

Адаптивное подавление артефактов движения при записи ЭКГ лошади

С.А. Синютин, З. А. Коков, М. А Кармов

При записи электрокардиограммы (ЭКГ) в движении крайне важно минимизировать влияние артефактов движения. Артефакты движения можно разделить на две группы: низкочастотные (до 2 Гц) и высокочастотные (начиная с 20 Гц).

Низкочастотные артефакты обусловлены неравномерностью контакта электрода с телом, изменением емкости кабель-тело, позиционные изменения положения электрической оси сердца при движении.

Высокочастотные артефакты движения чаще всего связаны с миографической помехой от интенсивно работающих мышц конечностей. Если в задачу динамического наблюдения ЭКГ входит отслеживание изменений ST сегмента, то актуальной становится задача нейтрализации НЧ артефактов движения. В качестве модельного сигнала в работе использовалась ЭКГ человека с частотой сердечных сокращений 135 уд./мин. и частотой шагов 1.5 Гц и показан на рис. 1.

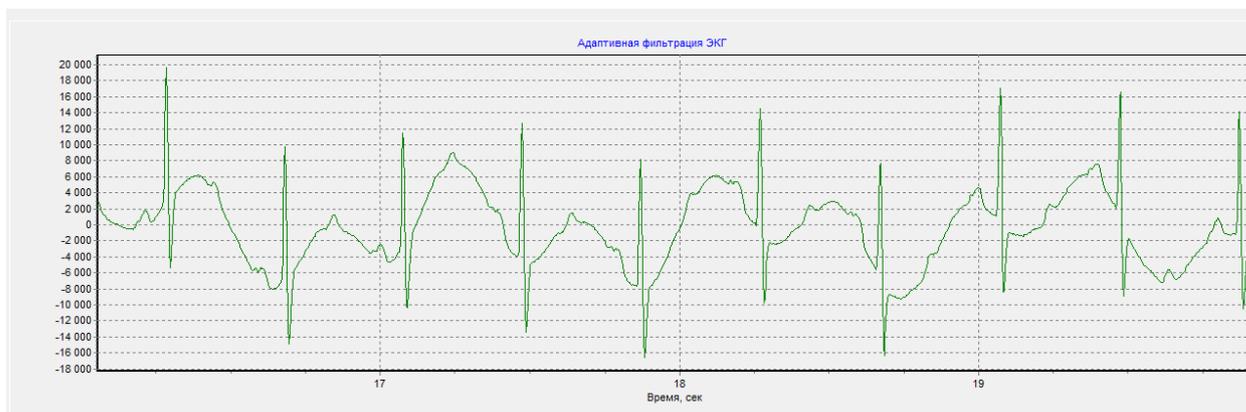


Рис. 1. - ЭКГ с НЧ артефактами движения

Борьба с артефактами движения невозможна с помощью полосовой фильтрации, так как информативные сигналы смещения ST сегмента (0.05-1 Гц) лежат в полосе частот НЧ артефактов движения.

В традиционных полосовых методах фильтрации входные сигналы обрабатываются фильтрами с постоянными параметрами. Фильтры при этом

могут иметь как конечную импульсную характеристику (КИХ), так и бесконечную импульсную характеристику (БИХ), но передаточная функция таких фильтров не зависит от параметров входных сигналов и их изменения во времени.

Адаптивные фильтры отличаются наличием связи параметров передаточной функции с параметрами входных или выходных сигналов а возможно и с параметрами их статистических соотношений, что позволяет фильтру самонастраиваться на оптимальную обработку сигналов [1]. Элементарный адаптивный фильтр содержит фильтр с переменными коэффициентами и блок адаптации, который на основании анализа входных, выходных и прочих данных вырабатывает сигнал управления коэффициентами фильтра. Адаптивные фильтры могут иметь также как КИХ, так и БИХ.

Наибольшее применение при разработке систем для адаптивной обработки сигналов находят два подхода: на основе схемы наименьших квадратов (СНК) и рекурсивной схемы наименьших квадратов (РСНК).

Основная область применения адаптивной фильтрации при обработке ЭФС– подавление нестационарных и стационарных помех и шумов, перекрывающихся по спектру со спектром ЭФС, или когда полоса помех неизвестна, переменна и не может быть задана априорно для расчета рассмотренных ранее фильтров с постоянными параметрами. Эффективное решение этих проблем возможно только адаптивными фильтрами.

Частотная характеристика адаптивных фильтров автоматически регулируется или модифицируется в соответствии с определенным критерием, позволяющем фильтру адаптироваться к изменениям характеристик входного сигнала. Рассмотрим наиболее распространенные схемы адаптивной фильтрации сигналов.

Блок-схема фильтра приведена на рис. 2.

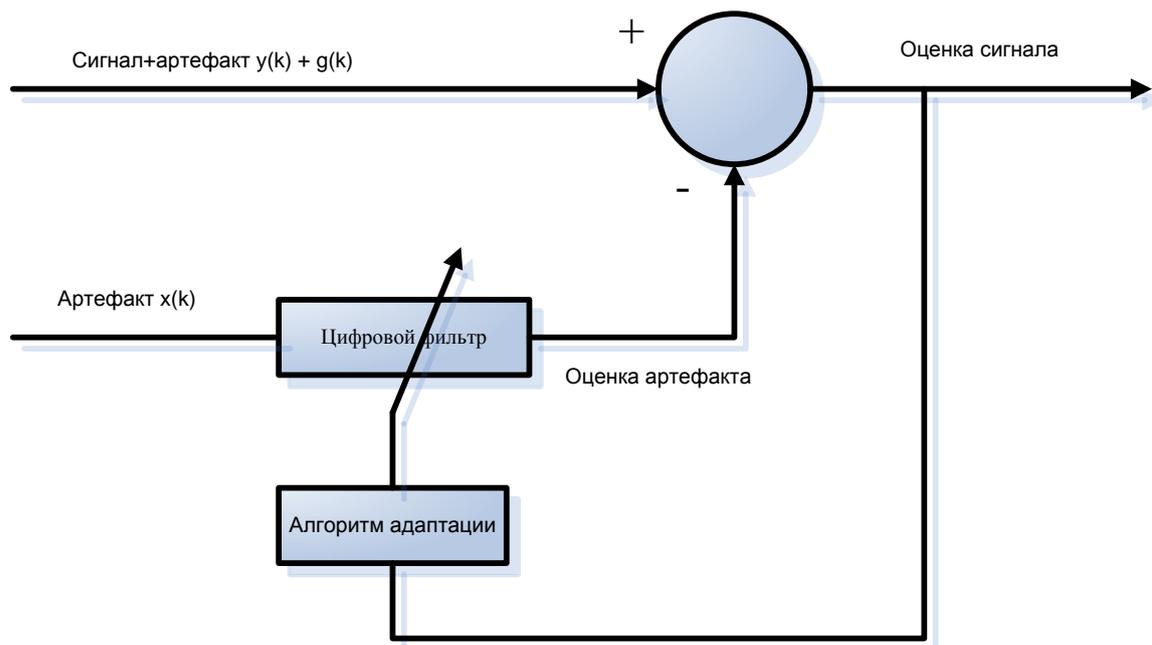


Рис. 2. - Блок-схема адаптивного фильтра

Фильтр состоит из блока цифрового фильтра с регулируемыми коэффициентами и адаптивного алгоритма для настройки и изменения коэффициентов фильтра. На фильтр одновременно подаются входные сигналы $y(k)$ и $x(k)$. Сигнал $y(k)$ содержит полезный сигнал $s(k)$ и некоррелированный с ним сигнал артефакта $g(k)$. Сигнал $x(k)$ – это сигнал от инерциального датчика движения, коррелированный с $g(k)$, который используется для формирования оценки сигнала.

В качестве алгоритма адаптации используется алгоритм последовательного спуска (Уидроу-Хопфа):

$$H_{k+1} = H_k - \mu e_k \cdot X_k,$$

$$e_k = y_k - H^T \cdot X_k.$$

После инициализации исходных коэффициентов фильтра в цикле выполняются следующие действия:

1. Вычисляется оценка шума $\overline{g(k)} = \sum_{n=0}^N h_k(n)x(k-n)$
2. Вычисляется оценка сигнала $e(k) = y(k) - \overline{g(k)}$
3. Пересчитываются коэффициенты фильтра для следующего шага

$$h_{k+1}(n) = h_k(n) + 2\mu e(k)x(k-n)$$

Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 3.

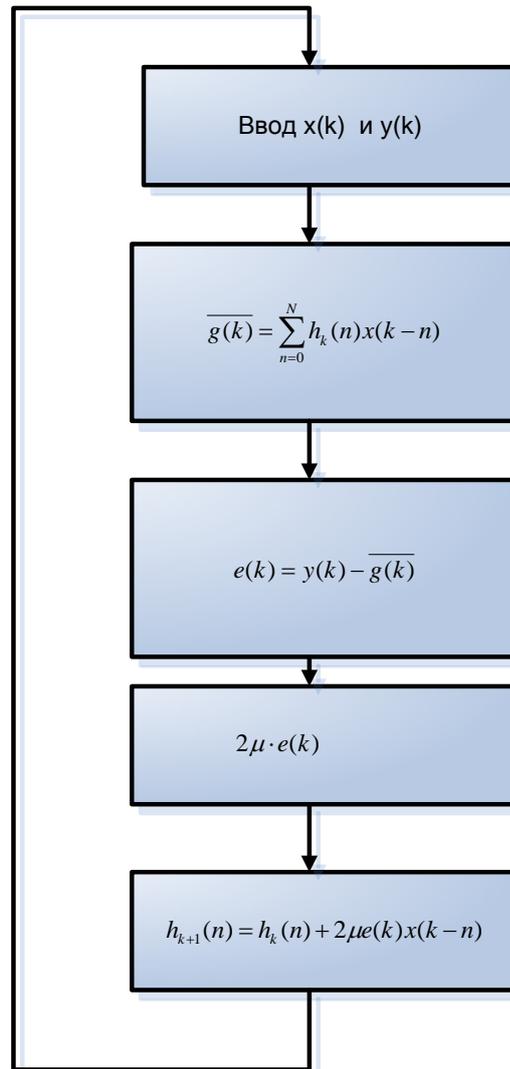


Рис. 3. - Алгоритм адаптации методом наименьших квадратов

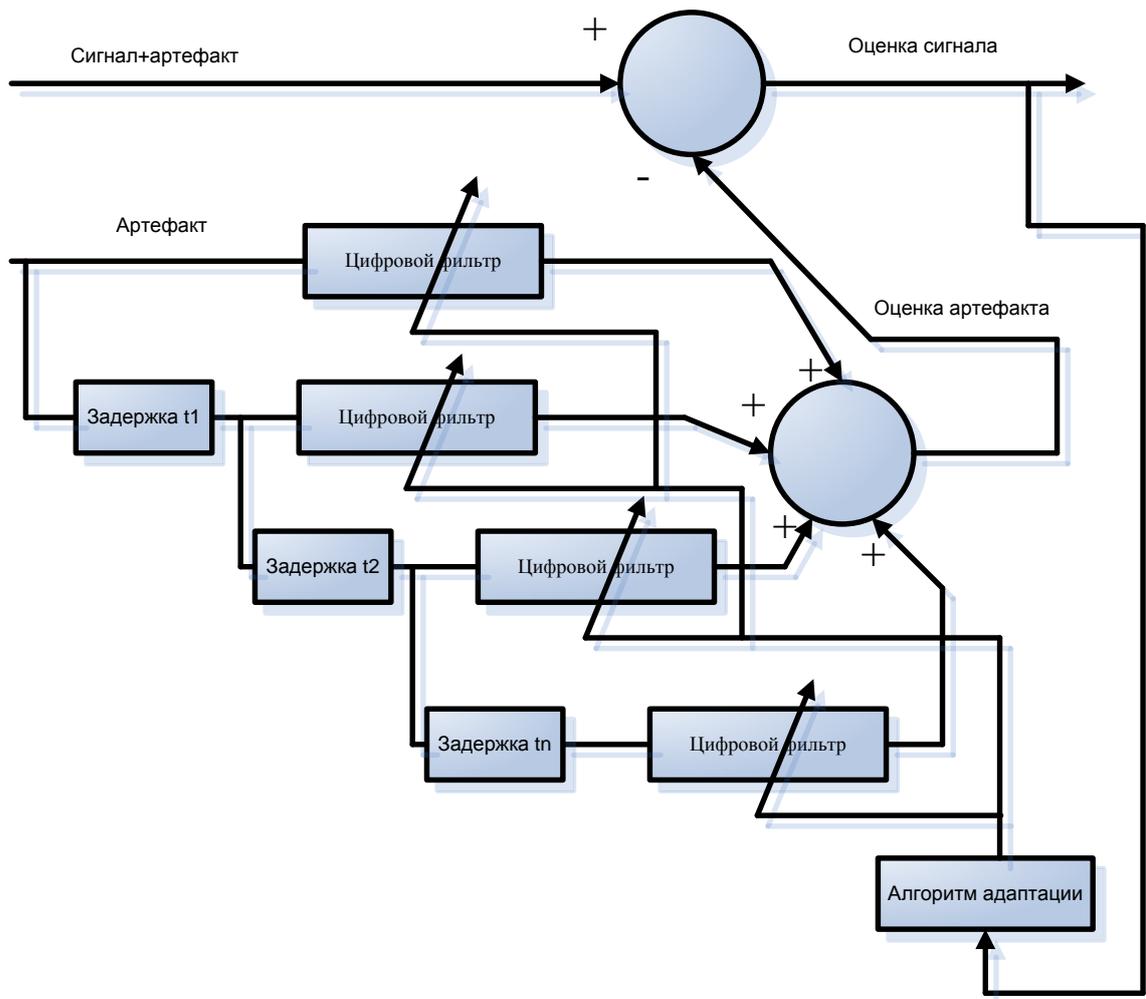


Рис. 4 - Структурная схема адаптивного фильтра артефактов движения

Алгоритм наименьших квадратов пересчитывает веса по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \omega_{1,k+1} &= \omega_{1k} + 2\mu\varepsilon_k x_{1k} \\ \omega_{2,k+1} &= \omega_{2k} + 2\mu\varepsilon_k x_{2k} \\ &\dots \\ \omega_{n,k+1} &= \omega_{nk} + 2\mu\varepsilon_k x_{nk} \end{aligned}$$

На практике точка максимальной оптимальности флюктуирует около теоретически возможной. Если входной сигнал нестационарный, то изменение статистик сигнала должно происходить достаточно медленно, чтобы коэффициенты фильтра успевали следить за этими изменениями.

В адаптивном фильтре очень важен правильный выбор параметра адаптации μ .

При малых значениях параметра адаптации фильтр не успевает адаптироваться за период стационарности помехи, при больших значениях параметра адаптации сначала появляются искажения полезного сигнала, а затем начинаются высокочастотные осцилляции и решение расходится. На рис. 5 и рис. 6 показан процесс адаптации фильтра при относительно больших параметрах адаптации, фильтр адаптируется за 1-4 секунды, но искажения ST сегмента при этом чрезмерно большие.

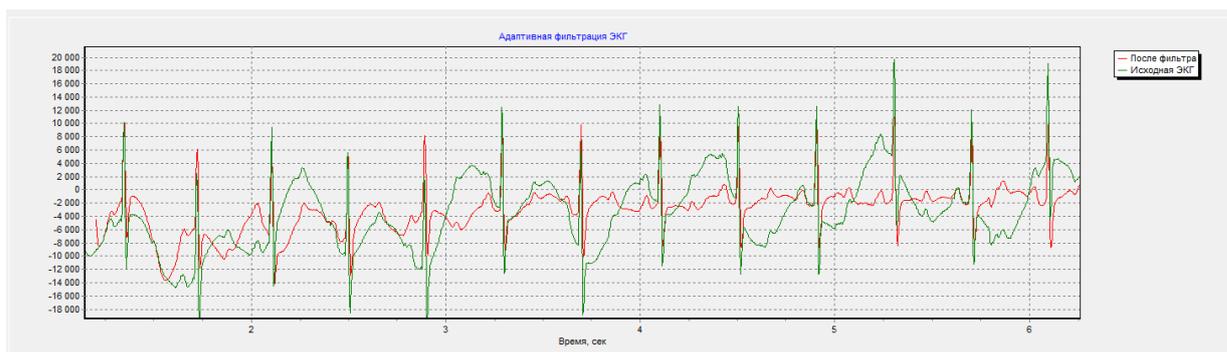


Рис. 5. - Адаптивный фильтр адаптировался за 4 секунды, $\mu = 10^{-10}$

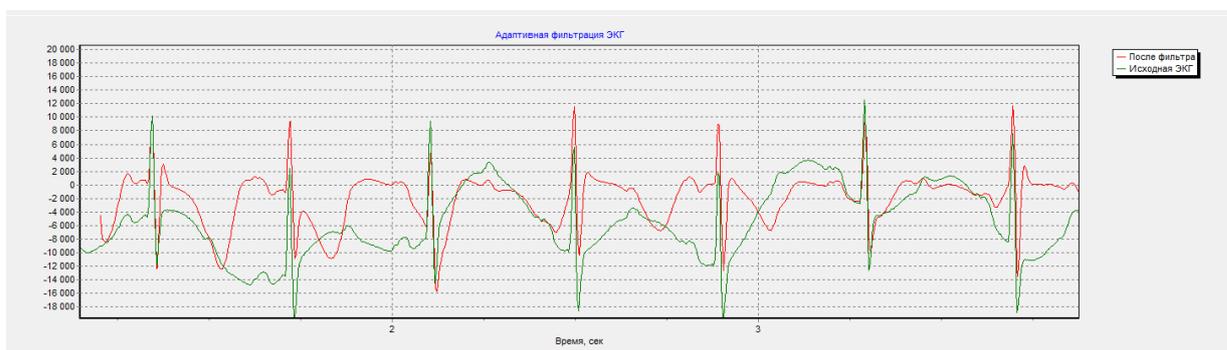


Рис. 6. - Адаптивный фильтр адаптировался за 1 секунду, $\mu = 10^{-9}$

Наиболее качественная фильтрация показана на рисунке 7. Видно, что ST сегмент не искажен, при этом амплитуда артефактов движения достигает до 100% амплитуды ЭКГ.

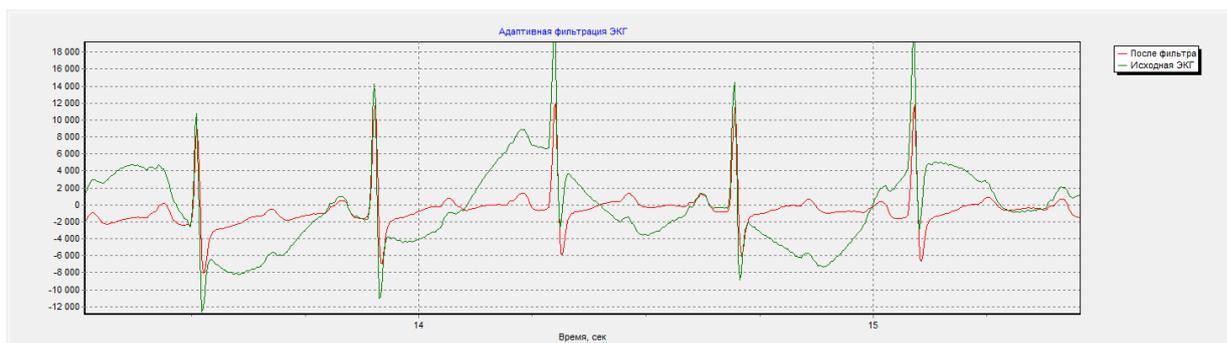


Рис. 7. - Адаптивный фильтр с оптимальным $\mu = 10^{-11}$

Структура фильтра представлена на рисунке 4, количество коэффициентов фильтра 4, задержки (в квантах) – 200, 300, 400.

Далее показан фрагмент программы на языке Pascal, реализующей данный адаптивный фильтр:

```
w1:=0; w2:=0; w3:=0; w4:=0; mu:=1e-11; eps:=0;
for i:=401 to 60000 do
begin
YY:=ACS[i]*w1+ACS[i-200]*w2+ACS[i-300]*w3+ACS[i-400]*w4;
w1:=w1+2*mu*eps*ACS[i];
w2:=w2+2*mu*eps*ACS[i-200];
w3:=w3+2*mu*eps*ACS[i-300];
w4:=w4+2*mu*eps*ACS[i-400];
eps:= Ecg1[i]-YY;
end;
```

На каждый отсчет сигнала требуется 12 умножений и 7 сложений. На рис. 8 показан совершенно тяжелый случай для обработки, когда амплитуда артефактов значительно превышает полезный сигнал. Видно, что адаптивный фильтр прекрасно справился с этой задачей.

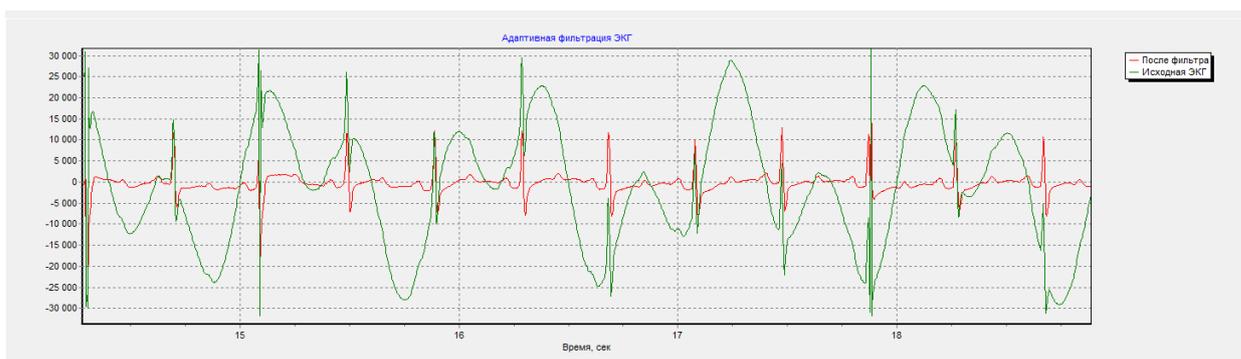


Рис. 8. - Работа адаптивного фильтра при амплитуде артефактов движения в 2-2.5 раз больше амплитуды ЭКГ

Проблемы могут возникать при единичных локальных нестационарностях артефакта движения. Фильтр не успевает адаптироваться за время длительности нестационарного участка, как видно на рис. 9.

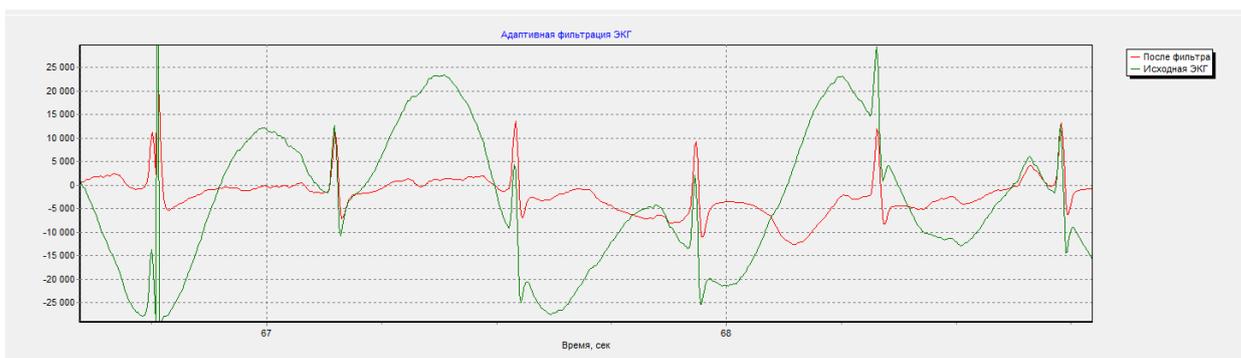


Рис. 9. - Работа адаптивного фильтра при большой локальной нестационарности артефакта движения

Выводы:

1. Адаптивный фильтр хорошо фильтрует артефакты движения, не искажая ЭКГ при стационарной или медленно меняющейся помехе.
2. Фильтр может эффективно работать даже при артефактах, превышающих амплитуду полезного сигнала
3. Для правильной работы фильтра необходимо тщательно подобрать параметр адаптации
4. Для эффективной работы фильтра достаточно 4 адаптируемых коэффициентов

Результаты исследований, изложенные в данной статье получены в рамках реализации ГБ ФНИР № 43.01.51 по теме: «Исследование маркеров информационной перегруженности человека при решении задачи непрерывного управления техническим объектом». Исследования проводились в ФГАОУ ВПО ЮФУ.

Литература:

1. Адаптивные фильтры [Текст] / Под ред. К.Ф.Н.Коузэна и П.М.Гранта. – М.: Мир, 1988, 392 с.

2. Синютин С.А. Анализ RR интервального ряда водителя в условиях сильных помех с помощью Wavelet преобразования [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/919> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
3. Тарасова И.А, Леонова А.В., Синютин С.А. Алгоритмы фильтрации сигналов биоэлектрической природы [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №4 (часть 2). – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1481> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
4. Синютин С.А., Сахаров В.Л. Определение мощности, развиваемой человеком при ходьбе по измерению ускорений [Текст] // Рассеяние электромагнитных волн. Межвед. сб. науч.-техн. статей. – Вып.16/ Под ред. Ю.В. Юханова. – Таганрог: ТТИ ЮФУ. – 229с.
5. Синютин С.А. Теория и конструкция полиграфа для регистрации мощности, развиваемой человеком при ходьбе [Текст]: тез. докл. III Международной науч.-практ. конф. (1 – 4 октября 2009, г. Ростов-на-Дону) / г. Ростов-на-Дону. – 2009. – 277 с.
6. Семенистая Е.С., Леонова А.В. Экспериментальное исследование зависимости времени пульсовой волны от систолического артериального давления [Электронный ресурс] // «Актуальные вопросы исследования общественных и технических систем». Материалы Всероссийской научной конференции, часть 2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – Режим доступа: <http://fre.tti.sfedu.ru/ru/conferences/132-aviots.html> – Загл. с экрана / – Яз. рус.
7. Леонова А.В., Зиновкин П.К., Болдырев Е.Б. Аппаратно-программный комплекс регистрации нагрузки для функциональной диагностики [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №4 (часть 1). – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1130> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

8. Glentis G.O., Berberidis K., Theodoridis S. Efficient Least Squares Adaptive Algorithms for FIR Transversal Filtering [Текст] // IEEE Signal Processing Magazine, 1999.— V. 16.—N. 4.— P. 13–41.
9. Haykin S. Adaptive Filter Theory [Текст]:4th edition. Prentice Hall, 2002.— 936 p. ISBN 0-13-048434-2.
10. Farhang-Boroujeny B. Adaptive Filters. Theory and Applications [Текст] // John Wiley & Sons ISBN: 0471983373.