

УДК 616.12- 073.7

И.И. Боровский, Н.Г. Иванушкина, канд. техн. наук, Е.О. Иванько, канд. техн. наук, Э.Р. Лысенко, Е.В. Панасюк

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”,
ул. Политехническая 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Комплексный метод для выделения электрокардиосигналов плода из абдоминальных сигналов матери

В статье рассмотрен неинвазивный подход к оцениванию состояния плода с помощью систем электрокардиографии высокого разрешения. Предложен комплексный метод для выделения электрокардиосигналов плода из абдоминальных сигналов матери, основанный на совместном применении анализа главных компонент, анализа независимых компонент и вейвлет-анализа. Проведенные численные эксперименты показали, что предложенный метод позволяет устранить шумы в абдоминальной электрокардиограмме, а также выявить изменения морфологии фетальных кардиоциклов в случае патологии (гипоксии). Библ. 10, рис. 7.

Ключевые слова: абдоминальные электрокардиосигналы, фетальные кардиоциклы, вейвлет-анализ, метод «слепого разделения источников», анализ главных компонент, анализ независимых компонент.

Введение

Диагностика сердечной деятельности плода является одной из наиболее важных составляющих оценивания общего состояния плода. Мониторинг сердечной деятельности плода может быть осуществлен с помощью ультразвукового метода диагностики, основанного на анализе механической работы сердца, и электрокардиографии, позволяющей исследовать процессы электрической активности сердца плода. Ультразвуковой метод с использованием эффекта Доплера является наиболее распространенным при выявлении симптомов гипоксии плода. Однако он оценивает лишь изменчивость ритма сердца плода, изменение которого при гипоксии происходит позже, чем изменения морфологии фетальной электрокардиограммы (ФЭКГ), с помощью которой можно выполнить раннюю диагностику состояния плода [1, 2].

Неинвазивный метод регистрации биоэлектрических потенциалов сердца дает возможность длительного мониторинга состояния плода, так как позволяет регистрировать ФЭКГ сигналы не только при родах (как инвазивный ме-

тод), а практически в течение всей беременности. При неинвазивном методе электрокардиографии высокого разрешения с помощью регистрирующих электродов, установленных на поверхности живота матери, записываются суммарные абдоминальные электрокардиосигналы (смесь электрокардиосигналов матери и плода). Из этой смеси методами цифровой обработки сигналов детектируется электрокардиограмма плода.

Стандартный кардиоцикл плода содержит те же зубцы и комплексы, что и кардиоцикл матери. Однако, отличия состоят в амплитудно-временных значениях: нормальная амплитуда QRS-комплекса плода лежит в диапазоне от 1 до 50 μV , амплитуда QRS-комплекса матери – 100-1000 μV ; частота сердцебиения плода составляет 120 - 160 ударов в минуту, матери – от 60 до 90 ударов в минуту. Анализ морфологии фетальных кардиоциклов включает в себя оценивание амплитуд зубцов и интервалов ФЭКГ. Так, важным параметром для оценивания гипоксии является отношение амплитуды Т-зубца к амплитуде QRS комплекса, а также наличие двухфазного ST-сегмента, которое отмечается на начальных стадиях гипоксии [3].

Метод слепого разделения источников

Выделение ФЭКГ из абдоминального сигнала представляет собой сложную задачу из-за наличия шумовых составляющих, которые имеют различную природу и включают в себя: высокоамплитудную материнскую ЭКГ (МЭКГ), электромиографическую активность мышц живота и матки матери, сетевую наводку, шум электродов, артефакты движения плода, дрейф изолинии, обусловленный дыханием матери, шум электронного оборудования. Разделить сигналы путём простой частотной фильтрации невозможно в виду перекрытия частотных спектров МЭКГ и ФЭКГ [2].

Стандартные методы выделения сигналов из смеси основываются на различии временных или спектральных характеристик и известном законе смешивания. Если смешанные сигналы

перекрываются во временной и/или спектральной областях, применяется метод «слепого» разделения источников (Blind Source Separation – BSS), который называется «слепым» из-за минимума априорной информации о характере разделяемых источников. В технологиях BSS [4-7] используется анализ независимых компонент (Independent Component Analysis - ICA), при котором процесс разделения основывается на допущении о статистической независимости источников, сигналы которых имеют негауссовский закон распределения.

При выделении ФЭКГ из абдоминальных сигналов для преодоления ограничений «слепого» характера разделяемых источников можно выбрать дипольную структуру модели электрической активности сердца. При этом принимается допущение о фиксированном пространственном положении и об изменении во времени амплитуды и направления диполя сердца. Результатами наблюдений являются разности потенциалов между парами электродов, которые расположены на поверхности живота матери.

Можно принять, что для ЭКГ сигналов тело является проводящей линейной средой. В результате, колебание в каждой точке поверхности тела может быть представлено как линейная комбинация сигналов сердечных источников и аддитивной помехи:

$$X(t) = MS(t) + N(t),$$

где $X(t)$ – вектор сигналов наблюдений; M – смешивающая матрица с коэффициентами m_{ij} , с которыми сигнал каждого источника входит в вектор наблюдений; $S(t)$ – вектор источников сигналов; $N(t)$ – шумовые компоненты.

Величины коэффициентов матрицы M неизвестны, так как неизвестна модель распространения сигнала от источников к электродам. Неизвестным является также вид сигналов отдельных источников, так как они не могут наблюдаться отдельно и доступны только в виде смеси.

Согласно независимости биоэлектрических явлений, описывающих электрическую активность сердца матери и плода, можно принять, что сигналы источников статистически независимы. В связи с тем, что источники шума, имеют разную физическую природу с источниками электрокардиосигналов, их также можно считать статистически независимыми от источников сигналов. Следовательно, необходимо выделить сигналы отдельных источников (сигналов электрической активности плода) из смеси

электрокардиосигналов и шума (из абдоминальных сигналов).

Решение задачи (при допущении об отсутствии шумов) состоит в нахождении матрицы разделения W с коэффициентами w_{ji} , которая является обратной матрице смешивания M :

$$S = WX.$$

Для выполнения анализа независимых компонент (ICA) чаще всего применяется два семейства алгоритмов, которые основаны на минимизации взаимной информации и на максимизации негауссовости сигналов источников [4, 5].

Перед выполнением метода ICA с целью минимизации шума используется анализ главных компонент (Principal Component Analysis - PCA), при котором смесь электрокардиосигналов преобразовывается таким образом, что компоненты декоррелируются и количество сигналов \bar{X} , подлежащих оценке, уменьшается. В результате ортогонального преобразования выполняется разложение в базисе собственных векторов:

$$\bar{X} = ED^{-1/2}E^T X,$$

где E – собственные векторы ковариационной матрицы сигналов наблюдений X ; D – диагональная матрица собственных чисел.

В процессе исследований с использованием метода BSS в различных модификациях [5-7] достигнуто выявление сигнала ФЭКГ на фоне МЭКГ. Однако при выделении сигнала ФЭКГ авторы ограничиваются определением variability ритма сердца по R-зубцам ЭКГ плода и не используют дополнительную информацию, находящуюся в морфологии зубцов и комплексов кардиоциклов.

Моделирование

Согласно биофизической теории [8] электрическую активность сердца можно представить в виде суммарного действия диполей, интенсивность которых описывается законом Гаусса. Поэтому модель кардиоцикла в виде суммы функций Гаусса соответствует сигналам материнской и фетальной ЭКГ. В общем случае модель должна содержать достаточное количество функций Гаусса, чтобы воспроизвести ЭКГ с заданной точностью, однако, в [9] показано, что достаточно эффективным является использование и пяти функций. Для задачи моделирования фетального кардиоцикла в норме и в слу-

чае гипоксии плода предлагается использовать модель с шестью функциями Гаусса (каждый из зубцов P, Q, R, S можно воспроизвести одной функцией, а ST-интервал с T-зубцом — двумя функциями):

$$\frac{dV}{dt} = -\sum_{i=1}^6 \frac{a_i \omega}{(b_i)^2} \Delta \theta_i \exp\left(-\frac{(\Delta \theta_i)^2}{2(b_i)^2}\right), \quad (1)$$

где V — разность потенциалов в отведении ЭКГ, мВ; t — время, с; a_i — амплитуда функции Гаусса, мВ; $\omega = 2\pi f$, где f — частота сердечных сокращений, Гц; b_i — ширина функции Гаусса, рад; θ_i — фаза функции Гаусса, рад;

$\Delta \theta_i = (\theta - \theta_i) \bmod(2\pi)$, рад; θ — фаза квазипериода ЭКГ, рад.

С использованием уравнения (1) получена следующая математическая модель:

$$V = \sum_{i=1}^6 a_i \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_i)^2}{2(b_i)^2}\right). \quad (2)$$

Модельные сигналы ФЕКГ (рис.1), отображающие состояние гипоксии плода [3], построены с учетом трех характерных случаев проявления гипоксии на ST-интервале: увеличением амплитуды T-зубца, инверсией T-зубца относительно изолинии, а также двухфазным ST-сегментом.

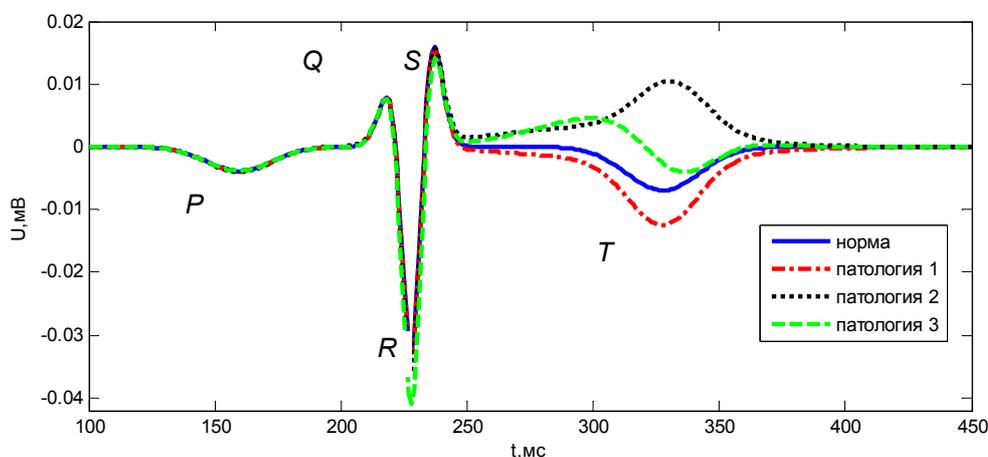


Рис. 1. Модельный фетальный кардиоцикл в норме и с патологиями (гипоксией плода): увеличение амплитуды T-зубца, инверсия T-зубца относительно изолинии, двухфазный ST-сегмент

Численные эксперименты

Для исследования возможности применения методов слепого разделения источников и вейвлет-анализа к задаче выделения фетальной ЭКГ из абдоминальных ЭКГ сигналов матери выполнен модельный эксперимент. К модельному ЭКГ сигналу матери добавлен модельный фетальный ЭКГ сигнал, а также шумовые составляющие в виде аддитивного белого гауссовского шума (рис. 2). Частота дискретизации полученного модельного сигнала соответствует частоте дискретизации сигналов, регистрируемых системами электрокардиографии высокого разрешения, и составляет 1 кГц. Средняя амплитуда модельных QRS-комплексов

плода приблизительно в 10 раз меньше амплитуды QRS-комплексов матери и составляет $35 \mu\text{V}$. Модель учитывает вариабельность ритма сердца матери и плода, а также колебания в амплитудах зубцов ЭКГ. Разброс продолжительности R–R интервалов от их средней продолжительности выбран $\pm 10\%$ для матери и $\pm 15\%$ для плода, что соответствует физиологическим особенностям взрослого человека и плода. Длительность R–R интервалов задана при помощи генератора псевдослучайных чисел по нормальному закону распределения. Аналогичным образом получены модели многоканальных абдоминальных записей ЭКГ для состояния плода в норме и с наличием признаков гипоксии.

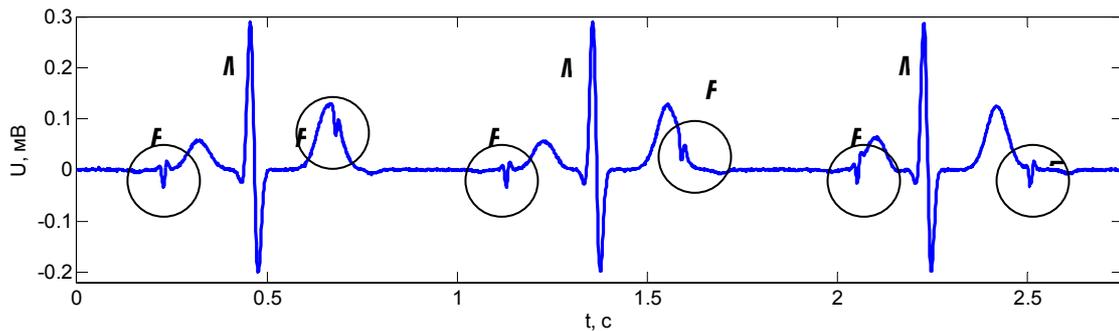


Рис. 2. Построение модели абдоминальной ЭКГ: *M* — материнские кардиоциклы, *F* — фетальные кардиоциклы в составе материнских

Обработка абдоминальной ЭКГ с помощью дискретного вейвлет-разложения [7,10] позволяет провести как фильтрацию шумов, так и устранение ЭКГ сигнала матери из суммарного абдоминального сигнала. При этом, материнская ЭКГ рассматривается как высокоамплитудная помеха, которую можно удалить с помощью восстановления сигнала только по выбранным коэффициентам детализации.

Исследование применения дискретного вейвлет-разложения к задаче выявления фетальной ЭКГ с использованием различных вейвлет-функций и разного количества уровней разложения показало, что многоуровневое

вейвлет-разложение позволяет определить локализацию QRS-комплексов плода и значения RR-интервалов для анализа variability ритма сердца плода, однако не достаточно точно позволяет проанализировать морфологию выявленных кардиоциклов. Выделенные из суммарного абдоминального сигнала при помощи вейвлет-анализа QRS-комплексы плода имеют близкую форму к QRS-комплексам в составе модельных кардиоциклов плода, которые были добавлены в модельный абдоминальный сигнал, однако присутствуют явные искажения в других сегментах кардиоциклов и диагностически важная информация о низкочастотных P и T зубцах теряется (рис. 3).

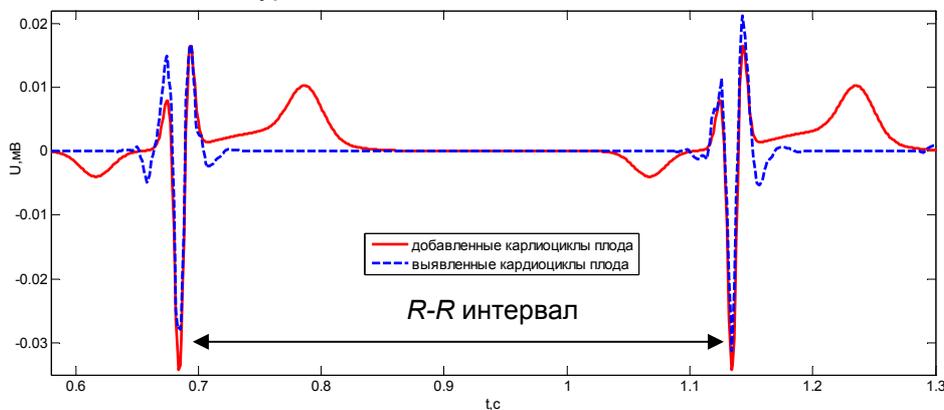


Рис. 3. Модельные фетальные кардиоциклы с проявлением гипоксии плода в виде смещения ST-сегмента и инверсии T-зубца относительно изолинии: добавленные в абдоминальный сигнал с шумом и выделенные из него при помощи вейвлет-преобразования. В выявленном кардиоцикле информация о P и T-зубцах потеряна

Анализ результатов, полученных при обработке модельных сигналов, показал, что при выявлении фетальной ЭКГ с целью оценивания морфологии кардиоциклов вейвлет-преобразование лучше использовать как инст-

румент для устранения шумов, который используется в комбинации с методами анализа главных компонент и анализа независимых компонент ICA (рис. 4).

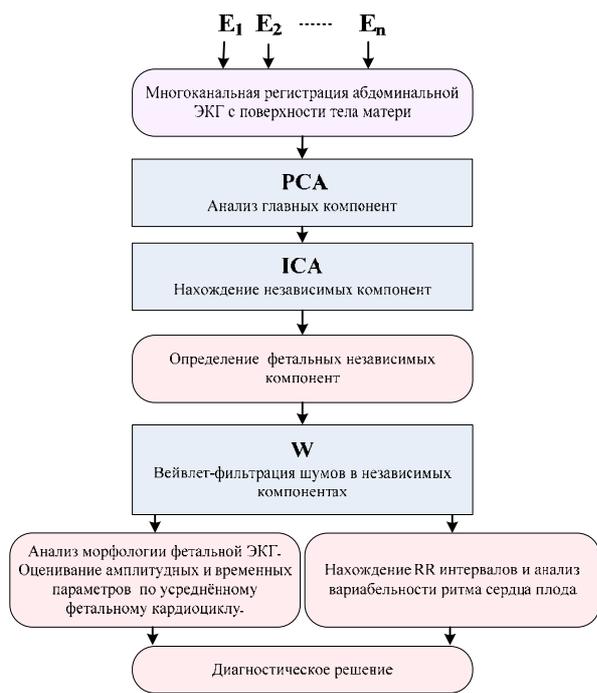


Рис. 4. Алгоритм комплексного метода выделения ЭКГ плода

При этом проведенные исследования показали, что вейвлет-преобразование лучше применять не перед методом ICA, а после него с целью очищения выделенных независимых компонент от шума. В случае применения вейвлет-преобразования перед методом ICA незначительные искажения сигнала, возникающие вследствие вейвлет-фильтрации, могут проявиться в независимых компонентах в виде значительных искажений, которые соразмерны по амплитуде с фетальными кардиоциклами.

Необходимо отметить, что фетальные кардиоциклы, полученные из очищенной фетальной независимой компоненты при совместном применении методов PCA, ICA и вейвлет-преобразования, очень близки по своей форме к модельным кардиоциклам, добавленным к смеси абдоминального сигнала и шума. Несмотря на незначительные искажения, диагностически важная информация о низкочастотных P и T-зубцах, а также об отклонении ST-сегмента от изолинии не теряется и может быть оценена количественно (рис. 5).

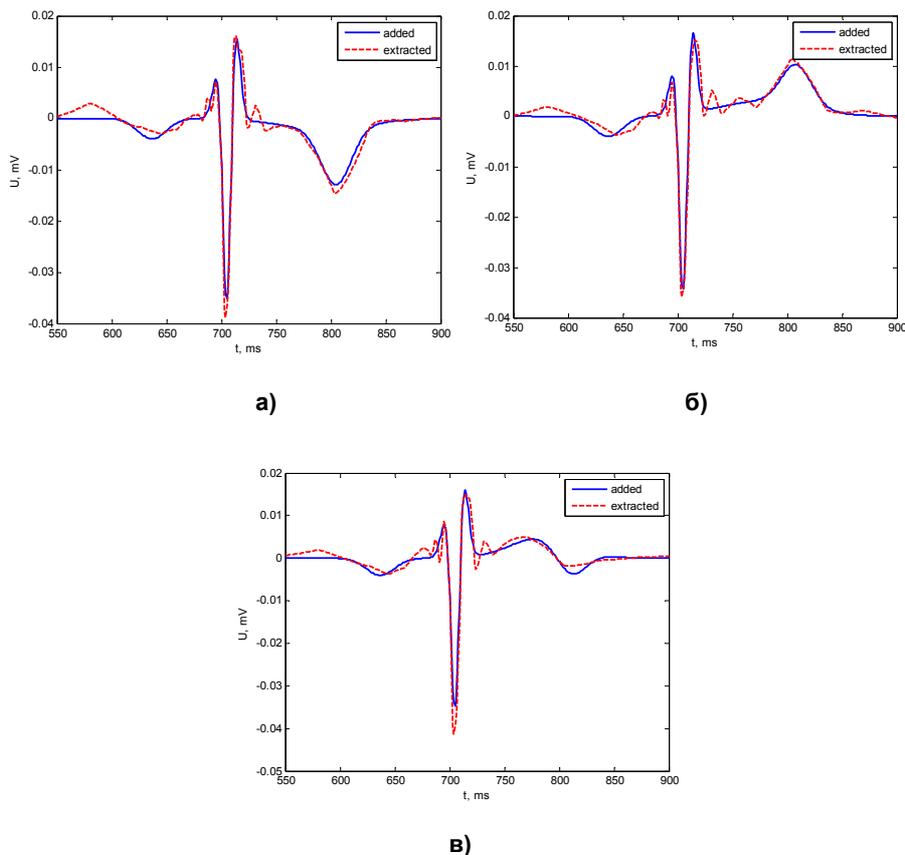


Рис. 5. Модельные фетальные кардиоциклы, добавленные в абдоминальный сигнал с шумом и выявленные из него при помощи комплексного метода. В выявленных кардиоциклах информация о P и T-зубцах сохраняется: а) увеличение амплитуды T-зубца; б) изменение полярности T-зубца; в) двухфазный ST-сегмент

Значения коэффициента корреляции r между модельным кардиоциклом плода и кардиоциклом, выявленным из суммарного абдоминального сигнала, найдены по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m (s_i - \bar{s})(s_i^* - \bar{s}^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (s_i - \bar{s})^2 (s_i^* - \bar{s}^*)^2}}$$

где m - количество отсчетов в модельном кардиоцикле S плода и восстановленном кардиоцикле S^* , а \bar{s} и \bar{s}^* - средние значения для модельного и восстановленного кардиоциклов.

Параметр r для кардиоциклов, приведенных на рис. 5, а, б, в составляет: 0,981; 0,977 и 0,974, соответственно.

Применение предложенного комплексного метода к анализу реальных многоканальных абдоминальных ЭКГ сигналов подтверждает результаты, полученные на модельных сигналах. На рис. 6 приведены 5 независимых компонент, полученных для реальной 5-ти канальной абдоминальной записи ЭКГ из базы данных DaISy (Database for the Identification of Systems). Одна из независимых компонент является фетальной.

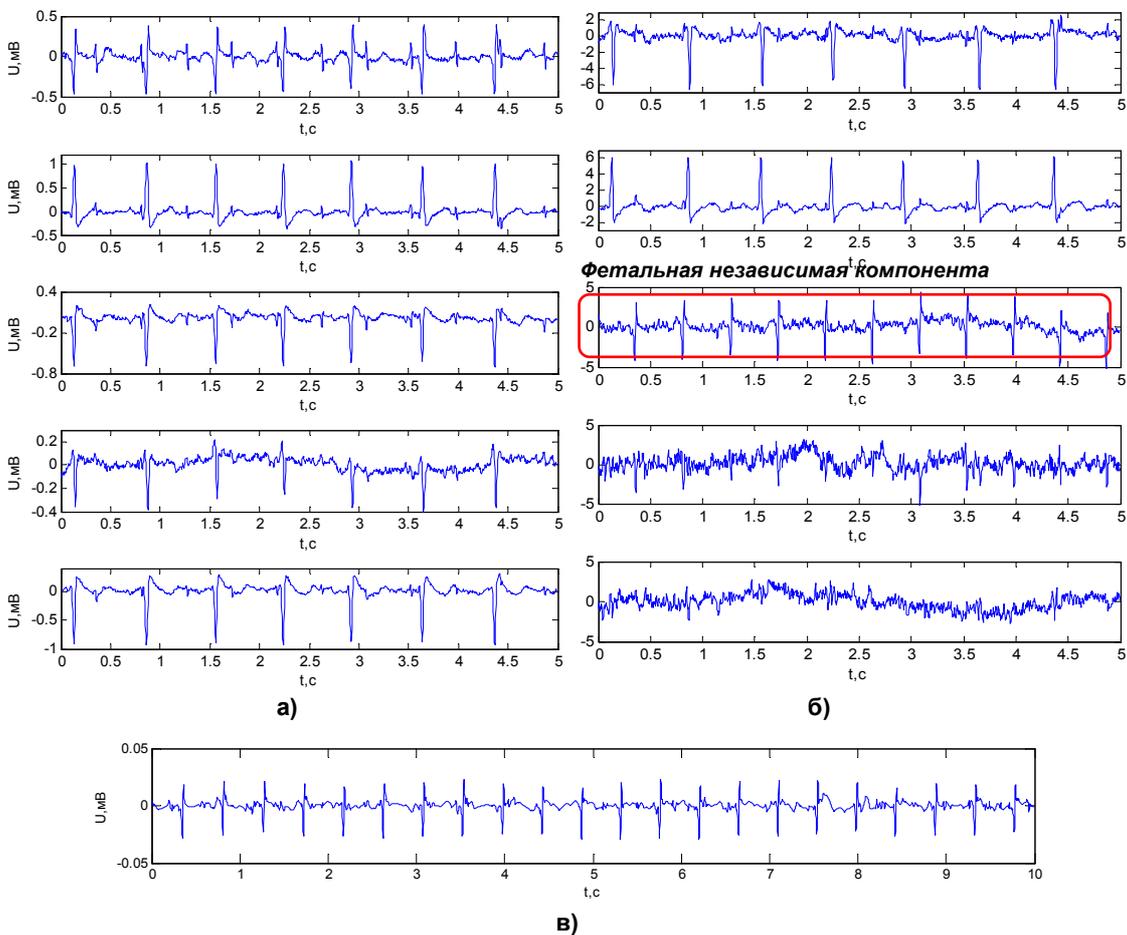


Рис. 6. а) абдоминальная 5-ти канальная запись ЭКГ; б) независимые компоненты абдоминальной записи ЭКГ; в) фетальная независимая компонента после устранения дрейфа изолинии и высокочастотных шумов при помощи вейвлет-анализа

С целью устранения шума и дрейфа изолинии в фетальной независимой компоненте было применено дискретное вейвлет-преобразование. Результаты постобработки фетальной составляющей с помощью вейвлет-разложения приведены на рис.6, в.

Очищенная фетальная независимая компо

нента была использована для нахождения RR интервалов ЭКГ плода (рис.7, а), а также для получения усреднённого фетального кардиоцикла (рис.7, б). При этом, усреднение фетального ЭКГ сигнала проведено по методу ЭКГ ВР при накоплении фетальных кардиоциклов с синхронизацией по R зубцу.

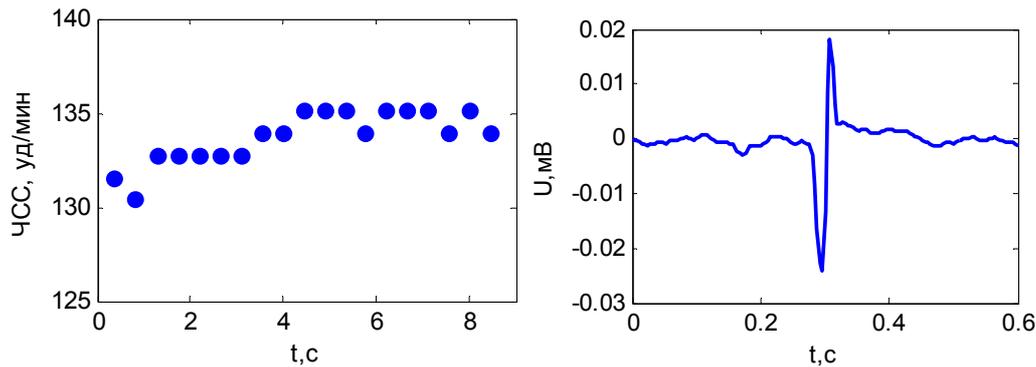


Рис. 7. Результаты численных экспериментов с реальными абдоминальными ЭКГ сигналами а) оценивание частоты сердечных сокращений плода; б) определение усреднённого кардиоцикла плода

Численные эксперименты показали, что предложенный метод позволяет выполнить оценивание частоты сердечных сокращений плода, а также выявить изменения морфологии фетальных кардиоциклов.

Выводы

Выполненное моделирование сигналов ЭКГ плода даёт возможность отображать состояние матери и плода в норме и при патологии. Перспективным направлением развития электрокардиографических методов и средств для оценивания состояния плода в течение всей беременности является создание базы модельных электрокардиосигналов с учётом патологических изменений в морфологии зубцов и комплексов ЭКГ плода.

Предложенный комплексный метод выделения ЭКГ плода из абдоминальных электрокардиосигналов матери на основе сочетания анализа главных компонент, анализа независимых компонент и вейвлет-преобразования позволяет оценить как вариабельность сердечного ритма плода, так и морфологические параметры кардиоциклов плода.

Список использованных источников

1. *Воскресенский С.Л.* Оценка состояния плода. Кардиотокография. Допплерометрия. Биофизический профиль: учеб. пособие./С. Л. Воскресенский // Минск: Книжный Дом. - 2004. — 304 с.
2. *Sameni R.* A Review of Fetal ECG Signal Processing: Issues and Promising Directions/ R. Sameni, G. Clifflord// The Open Pacing, Electrophysiology and Therapy Journal. — 2010. — Vol. 3.— P. 4–20.
3. *Amer-Wahlin.* Foetal ECG and STAN technology – a review / Amer-Wahlin, B.Yli, S. Alurkumaran // Eur. Clin. Obstet. Gynaecol. – 2005, – P.61–73.
4. *Seungjin Choi.* Blind Source Separation and Independent Component Analysis: A Review/ Andrzej Cichocki, Hyung-Min Park, Soo-Young Lee//Neural Information Processing. — 2005. — Vol.6, No.1, 57 pages.
5. *Шульгин В.И.* Метод регистрации и анализа электрокардиограммы плода в ходе беременности /В.И.Шульгин, А.В.Токарев// Радіоелектронні і комп'ютерні системи. — 2008. — №3(30). — С.66 - 75.
6. *V. Zarzoso.* Noninvasive Fetal Electrocardiogram Extraction Blind Separation versus Adaptive Noise Cancellation/ V. Zarzoso, A.K. Nandi// IEEE Trans. Biomed. Eng. —2001.—Vol. 48. — P.12–18.
7. *Bruno Azzerboni.* A New Approach Based On Wavelet-ICA Algorithms For Fetal Electrocardiogram Extraction/ Bruno Azzerboni, Fabio La Foresta, Nadia Mammone, Francesco Carlo Morabito // In proceeding of: European Symposium on Artificial Neural Networks. — 2005. — P. 193–198.
8. *Robert Plonsey.* Bioelectricity: A Quantitative Approach, 3rd edition // Robert Plonsey, Roger C. Barr // Springer — 2007. — 528 p.
9. *McSharry P.E.* A Dynamic Model for Generating Synthetic Electrocardiogram Signals / P. E. McSharry, G. D. Clifford, L. Tarassenko, L. A. Smith // IEEE Trans. Biomed. Eng. — vol. 50. — 2003. — P. 289–294.
10. *Mochimaru F.* Detecting the Fetal Electrocardiogram by Wavelet Theory-Based Methods/ F. Mochimaru, Y. Fujimoto, Y. Ishikawa // Progress in Biomedical Research. — 2002. — Vol. 7. — No. 3. — P. 185–193.

Поступила в редакцию 27 января 2014 г.

УДК 616.12- 073.7

І.І. Боровський, Н.Г. Іванушкіна, канд.техн.наук, **К.О. Іванько**, канд.техн.наук, **Е.Р. Лисенко**, **О.В. Панасюк**

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
вул. Політехнічна 16, корпус12, м. Київ, 03056, Україна.

Комплексний метод для виділення лектрокардіосигналів плоду з абдомінальних сигналів матері

У статті розглянуто неінвазивний підхід до оцінювання стану плода за допомогою систем електрокардіографії високого розрізнення. Запропоновано комплексний метод для виділення електрокардіосигналів плоду з абдомінальних сигналів матері, який заснований на спільному застосуванні аналізу головних компонент, аналізу незалежних компонент і вейвлет-аналізу. Проведені числові експерименти показали, що запропонований метод дозволяє усунути шуми в абдомінальній електрокардіограмі, а також виявити зміни морфології фетальних кардіоциклів в разі патології (гіпоксії). Бібл. 10, рис. 7.

Ключові слова: абдомінальні електрокардіосигнали, фетальні кардіоцикли, вейвлет-аналіз, метод «сліпого розділення джерел», аналіз головних компонент, аналіз незалежних компонент.

UDC 616.12- 073.7

I.I. Borovskyi, N.G. Ivanushkina, Ph.D., **K.O. Ivanko**, Ph.D., **E.R. Lysenko**, **O.V. Panasiuk**

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
Polytechnichna Str., 16, building 12, 03056, Kyiv, Ukraine.

Comprehensive method for extraction of fetal electrocardiosignals from maternal abdominal signals

The article describes a non-invasive method for evaluation of fetal condition using high resolution electrocardiography systems. A comprehensive method for fetal electrocardiosignals extraction from the abdominal maternal signals, which is based on the combined use of principal component analysis, independent component analysis and wavelet analysis, is proposed. The numerical experiments showed that application of the proposed method allowed us to eliminate noise in the abdominal electrocardiogram, as well as to identify pathological changes in the morphology of fetal cardiocycles. Reference 10, figures 7.

Keywords: abdominal electrocardiosignals, fetal cardiocycles, wavelet analysis, blind source separation, principal component analysis, independent component analysis.

References

1. Voskresenskiy S. L. (2004), "Assessment of the fetal status. Cardiotocography. Dopplerometry" . Minsk, Book House. P. 304. (Rus)
2. Sameni R., Cilliford G. (2010), "A Review of Fetal ECG Signal Processing: Issues and Promising Directions". The Open Pacing, Electrophysiology and Therapy Journal. Vol. 3, pp. 4–20.
3. Amer-Wahlin, Yli B., Alurkumaran S. (2005), "Foetal ECG and STAN technology – a review". Eur. Clin. Obstet. Gynaecol. P.61–73.
4. Seungjin Choi, Andrzej Cichocki, Hyung-Min Park, Soo-Young Lee. (2005), "Blind Source Separation and Independent Component Analysis: A Review". Neural Information Processing. Vol.6, no.1, pp.57.
5. Shulgina V.I., Tokarev A.V. (2008), "Method of recording and analysis of fetal electrocardiogram during pregnancy". Radio-electronic and computer systems. № 3 (30), pp.66-75. (Rus)
6. V. Zarzoso, Nandi A.K. (2001), "Noninvasive Fetal Electrocardiogram Extraction Blind Separation versus Adaptive Noise Cancellation". IEEE Trans. Biomed. Eng. Vol. 48, pp.12–18.

-
7. *Bruno Azzerboni, Fabio La Foresta, Nadia Mammone, Francesco Carlo Morabito.* (2005), "A New Approach Based On Wavelet-ICA Algorithms For Fetal Electrocardiogram Extraction". In proceeding of: European Symposium on Artificial Neural Networks. P. 193–198.
 8. *Robert Plonsey, Roger C. Barr.* (2007) "Bioelectricity: A Quantitative Approach, 3rd edition. Springer ". P. 528.
 9. *McSharry P.E., Clifford G. D., Tarassenko L., Smith L. A.* (2003). "A Dynamic Model for Generating Synthetic Electrocardiogram Signals. IEEE Trans. Biomed. Eng". Vol. 50. P. 289–294.
 10. *Mochimaru F., Fujimoto Y., Ishikawa Y.* (2002). "Detecting the Fetal Electrocardiogram by Wavelet Theory-Based Methods". Progress in Biomedical Research. Vol. 7, no. 3, pp. 185–193.