \right\},$$

где $R_i = \sum_{k=1}^n h(x_i - x_k)$ — ранги исследуемой выборки;

$R_i^X = \sum_{l=1}^n h(x_i - x_l) + \sum_{k=1}^m h(x_i - z_k)$ — ранги исследуемой выборки при

ранжировании составной (исследуемой и опорной) выборки; Ω^+ — опорный элемент ИКИ (фронт); C1, C2 — пороги обнаружения; K1, K2 — количество превышений соответствующих порогов.

Процесс обнаружения фронта и спада ИКИ алгоритмом СКР показан на рисунке 4.

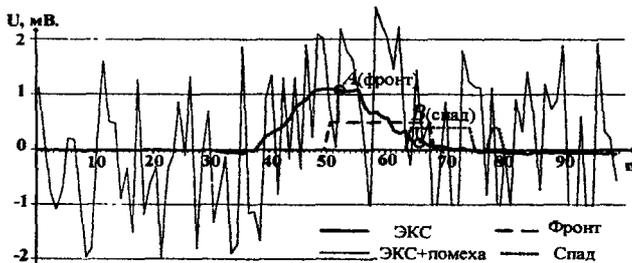
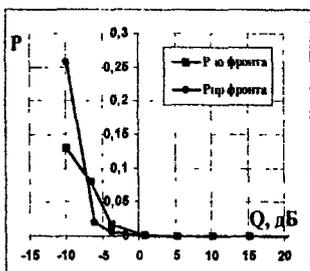
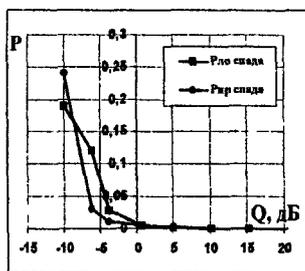


Рисунок 4

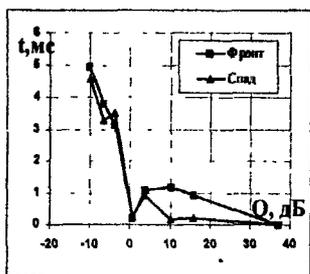
На рисунке 5 показаны графики зависимостей вероятностей ложного обнаружения и пропусков фронтов (рисунок 5,а), вероятностей ложного обнаружения и пропусков спадов (рисунок 5,б), абсолютная систематическая погрешность и среднеквадратическое отклонение обнаружения опорной точки (рисунки 5,в, 5,г) от отношения сигнал/помеха.



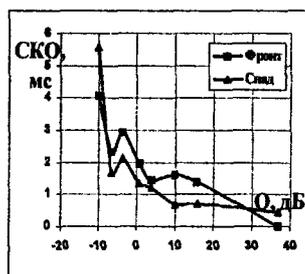
а



б



в



г

Рисунок 5

Для упрощения реализации структурно-рангового метода распознавания ЭКС был разработан алгоритм на основе бинарного квантования дискретных разностей сигнала (БКДР).

Решающие правила в этом случае представим следующим образом:

$$A = h \left\{ \sum_{i=1}^n [h(\Delta_i - C1)] - K \right\};$$

$$B = h \left\{ \sum_{i=1}^n [h(-\Delta_i - C1)] - K \right\};$$

$$P = h(X_i - C2);$$

$$N = h(-X_i - C2),$$

где $\Delta_i = X_{i+1} - X_i$ — дискретные разности сигнала; $C1, C2$ — пороги обнаружения; K — порог по количеству срабатываний. Процедура обнаружения элементов ЭКС алгоритмом БКДР приведена на рисунке 6.

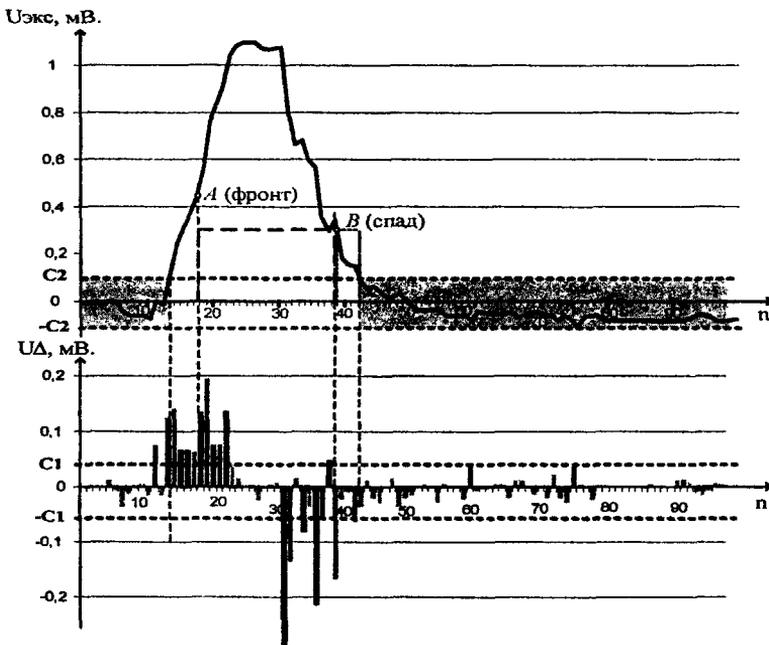


Рисунок 6

Для исследования характеристик разработанных алгоритмов был проведен сравнительный анализ их между собой и в сопоставлении с известными алгоритмами обнаружения ИКИ по предложенным критериям. Для выявления наиболее эффективного из них были исследованы следующие алгоритмы обнаружения ИКИ и их элементов: квадратичный, дифференциально-квадратичный (Pan, Tompkins), СИС, СКР, БКДР. Результаты исследования алгоритмов (P_D – оценка вероятности обнаружения ИКИ) приведены в таблице.

Алгоритм	P_D ($Q = 5$ дБ)	P_D ($Q = 0$ дБ)	P_D ($Q = -5$ дБ)	Количество операций (простых), с
Квадратичный	0,97–0,98	0,85–0,9	0,84–0,86	420 000
Дифференциально-квадратичный	0,8–0,85	0,75–0,8	0,6–0,7	420 000
СИС	0,98	0,97	0,90	270 000
СКР	0,99	0,99	0,94	650 000
БКДР	0,97	0,86	0,75	12 000

Таким образом, наиболее помехоустойчивым является СКР алгоритм, наиболее простым («быстрым») – алгоритм БКДР, в то время как алгоритм СИС по своим характеристикам занимает промежуточное положение.

В главе также сформулированы некоторые направления совершенствования ранговых алгоритмов обработки ЭКС: обнаружение граничных точек ИКИ в условиях интенсивных помех, многоканальные помехоустойчивые алгоритмы обнаружения и распознавания кардиоимпульсов, помехоустойчивый алгоритм распознавания ИКИ на основе разложения ранжированных выборок ЭКС по дискретным базисным функциям.

Четвертая глава диссертации посвящена практической реализации теоретических выводов. Для лучшего понимания путей развития средств автоматической обработки ЭКГ информации, сопоставления особенностей и потребительских характеристик автором предложена систематизация по функциональным признакам. Основными признаками для систематизации являются: длительность исследования, масштаб исследования, двигательная активность пациента, количество исследуемых отведений, наличие центрального стационарного блока. На базе такой систематизации выделено несколько подгрупп средств автоматической обработки ЭКС.

Синтезированы и исследованы обобщенные структуры кардиомониторов, выбраны наиболее перспективные из них для анализа ЭКС в реальном масштабе времени, которые реализованы и внедрены автором.

Разработан комплексный алгоритм принятия диагностических решений, основой анализа при этом служит информация о форме ИКИ, величинах интервалов между ИКИ и значениях отношений этих интервалов. Алгоритм обнаруживает аритмии в текущем режиме по мере выполнения условий, записанных в виде логических выражений, истинность которых означает наступление соответствующих событий.

Каждый кардиоцикл описывается тремя дискретными параметрами

$$M_j = (R_j, L_j, P_j),$$

где R_j — параметр формы ИКИ; L_j — параметр длительности кардиоцикла (R - R интервала); P_j — параметр отношения длительностей соседних кардиоциклов.

ИКИ завершает кардиоцикл с соответствующим номером, т. е. j -й импульс находится в конце j -го интервала. Параметр формы R_j принимает дискретные значения от 0 до N , причем $R_j = 0$ соответствует типичной (нормальной) форме ИКИ; $R_j = 1 \dots N$ — патологической форме.

Параметр длительности кардиоцикла принимает пять дискретных значений $L_j = 0, 1, 2, 3, 4$. Значение $L_j = 0$ соответствует типичной (нормальной) длительности кардиоцикла, $L_j = 1, 2$ — укороченному и удлинённому интервалам, $L_j = 3, 4$ — опасно укороченному и опасно удлинённому интервалам:

$$L_j = \begin{cases} 0, & \text{если } C3 > T_j^{R-R} > C2; \\ 1, & \text{если } C2 > T_j^{R-R} > C1; \\ 2, & \text{если } C4 > T_j^{R-R} > C3; \\ 3, & \text{если } T_j^{R-R} < C1; \\ 4, & \text{если } T_j^{R-R} > C4, \end{cases}$$

где $C1 < C2 < C3 < C4$ — пороги квантования длительностей кардиоциклов.

Параметр отношения длительностей соседних интервалов P_j принимает три дискретных значения:

$$P_j = \begin{cases} 0, & \text{если } K2 > d_j > K1; \\ 1, & \text{если } d_j < K1; \\ 2, & \text{если } d_j > K2, \end{cases}$$

где $d_j = \frac{T_j^{R-R}}{T_{j-1}^{R-R}}$, а $K1 < K2$ – пороги квантования отношений соседних кардиоинтервалов.

Комплексный алгоритм принятия диагностических решений позволяет обнаружить следующие виды аритмий.

Одиночная предсердная (наджелудочковая) экстрасистола

$$F1 = (M_j = 0, 1, 1) \wedge (M_{j+1} = 0, 2, 2).$$

Одиночная желудочковая экстрасистола

$$F2 = (M_j = 1, 1, 1) \wedge [(M_{j+1} = 0, 0, 2) \vee (M_{j+1} = 0, 2, 2)].$$

Ранняя желудочковая экстрасистола

$$F3 = (M_j = 1, 3, 1) \wedge (M_{j+1} = 1, 2, 2).$$

Групповая предсердная экстрасистола

$$F4 = (M_j = 0, 1, 1) \wedge \left\{ \bigcup_{N=2}^5 \left[\bigcap_{j+1=p}^N (M_p = 0, 1, 0) \right] \right\} \wedge (M_{N+1} = 0, 2, 2).$$

Групповая желудочковая экстрасистола

$$F5 = (M_j = 1, 1, 1) \wedge \left\{ \bigcup_{N=2}^5 \left[\bigcap_{j+1=p}^N (M_p = 1, 1, 0) \right] \right\} \wedge [(M_{N+1} = 0, 0, 2) \vee (M_{N+1} = 0, 2, 2)].$$

Интерполированная экстрасистола

$$F6 = [(M_j = 1, 1, 1) \vee (M_j = 1, 1, 0)] \wedge (M_{j+1} = 0, 1, 0).$$

Выпадение QRS-комплекса

$$F7 = (M_j = 0, 0, \times) \wedge [(M_{j+1} = 0, 2, 2) \vee (M_{j+1} = 0, 4, 2)] \wedge (M_{j+2} = 0, 0, 1).$$

Факты асистолии и глубокой брадикардии

$$F8 = (M_j = x, 4, x).$$

Факты пароксизмальной тахикардии

$$F9 = \left[\bigcap_{j=5}^{\infty} (M_j = x, 3, x) \right].$$

Знак «x» означает, что соответствующий параметр может принимать любое значение.

На базе предложенных автором алгоритмов разработаны и внедрены следующие средства автоматической обработки ЭКС:

- анализатор сердечного ритма "ЭЛЕКТРОНИКА АСР-01", внедренный в НИИЭМП (г. Пенза);
- кардиомонитор для анализа нарушений сердечного ритма и проводимости (АНСРП-К1), внедренный на заводе радиоприборов (г. Кузнецк);
- микропроцессорный кардиоанализатор МПКА «КАРДИО», внедренный в ПГИУВ (г. Пенза);
- имитатор биоэлектрических сигналов, внедренный в СКБ моделирования (г. Пенза);
- универсальный измерительно-вычислительный комплекс для исследования ЭКС (УИВК), внедренный в ООО «Энея-Медикал» (г. Пенза);
- микрокардиоанализатор сердечного ритма МКСР-01, внедренный в ЗАО «Триботехника» (г. Пенза).

Кроме того, разработан ряд оригинальных схмотехнических решений узлов кардиомониторов, обеспечивающих повышенные технические характеристики.

В заключении обобщены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований и сделаны выводы по работе.

В приложениях приведены листинги разработанных программ и материалы, подтверждающие внедрение результатов диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации предложены и исследованы помехоустойчивые алгоритмы обработки электрокардиографической информации, а также разработаны технические средства, обеспечивающие принятие диагностических решений в реальном масштабе времени. В работе получены следующие основные результаты:

1. Предложена систематизация помех, возникающих при получении и обработке электрокардиографической информации, позволяющая упорядочить их по степени влияния на результаты распознавания.

2. Предложен укрупненный структурный подход к обработке электрокардиографической информации, в рамках которого создано формальное описание информативных кардиоимпульсов и разработаны их опорные структуры.

3. Разработаны структурно-интегральный метод распознавания электрокардиосигнала и реализующий его структурно-интегральный скользящий алгоритм, основанный на разложении сигнала по дискретным базисным функциям Уолша, обеспечивающий вероятность распознавания кардиоимпульсов 0,9 при отношении сигнал/шум до 0 дБ.

4. Разработаны структурно-ранговый метод распознавания электрокардиосигнала и алгоритмы на его основе: структурный корреляционно-ранговый алгоритм, обеспечивающий распознавание информативных кардиоимпульсов с вероятностью 0,95 при отношении сигнал/помеха до 0 дБ, и алгоритм бинарного квантования дискретных разностей сигнала, имеющий простую техническую реализацию и высокую скорость обработки.

5. Создан комплексный алгоритм принятия диагностических решений, основанный на обработке информации о форме и периодичности следования информативных кардиоимпульсов и обеспечивающий обнаружение наиболее распространенных и опасных нарушений сердечного ритма.

6. Основные результаты диссертационной работы были использованы при создании ряда средств автоматической обработки ЭКС: устройство анализа нарушений сердечного ритма "Электроника АСР-01"; кардиомонитор для анализа нарушений сердечного ритма и проводимости (АНСРП-К1); микропроцессорный кардиоанализатор (МПКА); универсальный измерительно-вычисли-

тельный комплекс для исследования ЭКС (УИВК ЭКС); микрокардиоанализатор сердечного ритма на базе однокристалльной микроЭВМ (МКАСР).

Все разработки внедрены в производство на предприятиях городов Пензы и Кузнецка, а также в учебный процесс в Пензенском государственном университете. Для оценки работоспособности кардиомониторов разработан имитатор БЭС, формирующий тестовые и испытательные сигналы, позволяющий определить точность измерения параметров ЭКС и оценить вероятности обнаружения и распознавания различных диагностических фактов. Кроме того, в процессе выполнения диссертационной работы был создан ряд оригинальных схмотехнических решений узлов кардиомониторов, обеспечивающих повышенные технические характеристики и защищенных авторскими свидетельствами, патентами и свидетельством на полезную модель.

Разработанные в диссертации алгоритмы обработки ЭКГ информации реализованы в сценариях и моделях (Matlab 6.5), программах (Delphi 7), макропрограммах (Microsoft Excel).

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть применены для распознавания различных электрических сигналов сложной формы и обработки содержащейся в них информации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Кривоногов Л. Ю.* Классификация измерительно-диагностических средств для исследования электрокардиосигнала // Научная сессия МИФИ-98: Сб. докл. — М., 1998.— С. 51.

2. *Кривоногов Л. Ю.* Структурно-ранговый подход к распознаванию кардиоимпульсов // Системный анализ, обработка информации и новые технологии: Науч.-техн. журнал. — Пенза: Изд. центр Пенз. гос. ун-та, 2003. — № 10. — С. 39–40.

3. *Кривоногов Л. Ю.* Ранговый алгоритм обнаружения элементов информативных участков электрокардиосигнала // Системный анализ, обработка информации и новые технологии: Науч.-техн. журнал. — Пенза: Изд. центр Пенз. гос. ун-та, 2003. — № 10.— С. 41–42.

4. *Кривоногов Л. Ю.* Возможности применения последовательной ранговой обработки для создания портативной кардиоаппаратуры / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов* // Медицинская техника, 2002. — № 1. — С. 12–14.

5. *Кривоногов Л. Ю.* Вопросы измерения параметров биологических сигналов / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов* // Информационно-измерительная техника: Межвуз. сб. науч. тр. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 1998. — Вып. 23. — С. 53–59.

6. *Кривоногов Л. Ю.* Вопросы помехоустойчивости при измерениях параметров электрокардиосигнала / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов* // Информационно-измерительная техника: Межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. – Вып. 25. – С. 167–173.

7. *Кривоногов Л. Ю.* Возможности структурного подхода к вопросу классификации QRS-комплексов ЭКС / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, Ю. В. Полубабкин, В. М. Шляндин.* – Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1987. – Деп. в ЦБ НТИ Минмедпрома 15.05.87, № 39МП.

8. *Кривоногов Л. Ю.* Применение метода разложений по системам функций Уолша и Хаара к процессу классификации QRS-комплексов ЭКС / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, Ю. В. Полубабкин, Э. К. Шахов.* – Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1986. – Деп. в ВИНТИ 15.10.86, № 7222-B86.

9. *Кривоногов Л. Ю.* Адаптивный алгоритм идентификации формы QRS-комплексов, основанный на секвентном анализе электрокардиосигнала / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, Е. А. Ломтев* и др. – Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1987. – Деп. в ВИНТИ 30.07.87, № 5403-B87.

10. *Кривоногов Л. Ю.* Идентификация импульсов на основе секвентного анализа ранжированных выборок БЭС / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов* // Надежность и качество-2001: Сб. докл. междунар. симп. – Пенза, 2001. – С. 415.

11. *Кривоногов Л. Ю.* Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения информативных импульсов ЭКС / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов* // Информационно-измерительная техника: Межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. – Вып. 26. – С. 91–98.

12. *Кривоногов Л. Ю.* Перспективы применения ранговых методов для обнаружения границ информативных участков электрокардиосигнала / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов* // Биомедприбор-2000: Тр. междунар. конф. Т. 1. – М.: ВНИИМП-ВИТА РАМН, 2000. – С. 128–129.

13. *Кривоногов Л. Ю.* Обнаружение границ информативных участков БЭС в условиях непрерывного изменения параметров сигнала и помех / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов* // Современные информационные технологии. Информационные технологии в медицине: Тр. междунар. науч.-техн. конф. (computer-based conference). – Пенза: Пенз. технолог. ин-т, 2000. – С. 72.

14. *Кривоногов Л. Ю.* Метод измерения параметров электрокардиосигналов при высоком уровне помех / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов* // Радиоэлектроника в медицинской диагностике: Докл. IV междунар. конф. – М., 2001.

15. *Кривоногов Л. Ю.* Возможности применения ранговых алгоритмов при исследовании электрокардиосигналов / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов* // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: Тр. междунар. науч.-техн. конф. «Измерения-2000». – Пенза, 2000. – С. 121–122.

16. *Кривоногов Л. Ю.* Обнаружение границ информативных участков БЭС в условиях непредвиденного изменения параметров сигнала и помех / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, Сун Шуань* // Медико-технические технологии на страже здоровья: Тр. Рос. науч.-техн. конф. – Геленджик, 2000. – С. 28.

17. *Кривоногов Л. Ю.* Метрологические аспекты автоматического анализа электрокардиосигнала / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, М. А. Сидорова* // Информационно-измерительная техника: Межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1992. – Вып. 21. – С. 26–31.

18. *Кривоногов Л. Ю.* Некоторые аспекты оценки точности СААЭКС / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, М. А. Сидорова* // Информационно-измерительная техника: Межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1994. – Вып. 22. – С. 101–107.

19. *Кривоногов Л. Ю.* Вопросы практической реализации системы имитационного моделирования электрокардиосигнала / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, М. А. Сидорова* // Информационно-измерительная техника: Межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1994. – Вып. 22. – С. 32–38.

20. *Кривоногов Л. Ю.* Многофункциональный имитатор биоэлектрических сигналов на базе персонального компьютера / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, М. А. Сидорова* // Информационно-измерительная техника: Межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Изд. центр Пенз. гос. ун-та, 2002. – Вып. 26. – С. 98–104.

21. А.С. 1641272 СССР, МКИ А 61 В 5/04. Устройство для выделения желудочковых экстрасистол / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, И. А. Назарова, Ю. В. Полубабкин.* – Оpubл. 15.04.91. – Бюл. № 14.

22. А.С. 1502008 СССР, МКИ А 61 В 5/04. Селектор QRS-комплексов электрокардиосигнала / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, В. П. Шевченко, В. М. Шляндин.* – Оpubл. 23.08.89. – Бюл. № 31.

23. Пат. 1739967 РФ, МКИ А 61 В 5/04. Селектор QRS-комплексов электрокардиосигнала / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, М. А. Сидорова, И. П. Татарченко.* – Оpubл. 15.06.92. – Бюл. № 22.

24. А.С. 1528445 СССР, МКИ А 61 В 5/04. Детектор формы кардиоимпульсов / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, В. Э. Олейников* и др. Оpubл. 15.12.89. – Бюл. № 46.

25. А.С. 1358931 СССР, МКИ А 61 В 5/04. Детектор желудочковых экстрасистол / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, Ю. В. Полубабкин, В. М. Шляндин.* – Оpubл. 15.12.87. – Бюл. № 46.

26. Пат. 1616600 РФ, МКИ А 61 В 5/04. Детектор желудочковых экстрасистол / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, Ю. В. Полубабкин.* – Оpubл. 30.12.90. – Бюл. № 48.

27. Решение о выдаче свидетельства на полезную модель №2000118923/20(019959) от 16.10.2000. Устройство для анализа кардиосигналов / *В. И. Волчихин, А. И. Иванов, Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов.*

28. *Кривоногов Л. Ю.* Анализ электрокардиосигналов для профилактики осложнений нарушений ритма сердца / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, А. В. Переварин* // Актуальные проблемы профилактики, диагностики и лечения сердечно-сосудистых заболеваний: Сб. докл. Всесоюз. конф. — М., 1986. — С. 41.

29. *Кривоногов Л. Ю.* Устройство автоматического анализа нарушений сердечного ритма / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, И. П. Татарченко* // Тез. докл. II Всесоюз. съезда кардиологов. — Пенза, 1989. — С. 98–99.

30. *Кривоногов Л. Ю.* Анализатор сердечного ритма "Электроника АСР-01" / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, М. А. Сидорова, И. П. Татарченко* // Тез. докл. IV Всесоюз. съезда кардиологов. — Пенза, 1991. — С. 113–114.

31. *Кривоногов Л. Ю.* Устройство анализа нарушений сердечного ритма / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, М. А. Сидорова* // Технический прогресс в промышленности: Ежемес. произв.-техн. сб. — М., 1991. — Вып. 6. — С. 35–38.

32. *Кривоногов Л. Ю.* Устройство для длительного автоматического анализа сердечных ритмов / *Л. Ю. Кривоногов, Ю. В. Полубабкин, В. Э. Олейников* // Актуальные вопросы применения радиоэлектроники в медицине: Докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. — М.; Куйбышев, 1988. — С. 31.

33. *Кривоногов Л. Ю.* Специализированные кардиомониторы для непрерывного анализа нарушений сердечного ритма и проводимости / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, Е. А. Ломтев, В. Э. Олейников, М. А. Сидорова* // Вестник аритмологии. — СПб., 1995. — № 4. — С. 98.

34. *Кривоногов Л. Ю.* Модульный подход к созданию портативной кардиоаппаратуры / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, Е. А. Ломтев, В. Э. Олейников, М. А. Сидорова* // Вестник аритмологии. — СПб., 1998. — № 8. — С. 138.

35. *Кривоногов Л. Ю.* Портативный кардиоанализатор нарушений сердечного ритма на базе специализированной микросхемы / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, Е. А. Ломтев, М. А. Сидорова* // Сб. тр. междунар. конф. «ДИМ-95». — СПб., 1995. — С. 227–228.

36. *Кривоногов Л. Ю.* Портативный цифровой кардиоскоп на базе ОМ-ЭВМ / *Т. В. Истомина, С. В. Агеев, Л. Ю. Кривоногов, Е. А. Ломтев, М. А. Сидорова* // Сб. тез. междунар. конф. «ДИМЭБ-96». — СПб., 1996. — С. 27–29.

37. *Кривоногов Л. Ю.* Портативный кардиомонитор на базе компьютера типа hand held / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, Е. А. Ломтев, Э. В. Толкачев* // Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: Сб. докл. междунар. конф. — Пенза, 1998. — С. 340–341.

38. *Кривоногов Л. Ю.* Перспективы создания помехоустойчивых портативных кардиомониторов / *Т. В. Истомина, Л. Ю. Кривоногов, А. В. Ащепков* // Надежность и качество-2001: Сб. докл. междунар. симп. — Пенза, 2001. — С. 414.

Кривоногов Леонид Юрьевич

**Методы и алгоритмы помехоустойчивой обработки
электрокардиографической информации**

**Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации**

Редактор Т. В. Веденеева

Технический редактор Н. А. Вялкова

Корректор Н. В. Степочкина

Компьютерная верстка Н. В. Ивановой

Сдано в производство 17.09.03. Формат 60x84¹/16.

Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,39.

Заказ № 590. Тираж 100.

Издательство Пензенского государственного университета.

440026, Пенза, Красная, 40

Отпечатано в типографии ПГУ

2003-A

17111

17111