

УДК 53.088.7, 681.2.084, 612.172.4

## ПОРТАТИВНЫЙ ЭКГ-ДАТЧИК КОМПЬЮТЕРНОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «КАРДИОВИД»

Петровский М.А., Бодин О.Н., Кривоногов Л.Ю., Иванчуков А. Г.

*ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Пенза, Россия (440026 Пенза, ул. Красная, 40), e-mail: [mikepma36@gmail.com](mailto:mikepma36@gmail.com).*

Статья посвящена описанию особенностей регистрации электрокардиосигнала (ЭКС) в условиях свободной двигательной активности пациента с помощью портативного ЭКГ-датчика. Достоинствами предлагаемого решения являются широкие функциональные возможности, удобство пользования и низкая стоимость. Предлагаемый подход к определению состояния сердца пациентов из группы риска сердечно-сосудистых заболеваний позволяет значительно снизить нагрузку на систему здравоохранения и повысить точность локализации повреждения миокарда по сравнению с традиционным анализом ЭКГ. Описанный способ позволяет снизить стоимость медицинского обслуживания при повышении его качества и эффективности. В статье предлагается один из возможных примеров построения портативного кардиоанализатора, с описанием его возможностей и перспективой его использования. Предложенный пример основан на использовании современной элементной базы, а также разработанных авторами алгоритмов обработки ЭКС от помех и артефактов.

Ключевые слова: кардиоанализатор, ЭКС, Bluetooth с низким энергопотреблением.

## PORTABLE ECS-SENSOR OF "KARDIOVID" COMPUTER DIAFNOSTIC SYSTEM

Petrovskiy M.A., Bodin O.N., Krivonogov L.Y., Ivanchukov A.G.

*Penza State University, Penza, Russia (440026 Penza, Krasnaya st., 40), e-mail: [mikepma36@gmail.com](mailto:mikepma36@gmail.com).*

This article is devoted to the features of electrocardiosignal registration under free movement activity of patient with by means of portable ECS-sensor. The advantages of the proposed solution are extensive functionality, usability and low cost. The proposed approach to the determination heart condition patients at risk for cardiovascular disease can significantly reduce the burden on the health system and improve the accuracy of localization of myocardial damage in comparison with traditional analysis of ECG. The described method can reduce the cost of health care in improving the quality and efficiency. The paper suggests one possible example of constructing a portable cardioanalyser, describing its features and the prospect of its use. The proposed example is based on the use of modern element base, and developed by the authors ECS processing algorithms to reduce noise and artifacts.

Keywords: cardioanalyser, ECS, Bluetooth Low Energy.

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) остаются основной причиной смертности в стране, и эффективных инструментов для снижения этой статистики пока недостаточно. Необходимо развитие неинвазивных технологий доклинического обследования и персонального мониторинга здоровья людей из группы риска ССЗ. Современное состояние радиотехнических и вычислительных средств представляет такую возможность: портативные кардиоанализаторы могут отслеживать жизненные показатели пациента и передавать их в медицинские учреждения.

Данная статья посвящена описанию портативного кардиоанализатора, созданного в рамках компьютерной диагностической системы (КДС) «Кардиовид» [1]. Тенденции в современной медицине таковы, что все большее значение придается профилактике заболеваний. Обнаруженные на ранней стадии отклонения в функциональном состоянии организма от нормы позволяют «снизить» нагрузку на систему здравоохранения, так как

лечение заболевания в прогрессирующей стадии намного сложнее и дороже, чем в начальной стадии. Концепция обработки кардиографической информации в КДС «Кардиовид» представлена на рисунке 1 и призвана помочь системе здравоохранения повысить эффективность профилактики ССЗ.

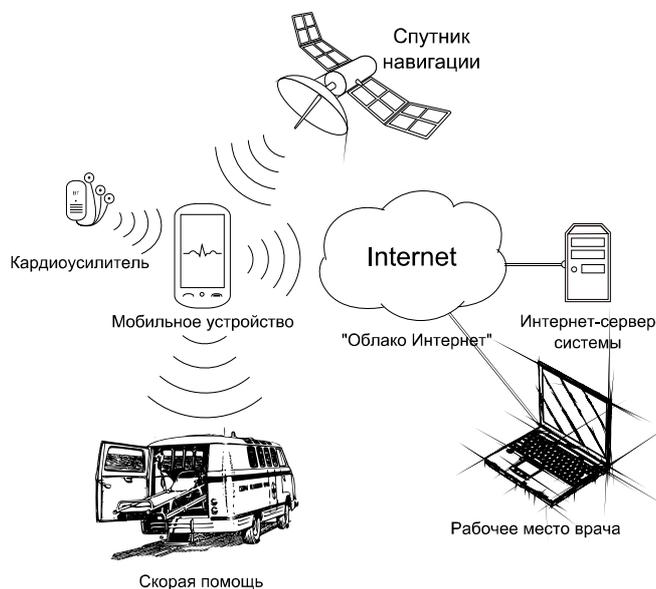


Рис. 1. Обработка кардиографической информации в КДС «Кардиовид»

Из рисунка 1 следует, что одной из основных функциональных единиц «технологического конвейера» обработки кардиографической информации в КДС «Кардиовид» является портативный кардиоанализатор, в состав которого входят миниатюрный беспроводной сенсор-кардиосулитель и мобильное вычислительное устройство (см. рисунок 2).



Рис. 2. Состав портативного кардиоанализатора

Существует ряд приборов с функцией экспресс-оценки состояния сердца. Так, в отечественном портативном кардиоанализаторе «Миткард» [5] используется проводная передача данных, которая делает невозможным его использование в условиях свободной двигательной активности пациента. Кроме того, стоимость портативного кардиоанализатора «Миткард» составляет 95000 рублей и недоступна подавляющему числу пользователей в нашей стране.

Также среди отечественных приборов с функцией экспресс-оценки состояния сердца можно выделить прибор «Кардиовизор» [4]. Данный комплекс позволяет, по заявлению производителей, осуществлять регистрацию электрокардиосигнала (ЭКС) и последующий расчет функционального состояния сердца и состоит из ноутбука или смартфона с программным обеспечением (ПО) и устройства с четырьмя или более электродами, крепящимися к телу пациента. Стоимость домашней версии 17 500 рублей, каждое обследование платное.

Из зарубежных устройств можно выделить кардиомонитор для *iPhone* фирмы *AliveCore* (США) [3]. Для проведения ЭКС исследования прибор вкладывается в ладони, электроды соприкасаются с фалангами пальцев рук. При удерживании соединения в течение 30 секунд пользователь получает показания кривой сердечного ритма. Запись ЭКС также отображается на мониторе. Фирма-разработчик *AliveCore* обеспечивает конфиденциальность и безопасный доступ к записанным ЭКС. Стоимость устройства около 200 долларов.

Вышеперечисленные технические решения обладают существенными недостатками. Эти приборы производят кратковременную регистрацию ЭКС, что снижает достоверность предварительного заключения. Увеличение продолжительности регистрации позволило бы отслеживать состояние сердечно-сосудистой системы в режиме реального времени, а также снизить возможное влияние артефактов и шумов. Вторым существенным недостатком является слишком высокая цена для российского рынка. Для обеспечения мониторинга большого числа людей из группы риска требуется прибор с более низкой ценой, при этом, не уступая в качестве регистрации и обработки ЭКС.

Таким образом, анализ рынка портативных кардиоанализаторов показывает, что они не удовлетворяют требованиям, предъявляемым в КДС «Кардиовид» к портативному кардиоанализатору по функциональным возможностям, цене и удобству пользования. Портативный кардиоанализатор должен качественно регистрировать и производить анализ ЭКС непрерывно не менее 24-х часов, при этом не должен вызывать неудобств пациенту и иметь доступную цену для людей из группы риска, в том числе пенсионеров.

В рамках КДС «Кардиовид» разработан портативный кардиоанализатор, отвечающий всем этим требованиям. Он состоит из нательного сенсора-регистратора и смартфона или другого мобильного вычислительного устройства в качестве кардиоанализатора. Использование принципов открытости и модульности построения кардиоанализатора обеспечивает снижение стоимости, сокращение времени разработки, а также наращивание функциональных возможностей за счет других модулей и обновления программного обеспечения.

Небольшой сенсор прикрепляется к коже с помощью специального адгезивного вещества, безвредного для здоровья пациента. Небольшие размеры сенсора делают его пригодным для ношения во время обычных дневных занятий, в том числе даже принятия душа и выполнения физических упражнений. По мере регистрации данные *беспроводным* путем передаются на мобильное вычислительное устройство и подвергаются анализу. В ходе комплексного анализа осуществляется:

- регистрация местоположения пациента;
- предварительная обработка электрокардосигнала;
- анализ аритмии;
- определение отклонения показателей сердца;
- экспресс-оценка критического состояния сердца;
- построение графика показателей сердца;
- построение графика сокращения предсердий и желудочков;
- анализ водителя ритма;
- микропотенциальный анализ;
- позднепотенциальный анализ;
- построение почасового сводного отчета сегмента ST;
- вывод образцов точек сегмента ST;
- построение графика показателей тренда сегмента ST: анализ при первоначальном положении изолинии, повторный анализ при более низком положении изолинии, повторный анализ изменения порога;
- формирование почасовой сводки о параметрах сегмента ST;
- формирование периодического отчета об общем состоянии сердца;
- вызов скорой помощи к местоположению пациента в случае обнаружения *критического* состояния сердца.

При этом пользователь имеет возможность просмотра результата анализа с помощью смартфона или веб-браузера. Пример интерфейса изображен на рисунке 3.



Рис. 3. Пример интерфейса мобильного устройства

Основная сложность создания портативного кардиоанализатора состоит в разработке нательного сенсора, который должен отвечать всем заявленным требованиям. Сложные громоздкие схемы кардиорегистраторов уходят в прошлое, им на смену приходят интегральные схемы специального назначения.

Основой разрабатываемого ЭКГ-датчика является серийно выпускаемое устройство (микросхема) нового поколения, так называемый аналоговый входной каскад (Analog Front-End – AFE). На данный момент существует несколько семейств микросхем AFE для различных применений, производства Texas Instruments и Analog Device. Представляет интерес AFE ADS1291 фирмы Texas Instruments [9] – двухканальный 24 разрядный сигма-дельта АЦП, специально предназначенный для регистрации ЭКС. Устройство имеет встроенный усилитель с программируемым коэффициентом усиления, источник опорного напряжения. ADS1291 имеет размер 5×5 мм, сверхнизкое энергопотребление (335 мкВт / канал), быстродействие достаточное для регистрации ЭКС, низкий уровень шума (8мкВ).

В состав функциональной схемы микросхемы ADS1291 входят:

- RC фильтр;
- входные мультиплексоры;
- компараторы;
- усилители каналов 1 и 2 с программируемым коэффициентом усиления;
- схема для электрода «правой ноги» для фильтрации синфазной составляющей;
- 24 битный сигма-дельта АЦП;
- внутренний источник опорного напряжения.

На входе микросхемы располагается RC фильтр, он действует как фильтр электромагнитных помех для каналов 1 и 2. Полоса пропускания фильтра составляет [0..3] МГц. Входные мультиплексоры являются очень гибкими и обеспечивают множество настраиваемых вариантов переключения входных сигналов, а также использования тест-сигналов. Это позволяет проводить диагностику, калибровку и конфигурацию устройства.

Вводные сигналы возбуждения подаются на мультиплексор перед переключателями. Компараторы, которые регистрируют состояние сигналов, также связаны с блоком мультиплексора перед переключателями.

Каждый канал ADS1291 имеет 24-битный сигма-дельта АЦП. Этот преобразователь использует модулятор второго порядка, оптимизированный для маломощных приложений. Встроенный прореживающий цифровой фильтр может быть использован для подавления шумов на высоких частотах. Фильтры децимации также обеспечивают сглаживание фильтрации.

ADS1291 имеет 24-битные информационные выходы для каждого канала в дополнительном коде. Для передачи данных между узлами в микросхеме ADS1291 реализован интерфейс SPI (*Serial Peripheral Interface*).

Таким образом, использование микросхемы ADS1291 позволяет значительно уменьшить количество элементов в схеме, габариты и затраты на проектирование портативного кардиоанализатора. Габариты макетного образца портативного кардиоанализатора КДС «Кардиовид» составляют 45 мм x 35 мм x 6 мм.

Беспроводная передача данных является основным требованием использования портативного кардиоанализатора в условиях свободной двигательной активности пациента. Беспроводная связь кардиосуилителя и мобильного устройства накладывает ограничения на протокол обмена данными: он должен обеспечивать требуемый радиус действия устройства и низкий расход заряда батареи. Таким протоколом является протокол *Bluetooth 4.0 (Bluetooth Low Energy – BLE)* [8]. Благодаря использованию специального алгоритма работы, при котором передатчик включается только на время передачи данных, в *Bluetooth 4.0* обеспечивается ультранизкое энергопотребление. Наиболее доступным на данный момент решением, реализующим *Bluetooth 4.0*, является система беспроводной передачи данных на микросхеме CC2540 фирмы *Texas Instruments* [7].

При проектировании ЭКГ-датчиков для диагностической системы особое внимание следует уделить качеству регистрации ЭКС, которое определяется в первую очередь эффективным подавлением помех [6].

Основы качественного автоматического анализа ЭКС закладываются на этапах регистрации и предварительной обработки. Алгоритмы предварительной обработки ЭКС, основной целью которых является помехоподавление, закладывают основы достоверности автоматического анализа в целом.

Проблема подавления помех при регистрации и обработке ЭКС состоит в том, что полезная информация сосредоточена в циклически повторяющихся коротких информативных участках. Поэтому, если в результате помехоподавления происходят даже

незначительные искажения формы информативных участков ЭКС, то такие искажения могут привести к ошибочным диагностическим заключениям. Следовательно, основным требованием, предъявляемым к процедурам помехоподавления, является значительное подавление помех при минимальном искажении полезного сигнала. Кроме того, производительность алгоритмов подавления помех в ЭКС должна соответствовать скорости входного потока данных (т.е. должна обеспечиваться работа в реальном времени).

В настоящее время в области обработки ЭКС хорошо изученными являются линейные методы цифровой обработки сигналов. При использовании линейных фильтров нижних частот (ФНЧ) для устранения высокочастотного шума в ЭКС обычно полагают, что информационный спектр сигнала находится в полосе пропускания фильтра. Однако в спектре ЭКС содержатся компоненты с частотами, находящиеся в одном диапазоне с помехой. Поэтому при применении линейных ФНЧ острые зубцы Q, R, S, пики, изломы информационной составляющей, представляющие высокочастотные компоненты ЭКС, сглаживаются.

Применение линейных фильтров верхних частот (ФВЧ) для устранения дрейфа изолинии приводит к искажению параметров ST-сегментов, поскольку частотный спектр дрейфа изолинии, как правило, почти полностью совпадает с частотным спектром ST-сегментов. Смещение ST-сегмента в электрокардиографии является признаком повреждения различных отделов миокарда (вплоть до инфаркта миокарда), поэтому его искажение недопустимо.

С целью устранения недостатков линейных фильтров в последние годы все чаще находят применение фильтры нелинейные, в том числе и для подавления помех в биомедицинских сигналах. Особый интерес для обработки ЭКС представляют нелинейные процедуры на основе порядковых статистик (ранговые алгоритмы) [2]. Ранговые алгоритмы фильтрации в отличие от линейных методов лишены такого недостатка, как пространственная инерционность, которая заключается в том, что влияние отдельных элементов сигнала (импульсных помех) проявляется на результирующем сигнале на расстоянии порядка размеров апертуры фильтра. Это заметно в частности в размывании границ и искажении формы информативных импульсов при сглаживании сигналов. Кроме того, за последнее время разработано несколько вариантов быстрых процедур ранжирования.

Для подавления помех в ЭКС были разработаны два алгоритма, отвечающие требованиям работы в реальном времени: алгоритм подавления высокочастотных помех (мышечного тремора и сетевой помехи) и алгоритм устранения дрейфа изолинии. Оба алгоритма нелинейные с использованием порядковых статистик.

Достоинством разработанных процедур подавления помех в ЭКС является обеспечение высокого качества обработки сигналов с нестационарными характеристиками полезного сигнала и помех при ограниченных априорных знаниях о модели изменения сигнала и свойствах помех.

Применение современной микропотребляющей элементной базы, стандартных беспроводных технологий и оригинальных алгоритмов обработки информации при разработке ЭКГ-датчика должно обеспечить создание конкурентоспособного изделия, необходимого современной медицине.

В настоящее время портативный кардиоанализатор КДС «Кардиовид» проходит предварительные испытания.

### Список литературы

1. Бодин О.Н., Логинов Д.С., Моисеев А.Е., Рябчиков Р.В. Концепция виртуальной медицинской диагностической системы // Датчики и системы. – М., 2011. – № 4. – С. 13-18.
2. Кривоногов Л.Ю. Методы и алгоритмы помехоустойчивой обработки электрокардиографической информации: дисс. ... канд. техн. наук. – Пенза, 2003.
3. Кардиомонитор для iPhone AliveCor теперь доступен по рецепту // medgadgets.ru интернет-магазин медицинский гаджетов URL: <http://medgadgets.ru/cardio/kardiomonitor-dlya-iphone-alivecor-terep-dostupen.html> (дата обращения: 2.04.2014).
4. Прибор кардиовизор // Проект kardi.ru URL: <http://www.kardi.ru/ru/aboutcardiovisor> (дата обращения: 1.04.2014).
5. Прибор для скрининговой экспресс оценки состояния сердца по ЭКГ-сигналам от конечностей "МИТКАРД" // [www.motormed.ru](http://www.motormed.ru) URL: [http://www.motormed.ru/catalog/diagnostika/diagnostika\\_567.html](http://www.motormed.ru/catalog/diagnostika/diagnostika_567.html) (дата обращения: 01.04.2014).
6. Тычков А.Ю. Чураков П. П., Кривоногов Л. Ю. Автоматизированная система обработки и анализа электрокардиосигналов в условиях интенсивных помех различного вида. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. № 1/2011.
7. 2.4GHz Bluetooth® low energy System-on-Chip (Rev. F) // <http://www.ti.com> URL: <http://www.ti.com/lit/gpn/cc2540> (дата обращения: 2.04.2014).
8. Bluetooth 4.0 с низким энергопотреблением // <http://www.bluetooth.com> URL: <http://www.bluetooth.com/Pages/low-energy.aspx> (дата обращения: 22.04.2014).

9. Low-Power, 2-Channel, 24-Bit Analog Front-End for Biopotential Measurements (Rev. B) // <http://www.ti.com> URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1291.pdf> (дата обращения: 1.04.2014).

**Рецензенты:**

Чувыкин Б.В., д.т.н., профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы», ПГУ, г. Пенза.

Трофимов А.А., д.т.н., профессор, заместитель начальника учебно-научного центра ОАО «НИИФИ», г. Пенза.