

Казанцев Александр Павлович

**ТЕЛЕМЕДИЦИНСКИЕ СИСТЕМЫ
МОБИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИИ**

Специальность

05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2009

Работа выполнена на кафедре информационно-измерительной и биомедицинской техники ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Прошин Евгений Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Михеев Анатолий Александрович;
кандидат технических наук
Лобан Олег Витальевич

Ведущая организация: **Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара**

Защита состоится 23 октября 2009 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

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

Автореферат разослан 21 сентября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.04
кандидат технических наук, доцент



Борисов А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для повсеместной доступности квалифицированного медицинского обслуживания необходимы специализированные мобильные системы внебольничной (амбулаторной) телемедицины – для скорой помощи, диспансеризации, дистанционного наблюдения и т.д. Социальный заказ на такие разработки имеется не только от ученых и практикующих врачей, которые настойчиво заявляют о необходимости развития мобильных технологий, но и от больных, нуждающихся в динамическом контроле.

Наиболее востребована дистанционная диагностика сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ), которые приводят к высоким социальным потерям и являются лидирующими показателями заболеваемости, нетрудоспособности, инвалидности и смертности – например, в 2005 г. в России умерло 2,3 млн. человек, из них более миллиона (1,29 млн., 56 %) от ССЗ и их осложнений (Е. Чазов). Решая диагностические и лечебные задачи кардиологии, врачи остро нуждаются в объективной и своевременной клинико-функциональной информации. Это относится к первичному обследованию больных, к периоду лечения, а также к периоду наблюдения после завершения курса лечения. Среди неинвазивных методов исследования сердечно-сосудистой системы (ССС) приоритет сохраняет за собой электрокардиография. ЭКГ является наиболее доступным, относительно дешевым и наименее трудоемким методом исследования. Получило распространение суточное амбулаторное мониторирование ЭКГ по методу Холтера. ЭКГ покоя, суточное мониторирование ЭКГ и суточное мониторирование артериального давления в настоящее время являются основными методами исследования на всех этапах ведения кардиологических больных (С. Федорова, Ю. Федулаев). Стала развиваться мобильная электрокардиография (МЭКГ), первые успехи которой в нашей стране связываются с компанией «Альтоника» и коллективом авторов из Москвы и Н. Новгорода (Дроздов Д.В., Леванов В.М., Обухова О.Е., Сергеев Д.В).

Разработка телемедицинских систем для амбулаторных исследований функционально-диагностическими методами является актуальной в свете решения задач Приоритетного национального проекта «Здоровье». Работа выполнялась в рамках НИР 0120.0405640 «Разработка телемедицинского комплекса для дистанционных электрокардиографических исследований» по плану Института биологического приборостроения РАН (2004-2006 г.г.), была поддержана грантом 04-07-97214 РФФИ (2004-2005 гг.) и программой Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине» (2005 г.).

Цель исследования – повышение эффективности телемедицинских систем МЭКГ на основе подхода с использованием IP-сетей, беспроводных соединений и информационных технологий. Были поставлены следующие **задачи**:

- 1) разработать метод синтеза и оптимизации телемедицинских систем для амбулаторных клинико-функциональных исследований;
- 2) построить архитектурный каркас системы МЭКГ и ее основных агрегатов;
- 3) оптимизировать цифровое представление электрокардиосигналов для мобильной электрокардиографии;
- 4) сформировать типы систем МЭКГ, выполнить их синтез, провести испытания, экспериментальное исследование и апробацию.

Объект исследования – организация амбулаторных дистанционных диагностических исследований больных с патологией ССС, нуждающихся в экстренной помощи или

динамическом контроле. **Предмет исследования** – телемедицинские системы амбулаторных клиничко-функциональных исследований на основе методов ЭКГ.

Методы исследования. Применялись методы объектно-ориентированного анализа и проектирования, теории информации, цифровой обработки сигналов, теории графов, теории множеств, системного программирования. Использовались язык моделирования UML, среда системного проектирования (CASE-средство) Enterprise Architect и следующие инструменты программирования: LabVIEW 7.0, MS Visual Studio 2005 (C++, C#, Visual Basic .NET), Metrowerks CodeWarrior (v. 9, Palm OS). Экспериментальные исследования проводились на пилотных сетях мобильной электрокардиографии, развернутых в Московской области.

Научная новизна

1. Предложен модельно-ориентированный метод синтеза развивающихся телемедицинских систем для амбулаторных клиничко-функциональных исследований, основанный на итерационном процессе и применении шаблонов проектирования, отличающийся двухкритериальной оценкой эффективности решений по длительности и себестоимости исследований, уменьшающий вдвое по сравнению с каскадным методом трудоемкость проектов развития или модификации систем при обеспечении их робастности.

2. Разработан агрегированный каркас системы МЭКГ с возможностью интеграции комплекса диагностических методов, развертываемый в виде инвариантной к телекоммуникациям IP-сети автономных серверов-анализаторов и автономных клиентов-регистраторов, обеспечивающий в сравнении с телефонной электрокардиографией уменьшение длительности диагностических исследований без увеличения их себестоимости, а в сравнении с системами на основе центрального сервера – уменьшение обоих показателей.

3. Предложен метод оптимизации цифрового представления ЭКС, основанный на критерии остаточной среднеквадратической погрешности, позволяющий снизить общепринятые требования к разрядности аналого-цифрового преобразования сигналов, к разрешению устройств их графического отображения и к скорости передачи данных в реальном масштабе времени.

4. Синтезированы типовые системы МЭКГ для скорой кардиологической помощи и для амбулаторной функциональной диагностики, отличающиеся аппаратно-программной интеграцией серийных электрокардиографических приборов и коммутаторов в составе мобильных телемедицинских комплексов с беспроводной связью. Показано, что, обеспечивая своевременность диагностики, предложенные системы повышают качество медицинской помощи в сравнении с обычной практикой.

Практическая значимость и результаты внедрения

Возможные области применения полученных результатов: скорая кардиологическая помощь, дистанционная функциональная диагностика, домашняя телемедицина, диспансеризация населения, военная медицина, медицина катастроф, медицина на транспорте, медицина на изолированных территориях, спортивная медицина, образовательные программы.

Выполнены следующие работы по внедрению полученных результатов.

1. Разработана методика проектирования телемедицинских систем МЭКГ и спроектированы 2 типовые системы – для скорой телекардиологической помощи и для дистанционной функциональной диагностики ССС, которые успешно прошли клиническую

апробацию и используются в Москве и Московской области, о чем свидетельствуют акты реализации результатов НИР.

2. В Московском областном научно-исследовательском клиническом институте им. М.Ф. Владимирского (МОНИКИ) на основе результатов диссертации выполнена НИР «Разработка и внедрение на уровне оказания первичной медико-санитарной помощи (центры общей врачебной практики, амбулаторно-поликлинические учреждения, сельские участковые больницы) дистанционной кардиологической функционально-диагностической сети с использованием технологий мобильной телефонии».

3. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс Пушкинского государственного университета на базе учебно-научного центра биомедицинской инженерии Института биологического приборостроения РАН.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Модельно-ориентированный итерационный метод синтеза развивающихся робастных телемедицинских систем для амбулаторных клинко-функциональных исследований, отличающийся двухкритериальной оптимизацией по длительности и себестоимости исследований, снижающий в 2 раза и более трудоемкость проектов развития или модификации систем по сравнению с известным каскадным методом.

2. Агрегированный каркас системы МЭКГ, развертываемый в инвариантную к телекоммуникациям IP-сеть автономных серверов-анализаторов и автономных клиентов-регистраторов, который обеспечивает уменьшение длительности исследований ЭКГ покоя на 30 % при эквивалентной себестоимости в сравнении с телефонными системами, поддерживает в отличие от них суточное мониторирование ЭКГ и другие методы диагностики, а по сравнению с централизованными IP-системами обеспечивает уменьшение на 60 % себестоимости исследований при заведомо меньшей их длительности.

3. Типовые системы МЭКГ для скорой кардиологической помощи и для амбулаторной функциональной диагностики с аппаратно-программной реализацией МТК на основе коммутаторов, которые в сравнении с обычной практикой обеспечивают: при скорой помощи – исключение пропусков срочной госпитализации и сокращение на 60 % общего числа транспортировок больных; при функциональной диагностике – сокращение в 3 раза срока амбулаторного наблюдения и в 1,5 раза пребывания в стационаре, уменьшение в 4,5 раза числа острых коронарных событий и увеличение в 30 раз коронарных вмешательств.

Научные мероприятия и выставки, где были представлены и **апробированы** результаты диссертационного исследования: IV международная конференция по реабилитологии в Центре реабилитации Медицинского центра Управления делами Президента РФ, Москва, 2002 г.; V и VI научно-практические конференции Главного клинического госпиталя МВД России «Диагностика и лечение нарушений регуляции сердечно-сосудистой системы», Москва, 2003 и 2004 гг.; Международный форум и выставка "ИНТЕРПОЛИТЕХ. Средства обеспечения безопасности государства», Москва, 2003, 2004 и 2007 гг.; Международная выставка «Здравоохранение», Москва, 2003, 2005-2007 гг.; симпозиум Центра реабилитации Медицинского центра Управления делами Президента РФ «Использование математических и информационных методов в медико-социальной сфере», Москва, 2004 г.; Московская областная научно-практическая конференция «Дистанционная многоуровневая региональная служба функциональной диагностики Московской области», МОНИКИ, Москва, 2004 г.; научная сессия Отделения информационных технологий и

вычислительных систем РАН совместно с Отделением математических наук РАН и Отделением биологических наук РАН «Развитие телемедицины в России», Москва, 2004 г.; III всероссийская специализированная выставка "Российские производители и снабжение Вооруженных Сил", Москва, 2005 г.; II международная конференция «Наука-Бизнес-Образование. Биотехнология – Биомедицина – Окружающая среда», Москва, 2005 г.; научная конференция по итогам работы в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине», 2005 г.; Российская национальная выставка в Пекине (презентация на стенде ФГУП «ЦНИИ «Комета»), 2006 г.; Школа-конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Биомедицинская инженерия – 2007», Пущинский научный центр, 2007 г.; Медико-фармацевтический конгресс и XIV международная фармацевтическая выставка «Аптека-2007», Москва, 2007 г.; VIII всероссийская научно-практическая конференция «Технологии функциональной диагностики в современной клинической практике», Москва, 2007 г.; III Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине», Троицкий научный центр, 2008 г.

Достоверность научных положений и выводов подтверждается математическими обоснованиями, реализацией предложенных решений и результатами экспериментов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ, из них 8 – в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (159 наименований) и приложения (7 актов внедрения и реализации НИР), содержит 199 с., в том числе 116 с. основного текста, 90 рисунков и 33 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования; определены цель и задачи работы; перечислены новые научные результаты проведенного исследования; сформулирована практическая ценность результатов, приведены сведения об их апробации и внедрении; сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе делается аналитический обзор информационно-коммуникационных технологий телемедицины. Отмечено, что сети на основе протоколов TCP/IP, как глобальный Интернет, так и корпоративный интранет, получают все большее распространение. Принципиальное значение имеет беспроводная связь, где ведущая роль отводится массовым мобильным цифровым технологиям.

Описываются подходы к решению проблем передачи медицинской информации – применяется развивающийся стандарт HL7 электронного обмена документами, большое внимание уделяется защите от несанкционированного доступа к медицинским данным.

Отмечается, что разрабатываются системы дистанционного наблюдения за пациентами в домашних условиях и системы с мобильными измерительно-вычислительными комплексами. Внимание разработчиков привлекли возможности сотовой связи, стали выпускаться сопряженные с сотовыми телефонами электрокардиографические и иные регистраторы, оперативно обеспечивающие телемедицинские службы функционально-диагностической информацией о состоянии больного в мобильных условиях.

Подчеркивается, что появление карманных персональных компьютеров, а затем

смартфонов и коммуникаторов привело к созданию нового класса портативных диагностических комплексов. Встали задачи унификации и стандартизации как аппаратных, так и программных компонентов, которые невозможно решить вне комплексного объектно-ориентированного подхода к анализу и проектированию систем для амбулаторных клинико-функциональных исследований.

Сделан обзор современных методов объектно-ориентированного анализа и проектирования (ООА/П), которые основываются на принципе комплексной разработки и производства – Integrated Product Development (IPD). Процесс IPD (рис. 1) организуется по так называемой V-модели – стадия интеграции и тестирования изображается на одном уровне со стадией выработки требований и разработки системы для того, чтобы явно показать передачу процедур тестирования, разрабатываемых на ранней стадии. IPD является рекурсивным процессом, воспроизводимым на всех его стадиях.

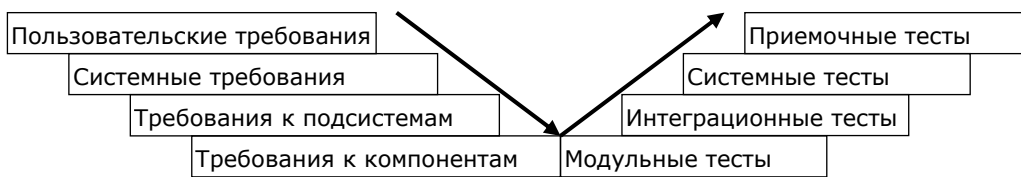


Рис. 1. V-модель классификации требований и тестов

Подчеркивается, что ООА/П принципиально основывается на моделировании – разрабатываемая система представляется набором многоаспектных моделей разного уровня абстракции. Недавно был предложен графический язык моделирования UML – Unified Modeling Language, используемый в основном для программных систем. Для аппаратно-программных систем предлагаются комплексный метод ООА/П (КООА/П) и расширение языка. КООА/П обеспечивает интеграцию инженерных моделей с архитектурой систем. Все методы ООА/П предусматривают использование шаблонов как образцов проектирования или архитектуры, повышающих эффективность синтеза систем.

Делается введение в методологию разработки программного обеспечения. Отмечено, что находят применение несколько близких методов ООА/П. Наиболее распространенным является метод унифицированного процесса (УП), который охватывает построение, развертывание и поддержку разрабатываемой программной системы. Это гибкий и открытый итерационный процесс, позволяющий расширение. Важную роль в УП играет представление программной архитектуры, отражающее ее наиболее важные аспекты: структуру, модули, главные компоненты и потоки управления.

Далее в первой главе проводится объектно-ориентированный анализ технологий мобильной телемедицины применительно к амбулаторному медицинскому обслуживанию.

Анализируется контекстное окружение телемедицинской системы, которое иллюстрирует диаграмма «Процесс медицинского обслуживания» (рис. 2). В данном контексте определяются сущности мобильного и консультационного терминальных комплексов, после чего анализ переходит к обобщенной модели мобильного сервиса, представляемой диаграммой вариантов использования и рядом других артефактов моделирования. В рамках модели сравниваются две распространенные в телемедицине сетевые топологии, рассматриваются принципы построения терминальных комплексов.

В обоснование задач исследования разбираются недостатки существующих систем.

Предлагается подход к синтезу систем мобильной телемедицины, основанный на двух требованиях, являющихся показателями эффективности медицинского обслуживания:

- 1) система должна сокращать длительность диагностических исследований для обеспечения своевременности врачебных решений;
- 2) система должна обеспечивать снижение затрат на диагностику и лечение.

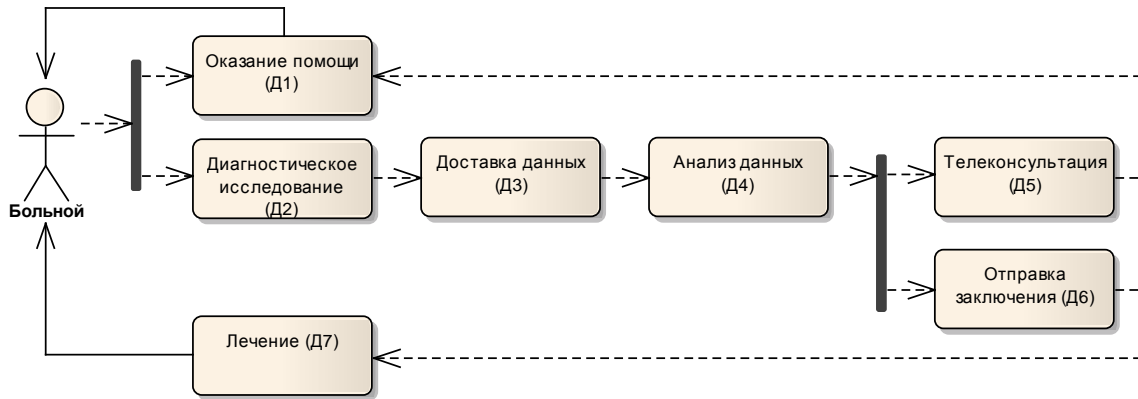


Рис. 2. Процесс медицинского обслуживания

В заключение с учетом требований эффективности медицинского обслуживания как главного архитектурного фактора телемедицинских систем выводятся формулировки задач диссертационного исследования.

Во второй главе излагается метод синтеза телемедицинских систем для амбулаторных клиничко-функциональных исследований и дается их архитектурное представление на примере архитектуры систем МЭКГ. Метод предназначен для повышения эффективности проектирования, производства и сопровождения с оптимизацией в течение жизненного цикла проекта и после его окончания. В основу положены принципы IPD, УП и модельно-ориентированной архитектуры. Используется расширенный язык UML с применением шаблонов.

Предложенный метод синтеза является итерационным V-процессом (рис. 3). После каждой итерации получается новая версия архитектуры, полнее или лучше в сравнении с предыдущей удовлетворяющая поставленным медицинским задачам. Архитектура как концепция системы разрабатывается в виде иерархии моделей.

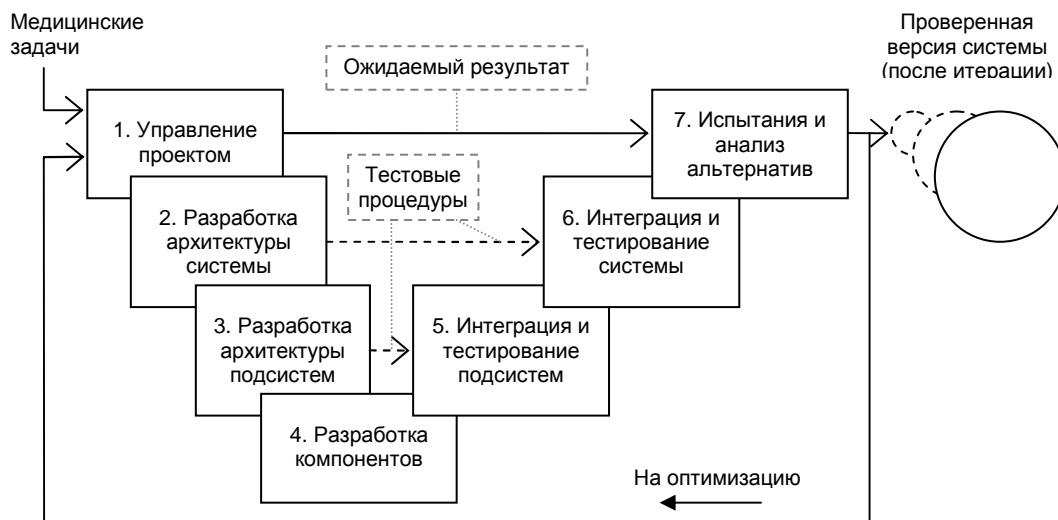


Рис. 3. Итерационный V-процесс синтеза с накоплением результата. После анализа альтернативных вариантов выполняется очередная итерация с оптимизацией

Эффективность системы предложено оценивать двумя показателями – средней длительностью τ и средней себестоимостью ζ диагностического исследования. Задача оптимизации при этом решается в двухкритериальной постановке по Эджворту-Парето. Оптимальными считаются неуплощаемые по обоим показателям варианты системы, из множества которых делается экспертный выбор. Длительности фаз Д2-Д5 процесса обслуживания (рис. 2) и задержек между ними используются как параметры оптимизируемой системы, т.к. они адекватно характеризуют ее в телемедицинском контексте. Фазы образуют последовательную цепь, а задержки считаются дополнительными звеньями в ней. Совокупность параметров τ_i ($i=1,2,\dots,n$) представляется вектором $\boldsymbol{\tau}=(\tau_1,\dots,\tau_n)$, вводятся ограничения в форме $\tau_{i\min} \leq \tau_i \leq \tau_{i\max}$. Эффективность представляется вектором оценки $\mathbf{y}=(\tau,\zeta)$, $\mathbf{y} \in Y$, где Y – множество допустимых оценок, которое определяется некоторой функциональной зависимостью $\mathbf{y} = f(\mathbf{x})$ и ограничениями. Функция $\mathbf{y} = f(\boldsymbol{\tau})$ заменяется парой зависимостей: $\tau = f_1(\boldsymbol{\tau})$ – для длительности τ , $\zeta = f_2(\boldsymbol{\tau})$ – для себестоимости ζ . Зависимость f_1 выражается как

$$\tau = \sum_{i=1}^{i=n} \tau_i . \quad (1)$$

Зависимость f_2 также сводится к линейной форме

$$\zeta = \sum_{i=1}^{i=n} c_i \tau_i + C , \quad (2)$$

где c_i – цена времени i -й фазы, C – константа. Функциональные ограничения для f_1 и f_2 представляются как $\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}$ и $\zeta_{\min} \leq \zeta \leq \zeta_{\max}$. Предлагается метод приближенного определения множества $P(Y)$ эффективных оценок как границы области Y с помощью статистических оценок параметров распределения $w(\tau,\zeta)$. Указывается, что можно найти подмножество оптимальных решений по правилу Парето, согласно которому для движения в сторону любого оптимума необходимо улучшать хотя бы один из показателей эффективности, не ухудшая другой.

Для выбора оптимальной сетевой организации проводится сравнительный анализ двух вариантов топологии по характеристикам цепей доставки данных от мобильного телемедицинского комплекса (МТК) к консультационному (КТК). Показаны преимущества структур «точка-точка» (ТТ) перед централизованными в надежности, отказоустойчивости и робастности. Также системы ТТ отличает меньшее время доставки данных. Отмечается преимущество топологии ТТ в возможности реализации потоковой передачи данных. Недостатки централизованных систем объясняются их избыточностью.

Рассматривается влияние топологии на показатели эффективности. Длительность диагностического исследования τ , вычисляемая по выражению (1), при одинаковых условиях оказывается больше в централизованной системе не менее чем на $\Delta\tau = \tau_s + \tau_{c2} + \Delta\tau_o$, где τ_s – задержка данных на сервере, τ_{c2} – время передачи данных с сервера на КТК, $\Delta\tau_o$ – разность потерь времени при отказах в цепи доставки (все слагаемые положительные средние величины). Себестоимость исследования ζ , вычисляемая согласно (2), также больше при централизованной системе и не менее чем на

$\Delta\zeta = c_s\tau_s + c_{c2}\tau_{c2} + c_o\Delta\tau_o$, где c_s – цена прохождения данных через сервер, c_{c2} – цена времени доставки данных с сервера на КТК, c_o – цена потерь времени при отказах в цепи централизованной доставки. Сравнение показывает, что в равных условиях архитектура с топологией ТТ выигрывает по обоим показателям эффективности у централизованной, где их увеличение в силу избыточности структуры обусловлено задержкой на сервере, лишним соединением и дополнительными потерями времени на восстановление после отказов.

Показано, что каркасом системы для амбулаторных клиничко-функциональных исследований может служить развивающаяся информационная измерительная система (ИИС), в которой устанавливаются соединения удаленных терминальных комплексов для осуществления прямых процессов дистанционной диагностики – регистрации, передачи и обработки данных. Архитектура ИИС складывается из трех основных коопераций (рис. 4).

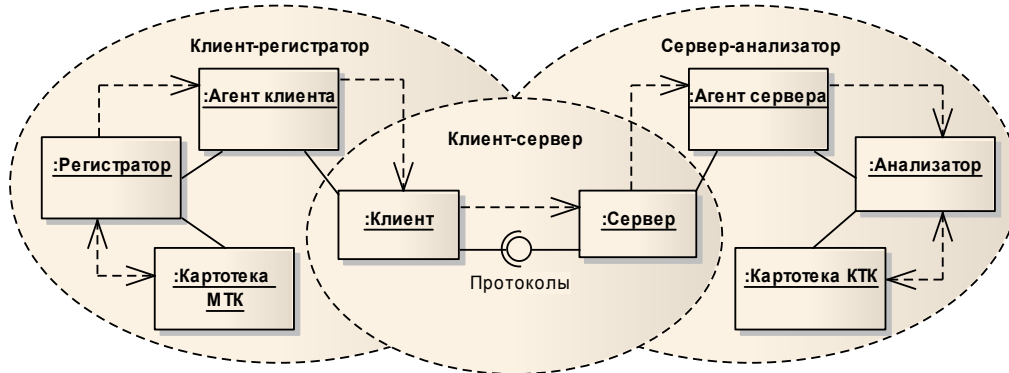


Рис. 4. Кооперации информационно-измерительной системы

1. «Клиент-регистратор». Служит каркасом мобильного комплекса и включает в себя: регистратор, картотеку МТК, клиент, агент клиента.

2. «Сервер-анализатор». Служит каркасом консультационного комплекса и включает в себя: сервер, агент сервера, картотеку КТК, анализатор.

3. «Клиент-сервер». Является центральной частью каркаса ИИС, включает в себя клиент МТК и сервер КТК.

Доказывается, что организация дистанционного взаимодействия МТК и КТК на основе модели ТСР/IP позволяет развертывание ИИС в виде инвариантной к способам соединений IP-сети клиентов-регистраторов и серверов-анализаторов без ограничения их количества. На этой основе обеспечивается высокая устойчивость к отказам доставки данных за счет глубокого резервирования сервисов и автоматического восстановления соединений (рис. 5).

Обосновывается утверждение, что существенным фактором робастности является автономность телемедицинских комплексов, обеспечиваемая применением локальных баз данных (картотек исследований). Картотека МТК позволяет проводить запись и хранение клиничко-функциональной информации в отсутствие сетевого соединения с сервером. Картотека КТК предоставляет возможности хранения получаемых от МТК данных и манипулирования ими без использования внешних сервисов.

Показано, что каркасы МТК и КТК системы МЭКГ могут быть разложены на два ряда принципиальных механизмов, которые используют отдельные для МТК и КТК логические модели данных, согласованные с информационной моделью прикладной области и между собой. Обосновывается, что программная реализация механизмов на основе абстрактных классов повышает эффективность модификации и развития систем при высокой робастности,

которая обеспечивается оптимальным распределением функциональности по элементам механизмов и изоляцией данных. Предложено в состав механизмов включать формы пользовательского интерфейса и изолирующие классы-агенты. Выделенные механизмы предлагается использовать как логическую основу серии компонентов для элементной базы телемедицинских систем.

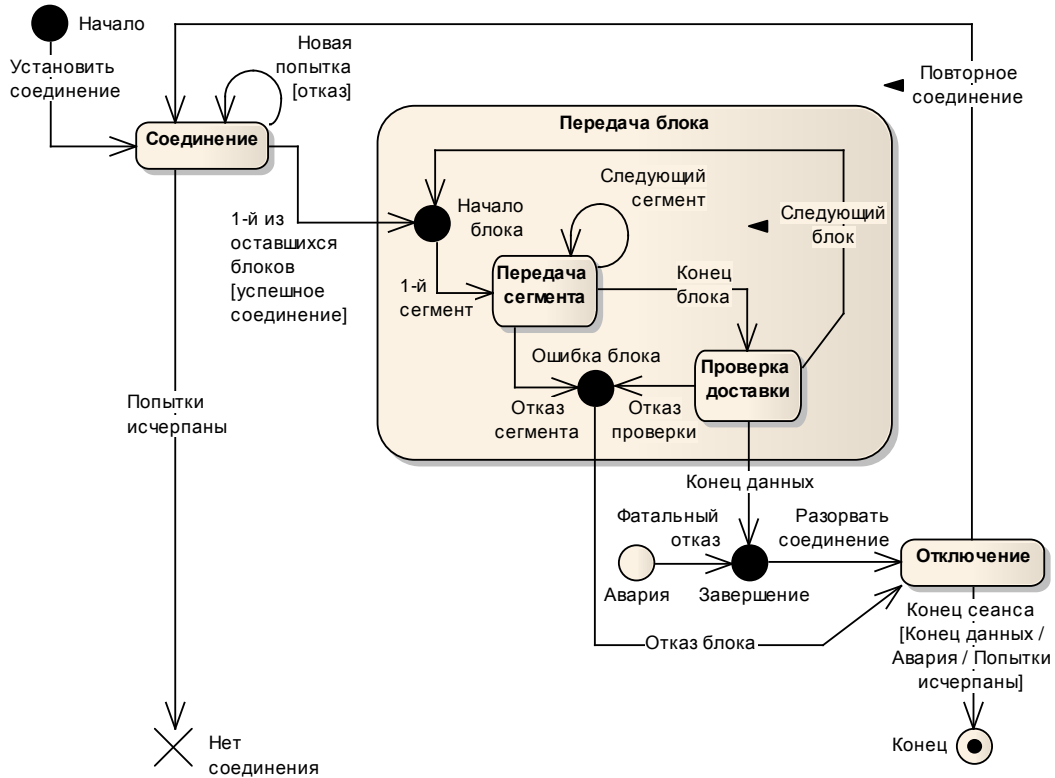


Рис. 5. Конечный автомат доставки данных с восстановлением соединения

Предложенные архитектурные принципы предполагают изменчивость и расширяемость системы. Показано, что архитектура программного управления каркаса МТК обладает полиморфизмом в отношении функционально-диагностических методик и может использоваться как шаблон клиента-регистратора. В этом отношении архитектура программного управления каркаса КТК также обладает полиморфизмом и может служить шаблоном сервера-анализатора. Предлагаемый шаблон КТК позволяет подключение множества аналитических программ, что в совокупности с инвариантной к измерительным методикам реляционной моделью данных придает консультационному комплексу интеграционные возможности.

Третья глава содержит описание подхода к анализу электрокардиосигналов (ЭКС) и их преобразований в аспекте мобильной телемедицины. Предложенный метод анализа основывается на линейной модели аддитивной смеси истинного ЭКС и помех,

$$x(t) = s(t) + y(t) + u(t) + v(t), \quad (3)$$

где $x(t)$ – реальный ЭКС, $s(t)$ – истинный ЭКС, $y(t)$ – низкочастотные флуктуации изолинии истинного ЭКС, $u(t)$ – наводка промышленной сети, $v(t)$ – широкополосный шум, включая миографический. Разность

$$\theta(t) = x(t) - s(t) = y(t) + u(t) + v(t) \quad (4)$$

представляет собой погрешность преобразования истинного ЭКС в реальный. Для анализа используются случайные последовательности $\{X_i\}$, $\{S_i\}$, ..., $\{\Theta_i\}$. Рассматривается

информационная связь сигналов в преобразовании $\{S_i\} \rightarrow \{X_i\}$. Для получения предельной оценки количества информации в одном отсчете ЭКС члены внутри последовательностей считаются статистически независимыми. Значения $s \in S$ рассматриваются как сообщения на входе преобразователя $\{S_i\} \rightarrow \{X_i\}$, а значения $x \in X$ – как его выходные сигналы. Количество информации в X

$$I(X, S) = h(X) - h(X/S) = h(X) - h(\Theta) \quad (5)$$

при статистической независимости Θ и S . Выражение (5) учитывает дезинформацию помех $h(\Theta)$, уменьшающую информацию об S , которую приносит X . $h(\Theta)$ можно понизить, удалив обработкой $x(t)$ какую-то часть помех. Однако всегда будет оставаться неустранимая погрешность как следствие перекрытия спектров истинного сигнала и помех. Остаточную среднеквадратическую погрешность (ОСКП) σ_0 предлагается принять в качестве критерия точности восстановления истинного ЭКС.

Показано, что ОСКП вместе с дифференциальной энтропией реального ЭКС определяет количество его собственной информации (ε -энтропию) в виде

$$H_\varepsilon(X) = h(X) - \log \sqrt{2\pi e \sigma_0^2}, \quad (6)$$

а также пропускную способность каналов передачи информации и параметры ее преобразователей. Предлагается метод получения оценки $\tilde{\sigma}_0$, использующий стабильность истинного ЭКС в сегментах ТР и заключающийся в следующем. Производится выборка m сегментов из множества реальных ЭКС, удалением флуктуационной составляющей из каждого сегмента выделяется фрагмент смеси наводки и шума в виде $x_0(k) \approx u(k) + v(k)$ ($k = 0, 1, 2, \dots, n-1$). Каждый l -й фрагмент ($l = 1, \dots, m$) имеет нулевую постоянную составляющую и используется для вычисления корреляционной функции вида

$$R_{xx}^{(l)}(j) = \sum_{k=0}^{n-1} x_0^{(l)}(k)x_0^{(l)}(j+k) \text{ при } j = -(n-1), \dots, 0, 1, \dots, n-1; \quad x_0^{(l)}(j+k) = 0 \text{ для } j+k < 0 \text{ и}$$

$j+k \geq n$. Вычисляется усредненная корреляционная функция $\bar{R}_{xx}(j) = \frac{1}{n \cdot m - 1} \sum_{l=1}^m R_{xx}^{(l)}(j)$, и

из нее на основании теоремы Винера-Хинчина получается спектр плотности мощности смеси шума и наводки. Численно-графическим способом из полученного спектра сначала удаляется спектральная компонента наводки, а затем выполняется аппроксимация спектра плотности мощности широкополосного шума. Суммированием значений восстановленного спектра шума в диагностически значимом частотном диапазоне определяется дисперсия $\tilde{\sigma}_0^2$, откуда и получается искомая оценка.

Показана эффективность полиномиальной аппроксимации для устранения флуктуаций (дрейфа) изолинии ЭКС (рис. 6). Приводится метод множественной линейной регрессии, используемый для аппроксимации.

Обосновывается подход к оптимизации телемедицинских ИИС по информационным характеристикам электрокардиосигналов, который позволяет минимизировать ресурсы систем и выполнять согласование их агрегатов, таких как: АЦП, аппаратные интерфейсы, программные модули, устройства графического вывода и др. Показано, что при выбранной полосе частот ОСКП определяет оптимальную величину кванта цифрового представления

сигналов, а также оптимальное число градаций и минимальную разрядность для заданного динамического диапазона.

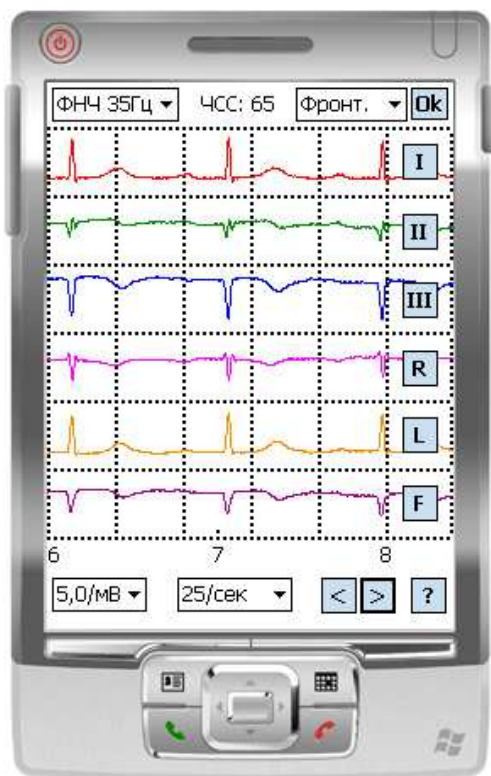


Рис. 6. Устранение дрейфа изолинии

Излагается подход к реализации отдельных терминальных комплексов и телемедицинской сети в целом, который определяется назначением системы, а конкретные конфигурации – эффективностью для конкретных условий. Предполагается необходимость типовых решений, к которым относятся скорая кардиологическая помощь и функциональная диагностика сердечно-сосудистой системы.

Предложена архитектура информационных измерительных микрокомплексов для реализации портативных клиентов-регистраторов на коммуникаторных платформах. На рис. 7 представлена диаграмма развертывания микрокомплекса для скорой помощи. На рис. 8 показан вариант состава микрокомплекса для амбулаторной функциональной диагностики с дополнительным телефоном-модемом спутниковой связи. Предложенная архитектура отличается гибкостью, позволяет эффективную реализацию человеко-машинного интерфейса и локальных баз данных. На этой основе разработан ряд микрокомплексов. Опыт показал, что они отличаются постоянной готовностью и высокой мобильностью, сокращают длительность дистанционных диагностических исследований и снижают их стоимость. Итерационный метод синтеза с наследованием архитектурных образцов обеспечил последовательную реализацию систем мобильной электрокардиографии с клиентами-регистраторами на различных платформах коммуникаторов и им подобных. Апробированный модельно-ориентированный метод позволяет продлевать жизненный цикл проектов, обеспечивая модификацию и развитие ранее синтезированных систем.

Показано, что каждый консультационный телемедицинский комплекс, благодаря своему серверному компоненту, может функционировать автономно и изолированно от Интернета – соединения «точка-точка» с клиентами-регистраторами могут осуществляться в локальной сети стандарта Ethernet или через модемные подключения посредством службы

Оптимизация разрядности позволяет минимизировать требования к компонентам системы МЭКГ и открывает возможность применения в качестве вычислительной платформы малоразрядных контроллеров, а также мобильных устройств (КПК, смартфонов, коммуникаторов). При оптимизации графического вывода разрешение экранов мобильных устройств оказывается достаточным для отображения электрокардиосигналов без потерь.

В заключение показывается, что целочисленное адаптивное дельта-кодирование позволяет эффективное сжатие ЭКС в 3-7 раз и обеспечивает их передачу по низкоскоростным (5-23 кбит/с) каналам связи в реальном масштабе времени.

Четвертая глава посвящена реализации и применению информационных измерительных систем мобильной электрокардиографии.

удаленного доступа. Для Интернет-соединений сервер должен иметь фиксированный IP-адрес, а при его отсутствии возможно использование динамических доменных имен.

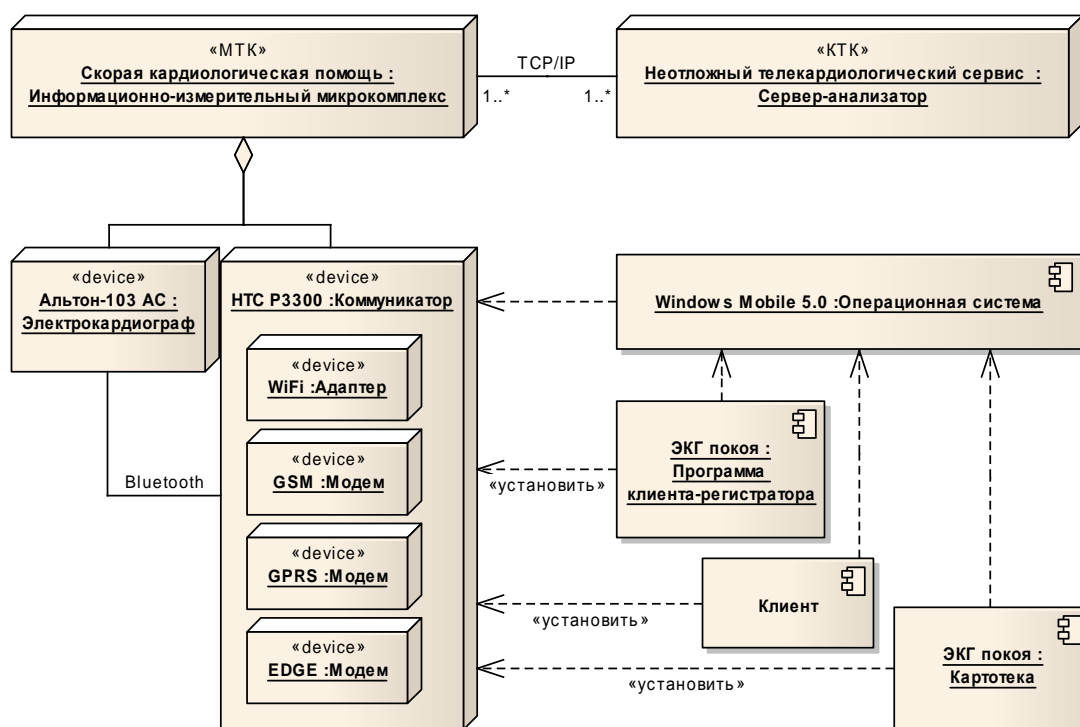


Рис. 7. Диаграмма развертывания информационно-измерительного микрокомплекса для скорой кардиологической помощи

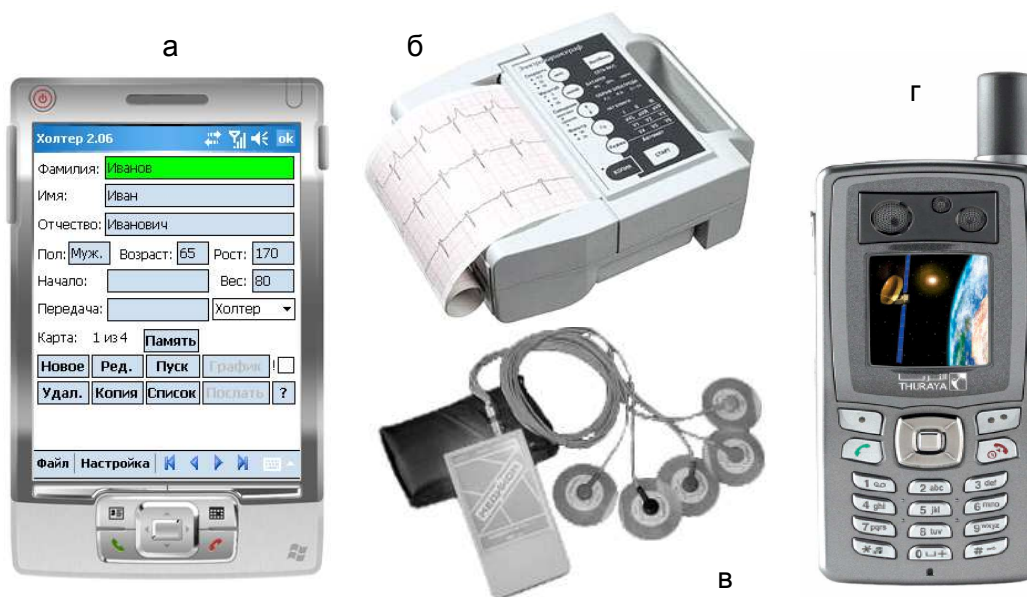


Рис. 8. Вариант агрегатного состава микрокомплекса амбулаторной функциональной диагностики: а – коммуникатор; б – электрокардиограф переносной многоканальный; в – носимый аппарат СМЭКГ; г – спутниковый телефон-модем

Разработан интегрированный сервер-анализатор для телемедицинской службы амбулаторной функциональной диагностики, который охватывает различные диагностические методики, предоставляя оператору-консультанту пользовательский интерфейс для манипуляций данными исследований с использованием локальной картотеки.

Апробированы типовые телемедицинские системы мобильной электрокардиографии – для скорой кардиологической помощи и для амбулаторной функциональной диагностики.

Натурный эксперимент с системой МЭКГ для скорой кардиологической помощи показал, что амбулаторное исследование по 12-канальной методике ЭКГ покоя с дистанционной диагностикой может быть выполнено за 14 мин, экстренная диагностика – за 6 мин (регистрация ЭКГ – передача данных – анализ). В табл. 1 представлены результаты клинической апробации системы МЭКГ в обычной службе скорой медицинской помощи (СМП) с дистанционным участием консультанта-кардиолога. Ситуации, в которых система применялась выездными бригадами СМП, распределены по трем характерным категориям. Показано, что телемедицинское взаимодействие выездных бригад с удаленным консультантом-кардиологом позволяет повысить качество скорой медицинской помощи.

Таблица 1. Результаты применения системы МЭКГ для скорой кардиологической помощи

Ситуация по ЭКГ, характеризующая группу больных	%	Телемедицинское взаимодействие, решение после телеконсультаций	Автономная работа и действия без телеконсультаций
ЭКГ-признаки инфаркта миокарда	31	После уточнения клинической картины – экстренная госпитализация для интенсивной терапии	Затруднения с интерпретацией ЭКГ, ошибочный диагноз, пропуск своевременной госпитализации
Острые нарушения сердечного ритма	26	Рекомендации по купированию нарушений ритма. Госпитализация только в 1/3 случаев	Госпитализация во всех случаях – 2/3 ошибочно
Норма	43	Лечение на месте по дистанционной рекомендации кардиолога	Частые случаи необоснованной транспортировки для госпитализации

Проведена апробация системы МЭКГ для амбулаторной функциональной диагностики ССЗ методом суточного мониторинга ЭКГ. Показано (табл. 2), что телемедицинская методика с применением предложенной системы в отличие от обычной практики позволяет значительно сократить сроки амбулаторного наблюдения и резко уменьшить количество острых коронарных событий (острого инфаркта миокарда – ОИМ, внезапной смерти – ВС).

Таблица 2. Оценка показателей длительности и эффективности догоспитального обследования больных со скрытыми формами ишемической болезни сердца (1-я группа – с телемедицинским обеспечением, 2-я группа – обычная практика)

Показатель	1-я группа n=38	2-я группа n=42
Длительность амбулаторного периода наблюдения, дни	4,3±2,8	12,2±3,7
Длительность стационарного периода наблюдения, дни	11,4±2,7	17,2±3,5
Количество ОИМ на амбулаторном этапе	0	2 (4,8 %)
Количество случаев ВС на амбулаторном этапе	0	1 (2,4 %)
Количество случаев ОИМ на стационарном этапе	2 (5,3%)	5 (11,9 %)
Количество случаев ВС на стационарном этапе	0	1 (2,4 %)
Частота диагностических коронарных вмешательств за период наблюдения	17 (44,7 %) n=36 (38-2)	1 (2,4 %) n=33(42-9)
Частота случаев лечебных коронарных вмешательств за период наблюдения	14 (36,8 %)	-

На основании результатов экспериментов и испытаний констатируется высокая надежность телемедицинского сервиса с использованием предложенной системы мобильной электрокардиографии во всех ее вариантах.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

1. Предложен модельно-ориентированный метод синтеза и оптимизации развивающихся телемедицинских систем для амбулаторных клинко-функциональных исследований, в отличие от общепринятого каскадного подхода при равных условиях сокращающий в 2 раза и более сроки проектов развития или модификации систем с обеспечением их робастности. Результат достигается за счет применения итерационного V-процесса, унифицированного языка моделирования UML 2.0 и модифицируемых шаблонов проектирования, в которые включается концептуальная модель прикладной области, задаваемая в контексте амбулаторного медицинского обслуживания с определением процесса телемедицинского взаимодействия, а также сущностей и отношений принципиальных агрегатов системы – МТК и КТК.

2. Предложен двухкритериальный подход к оценке эффективности синтезируемых телемедицинских систем по Эджворту-Парето на основании показателей себестоимости и длительности диагностического исследования, являющихся одновременно показателями качества медицинского обслуживания.

3. Разработан шаблон архитектуры телемедицинской системы для амбулаторных клинко-функциональных исследований, в том числе и для МЭКГ, представляющий собой платформу-независимый агрегированный каркас развивающейся информационной измерительной системы, развертываемой в виде инвариантной к физическим соединениям IP-сети клиентов-регистраторов и серверов-анализаторов без ограничений на дальность связи и количество терминалов, с локальными базами данных на всех терминалах для их автономности, где каждый сервер-анализатор сети способен самостоятельно устанавливать и поддерживать соединение с любым клиентом-регистратором.

4. Показано, что решение на основе клиент-серверного взаимодействия в отличие от распространенного централизованного сервиса обеспечивает для телемедицинской системы амбулаторных клинко-функциональных исследований высокую устойчивость к отказам соединений и большую робастность, а также меньшие показатели длительности и себестоимости диагностического исследования. Кроме того, оно обеспечивает интеграцию диагностических методов и реализацию приложений реального времени.

5. Предложен метод информационного анализа ЭКС, основанный на критерии точности в виде остаточной среднеквадратической погрешности (ОСКП), позволяющий оптимизировать цифровое представление сигналов и согласовывать с ним разрядность и точность их преобразований. Показана возможность снижения требований к разрядности аналого-цифрового преобразования с 11...12 бит до 8...10 бит и разрешающей способности графических устройств с 760×1024 до 240×320 (пикселей), а также к скорости передачи 12-канальных ЭКГ в реальном масштабе времени – с 23 кбит/с до 8 кбит/с.

6. Синтезированы отличающиеся адаптивной архитектурой типовые системы МЭКГ – для скорой кардиологической помощи и для амбулаторной функциональной диагностики, в которых серверы-анализаторы реализованы на персональных компьютерах консультантов, а клиенты-регистраторы – в виде портативных информационно-измерительных микрокомплексов на основе коммуникаторов мобильного медицинского персонала с

использованием серийно выпускаемых электрокардиографических приборов. Для передачи данных разработаны протокол с восстановлением соединений и форматы данных, включающие клиническую информацию для повышения точности и скорости диагностики. Микрокомплексы в составе систем отличаются использованием беспроводной связи разных стандартов, адаптируемостью к телекоммуникационной инфраструктуре, высоким уровнем готовности и наибольшей мобильностью в сравнении с близкими аналогами.

7. Показано, что длительность дистанционного исследования методом ЭКГ покоя, выполняемого с помощью любой из предложенных систем, может составлять 6,6 мин, что на 30 % меньше, чем при использовании транстелефонной системы-аналога. Клиническая апробация показала, что разработанные системы обеспечивают:

- при скорой кардиологической помощи – исключение пропуска случаев, в которых необходима срочная госпитализация больных, и сокращение общего количества транспортировок больных на 60 %;
- при амбулаторной функциональной диагностике – сокращение в 3 раза длительности амбулаторного наблюдения и в 1,5 раза продолжительности пребывания в стационаре, уменьшение в 4,5 раза числа острых коронарных событий, увеличение в 30 раз количества необходимых коронарных вмешательств.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Казанцев А.П. Разработка мобильной телемедицинской сети для ЭКГ исследований // V НПК "Диагностика и лечение нарушений регуляции сердечно-сосудистой системы". – М., 2003. – С. 165-169.
2. Казанцев А.П. Мобильная телемедицинская сеть «ТелеЭКГ» для электрокардиографических исследований // Мобильные телекоммуникации. – 2003. – № 9. – С. 30-32.
3. Казанцев А.П., Арапов Н.А. Мобильная телемедицинская сеть для электрокардиографических исследований // Мат. конф. «Современные инфокоммуникационные технологии в системе охраны здоровья». – М., 2003. – С. 50-52.
4. Казанцев А.П., Шокин В.И., Федорова С.И., Арапов Н.А. Создание мобильной телемедицинской сети для дистанционной функциональной диагностики // VI научно-практическая конференция "Диагностика и лечение нарушений регуляции сердечно-сосудистой системы" (Москва, Главный клинический госпиталь МВД России, 24 марта 2004 г.). – М., 2004. – С. 101-104.
5. Казанцев А.П. Разработка и исследование электрокардиографической телемедицинской информационной системы // Отчет по гранту РФФИ № 04-07-97214 за 2004 г. – 2005. - 23 с.
6. Сенин А.А., Казанцев А.П. Беспроводные технологии для мобильной телемедицины на примере системы дистанционной электрокардиографии // Наука-Бизнес-Образование. Биотехнология – Биомедицина – Окружающая среда: тезисы докладов второй международной конференции (10-13 мая 2005 г.). – Пушино, 2005. – С. 97-99.
7. Казанцев А.П., Сенин А.А., Федорова С.И., Арапов Н.А., Давыдов Д.В., Тарасов А.А., Шокин В.И., Неведомская Т.В. Телемедицинская IP-сеть мобильной дистанционной функциональной диагностики // Тезисы докладов конференции «Фундаментальные науки – медицине» (Москва, Президиум РАН, 14-16 декабря 2005 г.) – М., 2005. – С. 118-119.

8. Федорова С.И., Шумский В.И., Булыгин В.П., Пронина В.П., Казанцев А.П., Шокин В.И. Организация дистанционной многоуровневой службы функциональной диагностики Подмоскovie // Альманах клинической медицины «Современные медицинские технологии и развитие специализированной медицинской помощи населению Московской области». – М.: МОНИКИ, 2005 г., том VIII. С. 139-143.

9. Булыгин В.П., Федорова С.И., Шумский В.И., Пронина В.П., Лебедева Т.Ю., Агальцов М.В., Пирвердиев Ч.А., Казанцев А.П., Шокин В.И. Современные возможности технологий мобильной телефонии при проведении диспансеризации профессиональных групп населения // Альманах клинической медицины. – М.: МОНИКИ, 2006 г., том X. С. 30-33.

10. Булыгин В.П., Казанцев А.П., Федорова С.И., Пирвердиев Ч.А., Чепайкин В.П., Шокин В.И. Техническое и математическое обеспечение мобильной функциональной теледиагностики в кардиологии // VIII всероссийская научно-практическая конференция «Технологии функциональной диагностики в современной клинической практике» (Москва, 17-18.04.2007 г.). – М., 2007. – С. 68-72.

11. Казанцев А.П., Сенин А.А., Пикуленко О.В. Архитектура и реализация мобильных телемедицинских комплексов дистанционной электрокардиографии // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. – Рязань, 2007. – Вып. 20. – С. 85-90.

12. Казанцев А.П. Полиномиальная аппроксимация дрейфа изолинии электрокардиосигнала // Перспективные проекты и технологии. – 2007. – Вып. 2. – С.85-89.

13. Сенин А.А., Казанцев А.П. Система мобильной дистанционной функциональной диагностики сердечно-сосудистых заболеваний // Школа-конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Биомедицинская инженерия – 2007» (Пушино, 10-12.12.2007 г.). – Пушино, 2007. – С. 98-102.

14. Сенин А.А., Казанцев А.П., Федорова С.И., Шокин В.И. Мобильная информационная система дистанционной функциональной диагностики сердечно-сосудистых заболеваний // 12-я международная Пушинская школа-конференция молодых ученых. Пушино, 10-14.11.2008 г.

15. Казанцев А.П. Информационный анализ электрокардиосигналов и их преобразований для мобильной телемедицины // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2008. – №7. – С.22-28.

16. Казанцев А.П., Сенин А.А. Метод сжатия электрокардиосигналов для передачи в реальном масштабе времени // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2008. – №7. – С.15-21.

17. Казанцев А.П. Объектно-ориентированный подход к синтезу информационных систем внебольничной телемедицины // II международная конференция «Математическая биология и биоинформатика». Пушино, 7-13.09.2008 г.

18. Казанцев А.П. Оптимизация мобильных телемедицинских систем // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2009. – №7.

19. Казанцев А.П., Прошин Е.М. Метод синтеза и концептуальное моделирование телемедицинских систем мобильной электрокардиографии // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2009. – №7.

Казанцев Александр Павлович

**ТЕЛЕМЕДИЦИНСКИЕ СИСТЕМЫ
МОБИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИИ**

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 14.09.2009 г. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 120 экз. Заказ 4869

Отпечатано в ООО «НПЦ «Информационные технологии»

г.Рязань, ул.Островского, д.21/1. Тел.: (4912) 98-69-84