

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

УДК 004.031
doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-7

МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ

Е. А. Алтай

Казахский национальный исследовательский технический
университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, Республика Казахстан
aeldos@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* На точность и помехоустойчивость системы обработки электрокардиосигналов влияет множество факторов. Но значительное влияние при регистрации электрокардиосигналов оказывают узкополосная низкочастотная и широкополосная электрическая помехи. Эти помехи приводят к искажению информационных участков сигнала и снижению точности обработки сигнала. Для компенсации помех и повышения точности и помехоустойчивости системы обработки электрокардиосигналов применяются методы фильтрации, где фильтры рассматриваются как элементы входа и выхода системы обработки кардиографической информации. Цель работы – анализ новых методов полиномиальной фильтрации зашумленных электрокардиосигналов, искаженных низкочастотной и высокочастотной аддитивными помехами, а также количественная оценка точности и помехоустойчивости системы обработки. *Материалы и методы.* Существующие методы фильтрации при наличии электрической помехи, изменяющейся в широком диапазоне частоты электрокардиосигнала, не позволяют повысить помехоустойчивость и точность обработки. Получение новых методов фильтрации, более точных и устойчивых к помеховым воздействиям по сравнению с известными аналогами, позволит повысить результативность обработки электрокардиосигналов. *Результаты.* Представлены результаты реализации методов полиномиальной цифровой фильтрации низкочастотной и высокочастотной помех применительно к задаче обработки электрокардиосигналов при помощи аппроксимирующих полиномиальных моделей. Выполнено компьютерное моделирование, иллюстрирующее идентичность отфильтрованной и исходной форм электрокардиосигнала при использовании процедуры двунаправленной обработки предложенными фильтрами в сравнении с известными фильтрами. Приводятся количественные оценки, полученные при использовании тестовых электрокардиосигналов и помех для оценки результативности обработки на выходе системы фильтрации. *Вывод.* Полученные результаты показали, что методы фильтрации, основанные на аппроксимирующих полиномах Ньютона, уменьшают значения ошибки фильтрации (повышают точность) и увеличивают значения отношения сигнал/помеха (повышает помехоустойчивость) системы обработки электрокардиосигнала при сравнении с известными фильтрами.

Ключевые слова: обработка электрокардиосигналов, фильтрация, помехи, полиномиальные цифровые фильтры, соотношения сигнал/помеха, двунаправленная фильтрация

Для цитирования: Алтай Е. А. Методы фильтрации для оценки точности и помехоустойчивости системы обработки электрокардиосигналов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 53–64. doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-7

NOISE-RESISTANCE AND ACCURACY ASSESSMENTS ECG SIGNAL PROCESSING SYSTEMS BASED ON FILTERING METHODS

Y.A. Altay

K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Republic of Kazakhstan
aeldos@inbox.ru

Abstract. *Background.* The accuracy and noise-resistance of an ECG signal processing system is influenced by many factors. But narrow-band low-frequency and broadband electrical interference have a significant impact when recording ECG signals. This interference leads to distortion of the information sections of the signal and a decrease in the accuracy of signal processing. To compensate for interference and increase the accuracy and noise-resistance of the ECG signal processing system, filtering methods are used, where filters are considered as input and output elements of the cardiographic data processing system. Aim of the research – analysis of new methods of polynomial filtering of noisy ECG signals distorted by low-frequency and high-frequency additive noise, as well as quantitative assessment of the accuracy and noise-resistance of the processing system. *Materials and methods.* Existing methods of filtering under the influence of electrical noise that varies over a wide frequency range of the ECG signal do not allow increasing noise-resistance and accuracy processing systems. Obtaining new filtering methods that are more accurate and resistant to interference compared to known analogues will improve the efficiency of ECG signal processing. *Results.* The results of the implementation of methods of polynomial digital filtering of low-frequency and high-frequency interference are presented in relation to the problem of processing ECG signals using approximating polynomial models. A computer simulation was performed to illustrate the identity of the filtered and original ECG signal forms when using the bidirectional processing procedure with the proposed filters in comparison with known filters. Quantitative estimates obtained by using test ECG signals and interference to assess the effectiveness of processing at the output of the filtering system is presented. *Conclusion.* The results obtained showed that filtering methods based on approximating Newton polynomials reduce the filtering error values (increase accuracy) and increase the signal-to-noise ratio (increases noise-resistance) of the ECG signal processing system when compared with known filters.

Keywords: ECG signal processing, filtering, interference, polynomial digital filters, signal-to-noise ratio, bi-directional filtering

For citation: Altay Y.A. Noise-resistance and accuracy assessments ecg signal processing systems based on filtering methods. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(1):53–64. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-7

Введение

Для решения задачи обработки электрокардиосигналов (ЭКС) широкое распространение получили системы фильтрации, основанные на методах полиномиальной цифровой фильтрации [1–9]. Актуальность применения полиномиальных методов фильтрации заключается в том, что такие фильтры во многом позволяют настраивать свои параметры к параметрам обрабатываемых ЭКС для выделения информационно и диагностически значимых параметров сигнала из аддитивной смеси низкочастотной и высокочастотной помех.

Низкочастотная и высокочастотная помехи относятся к основным факторам, снижающим точности и помехоустойчивости системы цифровой обработки ЭКС. Низкочастотная помеха (дрейф изолиний) возникает при плохом контакте электродов с биообъектом (человеком) во время дыхания человека и т.д. [5–7, 10]. Составляющие низкочастотной помехи расположены в диапазоне частоты не более чем 0,3 Гц [5, 7]. Высокочастотная помеха – узкополосная электрическая помеха, которая формируется от подключенных в сеть внешних электрических приборов и т.д. [5–7, 10]. Касательно электрической помехи в работах [8, 11] показано, что помимо влияния узкополосной электрической помехи (50 Гц) на информационно и диагностически значимые параметры ЭКС также могут влиять электрические помехи, изменяющиеся в широком диапазоне частоты сигнала (от 44 до 56 Гц). Влияние такой электрической помехи может быть эффектом, вызванным интерференцией электрической помехи 50 Гц, возникающей во время регистрации сигнала с помощью портативных систем и ноутбуков. Присутствие перечисленных помех приводит к искажению амплитудных и временных параметров сигнала [1–11] и,

следовательно, к снижению достоверности получаемых результатов анализа variability сердечного ритма [12–14].

Для компенсации влияния перечисленных классов помех необходима разработка и применение методов цифровой фильтрации, обеспечивающих устойчивость к помеховым воздействиям. В связи с этим в рамках данной статьи рассматривается реализация методов полиномиальной цифровой фильтрации на основе фильтра верхних частот (ФВЧ) и режекторного (РЖ) фильтра для ослабления влияния низкочастотной и высокочастотной помехи.

Анализ последних работ [1–11] выявил, что среди полиномиальных методов фильтрации для компенсации влияния низкочастотной и высокочастотной помехи применяют фильтры Баттерворта и реже полиномы Чебышева и Кауэра. Это обусловлено тем, что фильтры Чебышева и Кауэра как в полосе пропускания сигнала, так и в полосе подавления помех порождают заметные пульсации, которые при фильтрации вносят искажения на параметры сигнала [1–5, 7]. Из-за этой особенности фильтры Баттерворта являются рекомендуемыми для обработки ЭКС.

Несмотря на широкое использование фильтров Баттерворта, в работах [8, 9, 11, 15] на основе полиномиальных моделей разработаны ФВЧ и каскадный РЖ фильтр, отличающиеся высокой результативностью подавления низкочастотных и высокочастотных помех данного сигнала за счет введения аппроксимирующих полиномов Ньютона и обеспечивающие повышение результативности обработки ЭКС при минимальных искажениях параметров сигнала. В работах [8, 9, 11, 15] анализ эффективности предложенных методов цифровой полиномиальной фильтрации проведен на основе использования натуральных ЭКС с помощью портативного регистратора экспертного уровня (12-канального Холтер-монитор «КАРДИОТЕХНИКА-07-3/12» фирмы ИНКАРТ в Национальном медицинском исследовательском центре имени В. А. Алмазова, г. Санкт-Петербург).

Актуальность применения полинома Ньютона для синтеза и аппроксимации передаточной функции ФВЧ и РЖФ заключается в том, что в современной теории полиномиальной фильтрации ЭКС применение данного полинома является менее проработанным и освященным в научной литературе по рассматриваемой тематике. Необходимо подчеркнуть, что полиномы Ньютона являются объектами теории системы автоматического управления и применяются достаточно широко для решения задачи синтеза наблюдателей в силу того, что демонстрирует наилучшие результаты при решении задачи систем автоматического управления пьезоприводом [16].

Однако, несмотря на вышесказанное, в настоящее время вопросы количественной оценки точности и помехоустойчивости системы обработки электрокардосигнала, исследованных и разработанных в научных работах [8, 9, 11, 15], методов фильтрации для незашумленных (чистых) ЭКС и помех недостаточно освящены в научной литературе. При этом следует также отметить, что применение незашумленных ЭКС дает значимое преимущество, заключающееся в возможности синтезировать помехи и формировать их аддитивные модели для получения расчетно-теоретических результатов обработки при оценке точности помехоустойчивости системы фильтрации.

Таким образом, в рассматриваемой статье представлены результаты реализации методов полиномиальной цифровой фильтрации низкочастотной и высокочастотной помехи ЭКС на основе ФВЧ и РЖФ. Исследуется ФВЧ и РЖФ на основе аппроксимирующего полинома Ньютона и проведена количественная сравнительная оценка результативности обработки с хорошо зарекомендовавшими себя фильтрами Баттерворта для рассматриваемого вида полиномиальных цифровых фильтров.

Постановка задачи исследования

Рассматривается задача обработки ЭКС вида

$$x(q) = s(q) + \xi(q), \quad (1)$$

где q – отсчеты измерений ЭКС; $x(q)$ – зашумленный ЭКС; $s(q)$ – незашумленный сигнал; $\xi(q)$ – помехи. Для формирования аддитивной смеси сигнала и помех (1) рассматривается модель дрейфа изолиний $\xi_{\text{ди}}$ вида

$$\xi_{\text{ди}}(q) = A \sin\left(2\pi \frac{f_{\xi}}{f_d} k + \phi\right), \quad (2)$$

где A – амплитуда помехи; f_{ξ} – частота помехи; f_d – частота дискретизации электрической помехи; k – порядковый номер отсчетов помехи; ϕ – начальная фаза. Аналогично модели (2) рассматривается модель широкополосной электрической помехи $\xi_{\text{эл}}$ вида

$$\xi_{\text{эл}}(q) = \sum_{i=1}^m A_i \sin\left(2\pi \frac{f_i}{f_d} k + \phi_i\right), \quad (3)$$

где m – число гармоник помехи; A_i – амплитуда i -й гармоники помехи; f_i – частота помехи; f_d – частота дискретизации помехи; k – порядковый номер отсчетов помехи; ϕ_i – начальная фаза сигнала i -й гармоники помехи.

В качестве низкочастотной помехи рассматривается помеха дрейфа изолиний (2) с несущей частотой $f_{\xi} = 0,3$ Гц [5, 7], а в качестве высокочастотной помехи рассматривается электрическая помеха (3), изменяющаяся в широком диапазоне частоты от 44 до 56 Гц [8, 9, 11] при частоте дискретизации сигнала 250 Гц [17, 18].

Сформулируем цель полиномиальной цифровой фильтрации низкочастотной и высокочастотной помехи как решение задачи обработки ЭКС для компенсации влияния дрейфа изолиний и широкополосной электрической помехи на параметры сигнала.

Ставится задача выделения информационного сигнала $s(q)$ из аддитивной смеси $x(q)$, регистрируемого дискретными отсчетами q путем полиномиальной цифровой высокочастотной и режекторной фильтрации.

Данная задача решена при допущении, что амплитуда искажающих помех ЭКС вида (2) и (3) известна, что является типовым допущением при решении задачи обработки сигнала для представления результатов фильтрации.

Материал и метод исследования

Материал исследования. Исходным материалом исследований служат тестовые электрокардиосигналы и помехи, допущенные и описанные модели в разделе «Постановка задачи». Для формирования зашумленного сигнала тестовые сигналы получены из верифицированной международной базы Массачусетского института технологий (MIT). Выбор ЭКС из данной базы обосновывался тем, что на сегодняшний день она является верифицированной базой биосигналов для тестирования и оценки точности и помехоустойчивости методов обработки сигнала, а также для получения расчетных результатов обработки при вычислительном эксперименте [5, 6, 21].

Оценка точности и помехоустойчивости системы обработки ЭКС при реализации методов полиномиальной цифровой фильтрации проводилась двумя способами: качественными и количественными. Качественные результаты демонстрировались визуально, т.е. результаты фильтрации сравнивались с исходными отфильтрованными сигналами. Количественные результаты демонстрируются числовыми значениями и позволяют оценить данные о вносимых искажающих воздействиях при фильтрации и компенсации помех, влияющих на сигнал ЭКС.

Количественная оценка точности и помехоустойчивости обработки ЭКС при реализации методов полиномиальной цифровой фильтрации проведена на основе следующих показателей: отношения сигнал/помеха (SNR) до и после обработки сигнала (4) [21]:

$$SNR_{\text{до}}^{\text{фильтрации}} = 10 \lg \left[\frac{\sum_{q=1}^N s(q)^2}{\sum_{q=1}^N (x(q) - s(q))^2} \right], \quad SNR_{\text{после}}^{\text{фильтрации}} = 10 \lg \left[\frac{\sum_{q=1}^N s(q)^2}{\sum_{q=1}^N (s'(q) - s(q))^2} \right], \quad (4)$$

где $s(q)$ – исходный ЭКС; $x(q)$ – зашумленный ЭКС; $s'(q)$ – обработанный ЭКС.

Среднеквадратичная ошибка фильтрации сигнала до обработки ($MSE_{\text{до}}$) между зашумленным и не зашумленным сигналом, а также после обработки ($MSE_{\text{после}}$) между исходным (не зашумленным) и отфильтрованным сигналом (5) [21]:

$$MSE_{\text{до фильтрации}} = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N (x(q) - s(q))^2, \quad MSE_{\text{после фильтрации}} = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N (s(q) - s'(q))^2, \quad (5)$$

Вычисление вышеперечисленных количественных показателей в общей совокупности позволяет одновременно оценить помехоустойчивость, точность обработки сигнала ЭКС при реализации методов фильтрации.

Метод исследования. Синтез полиномиальных методов фильтрации ЭКС осуществлен с помощью передаточной функции нормированного фильтра-аналога нижних частот, т.е. фильтра с частотой среза $\omega = 1$ рад/с. Передаточная функция такого фильтра-аналога определяется следующим образом [19, 20]:

$$W_{\text{норм}}(s) = \frac{\omega_c^n}{A(s)} = \frac{1}{A(s)}, \quad (6)$$

где s – комплексная переменная; ω_c – частота среза; n – порядок фильтра; $A(s)$ – аналитическое выражение полинома для аппроксимации передаточной функции фильтров.

Передаточная функция непрерывного ФВЧ и каскада РЖФ с частотой среза ω_c и шириной полосы подавления помехи B находится из передаточной функции ФНЧ нормированного вида (6)

путем замены оператора s оператором для верхних частот $\frac{\omega_c}{s}$ и $\frac{Bs}{s^2 + \omega_c^2}$ для режекторного

фильтра [19]. При синтезе фильтров для уменьшения вносимого искажающего воздействия фильтрами высоких порядков на параметры обрабатываемых сигналов и упрощения громоздкости вычислений выбраны полиномы второго ($n = 2$) и четвертого ($n = 4$) порядка. Для компенсации влияния помехи широкополосным РЖФ фильтром, характеризующимся низкой добротностью, предложено использовать каскад фильтров. Синтез каскада фильтров Ньютона и Баттерворта осуществлен последовательным соединением фильтрующих звеньев $n = 2$ и $n = 4$, а расчет общей передаточной функции – произведением двух этих звеньев. Передаточные функции синтезированных полиномиальных фильтров Ньютона и Баттерворта представлены в табл. 1.

Таблица 1

Передаточные функции фильтров

Фильтр	Преобразование	Передаточная функция фильтров $W(s)$	
ФВЧ	$s \rightarrow \frac{\omega_c}{s}$	Ньютон, $n = 2$	$\frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2}$
		Баттерворт, $n = 2$	$\frac{\omega_c^2}{s^2 + 1,414\omega_c s + \omega_c^2}$
РЖФ	$s \rightarrow \frac{Bs}{s^2 + \omega_c^2}$	Ньютон, $n = 2$	$\frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + Bs + \omega_c^2}$
		Ньютон, $n = 4$	$\frac{s^4 + 2\omega_c^2 s^2 + \omega_c^4}{s^4 + 2Bs^3 + (B^2 + 2\omega_c^2)s^2 + 2B\omega_c^2 s + \omega_c^4}$
		Баттерворт, $n = 2$	$\frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + Bs + \omega_c^2}$
		Баттерворт, $n = 4$	$\frac{s^4 + 2\omega_c^2 s^2 + \omega_c^4}{s^4 + 1,414Bs^3 + (B^2 + 2\omega_c^2)s^2 + 1,414B\omega_c^2 s + \omega_c^4}$

Преобразование параметров фильтра-аналога сопровождается удвоением порядка непрерывной передаточной функции РЖФ, а полиномы первого порядка Ньютона и Баттерворта совпадают между собой [8]. В результате непрерывные передаточные функции РЖФ Ньютона и Баттерворта для $n = 2$ аналогичны друг другу.

Расчет общей передаточной функции двух последовательно соединенных широкополосных РЖФ Ньютона приводит к выражению

$$W_{\text{общРЖФ_Ньютон}}(s) = \frac{s^6 + 3\omega_c^2 s^4 + 3\omega_c^4 s^2 + \omega_c^6}{s^6 + 3Bs^5 + 3(\omega_c^2 + B^2)s^4 + (6B\omega_c^2 + B^3)s^3 + 3(B^2\omega_c^2 + \omega_c^4)s^2 + 3B\omega_c^4 s + \omega_c^6}. \quad (7)$$

Общая передаточная функция широкополосного каскада фильтров Баттерворта будет иметь вид

$$W_{\text{общРЖФ_Бат.}}(s) = s^6 + 3\omega_c^2 s^4 + 3\omega_c^4 s^2 + \omega_c^6 \times \frac{1}{s^6 + 2,414Bs^5 + (3\omega_c^2 + 2,414B^2)s^4 + (4,828B\omega_c^2 + B^3)s^3 + (2,414B^2\omega_c^2 + 3\omega_c^4)s^2 + 2,414B\omega_c^4 s + \omega_c^6}. \quad (8)$$

Настройка параметров ФВЧ и РЖФ осуществлена нормировкой и трансформацией частоты среза помехи фильтра как [15]

$$\begin{cases} \omega_c = \left(\frac{f_{c1,2}}{f_d} \right) 2\pi, \Omega_{c1,2} = \left(\frac{2}{T} \right) \text{tg} \left(\frac{\omega_{c1,2}}{2} \right), \\ \Omega_c = \sqrt{\Omega_{c1}\Omega_{c2}}, \end{cases} \quad (9)$$

где $\omega_{c1,2}$, $\Omega_{c1,2}$ – нижняя и верхняя границы частоты среза для настройки фильтров; Ω_c – центральная частота среза. Настройка параметров фильтра вида (9) позволяет сохранить непрерывную частоту сигнала при цифровой обработке измерительных сигналов [15, 20].

Частота среза ФВЧ выбирается исходя из результатов [15, 21], где методом частотной селекции установлен оптимальный порог в 1 Гц для фильтрации дрейфа при минимальных искажениях информационных составляющих ЭКС. На основе значений частоты среза 1 Гц ФВЧ и частоты дискретизации 250 Гц [15, 17, 18] рассчитаны непрерывные передаточные функции ФВЧ и РЖФ. Затем с помощью билинейного преобразования непрерывные передаточные функции ФВЧ и РЖФ преобразованы в дискретную передаточную функцию для цифровой обработки сигнала. Данное преобразование реализовано с помощью программы MATLAB на основе

функции $\text{bilinear}()$, как $s = \frac{2}{T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right)$ при $T = 1$ с.

Согласно опубликованным работам [8, 9, 11, 15] синтезированные ФВЧ и РЖФ на основе аппроксимирующего полинома Ньютона так же, как и фильтры класса бесконечно-импульсной характеристики, обладают нелинейной фазовой характеристикой. Данную особенность крайне необходимо учитывать при фильтрации ЭКС. Нелинейность фазовой характеристики синтезированных полиномиальных фильтров могут искажать амплитудные и временные параметры сигнала (например, появление фазовых искажений).

Способом устранения (или компенсации) фазовых искажений, вносимых системой фильтрации, является двунаправленная фильтрация [8, 9, 11, 15]. В отличие от однонаправленной (обычной) фильтрации сигнала в виде «вход–выход», под двунаправленной фильтрацией понимается обработка сигнала «в обе стороны». При такой обработке сигнал фильтруется в прямом направлении, затем в обратном направлении. В результате возникающие фазовые сдвиги компенсируются. Структурная схема двунаправленной реализации ФВЧ и широкополосных РЖФ Ньютона и Баттерворта, а также их свертка в частотной области для фильтрации ЭКС представлены в работах [9, 11].

Результаты исследований

Получены результаты синтеза полиномиальных фильтров на основе аппроксимирующих полиномов Ньютона для решения задачи цифровой фильтрации низкочастотных и высокочастотных помех ЭКС.

Для фильтрации низкочастотной помехи исходный ЭКС был зашумлен сигналом с частотой помехи дрейфа изолиний. На рис. 1 представлены результаты зашумления исходного сигнала с моделью помехи (2) и его фильтрации.

Анализ полученных результатов позволяет выдвинуть утверждение о том, что синтезированные ФВЧ с применением полиномов Ньютона и Баттерворта, настроенные на частоту среза помехи 1 Гц, позволяют отфильтровать низкочастотную помеху ЭКС (рис. 1,а). Из-за наличия переходного процесса в самих фильтрах при обработке ЭКС искажается участок первого кардиоцикла сигнала ЭКС (рис. 1,б,в). При использовании ФВЧ Ньютона данное искажение

меньше, чем для фильтра Баттерворта. Разработанный фильтр позволяет компенсировать влияние низкочастотной составляющей дрейфа изолиний при минимальных искажениях участков сигнала. При визуальной оценке результата обработки также можно заметить, что результаты двунаправленной фильтрации обеспечивают сходство отфильтрованной формы ЭКС с исходной формой сигнала (черная и красная линия на рис. 1,б), т.е. двунаправленная обработка позволяет точнее отфильтровать низкочастотную помеху и устранить вносимые фильтрами искажения.

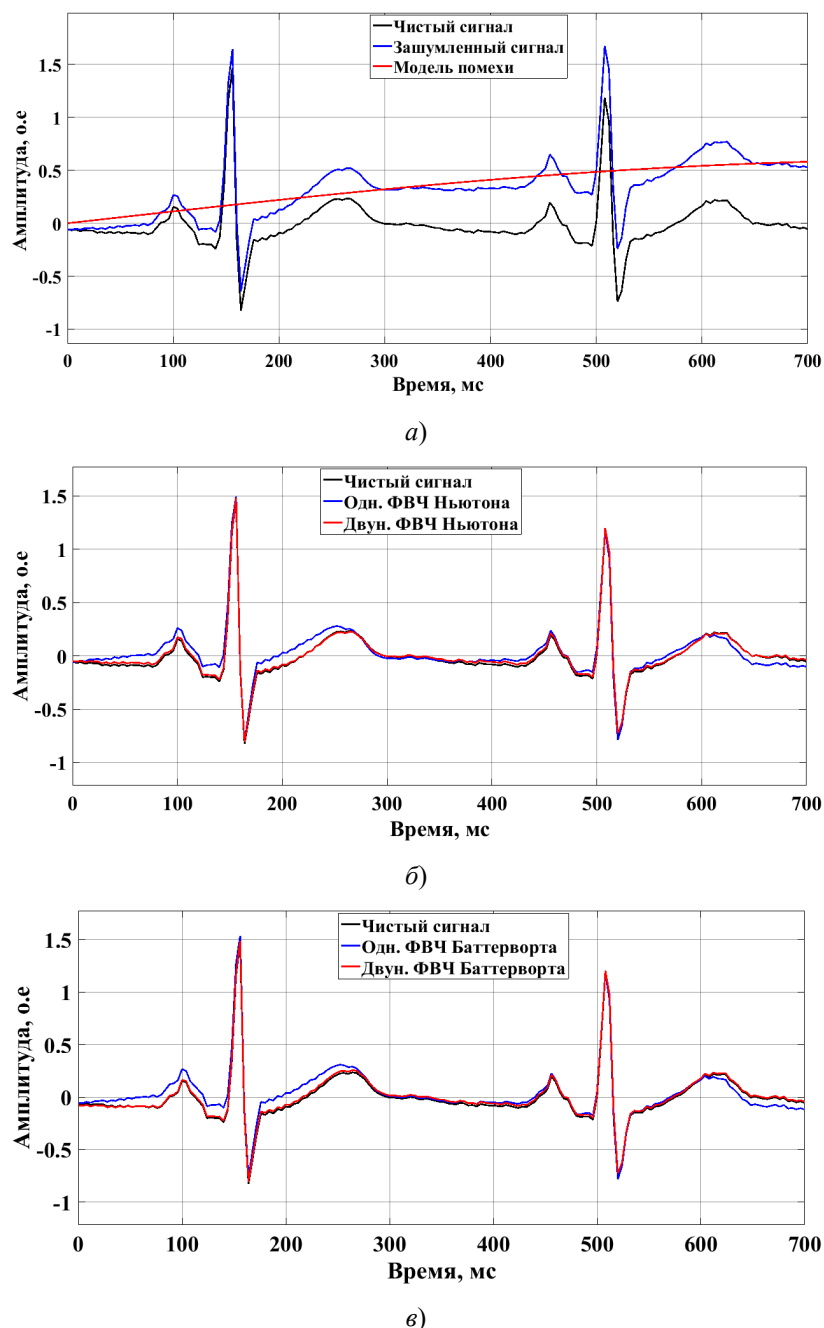
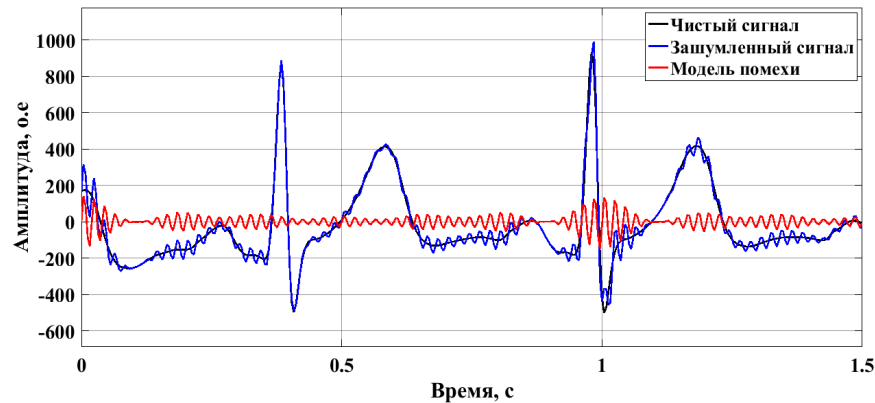


Рис. 1. Результаты однонаправленной и двунаправленной обработки зашумленного ЭКС:
а – зашумление ЭКС (из базы MIT); б – ФВЧ Ньютона; в – ФВЧ Баттерворта

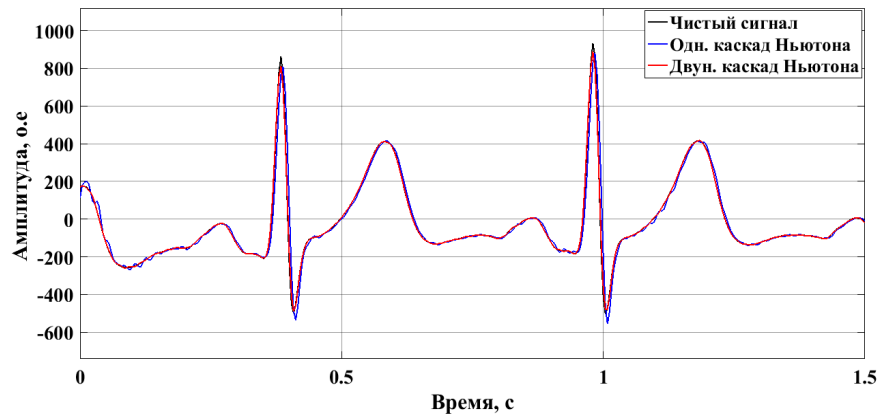
Для фильтрации высокочастотной помехи исходный ЭКС был зашумлен сигналом с частотой электрической помехи. На рис. 2 представлены результаты зашумления исходного электрокардиосигнала с моделью помехи (3) и его фильтрации.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что синтезированный полиномиальный каскад широкополосных РЖФ с применением полиномов Ньютона и Баттерворта, настроенных на частоту среза помехи от 44 до 56 Гц, позволяет отфильтровать электрическую

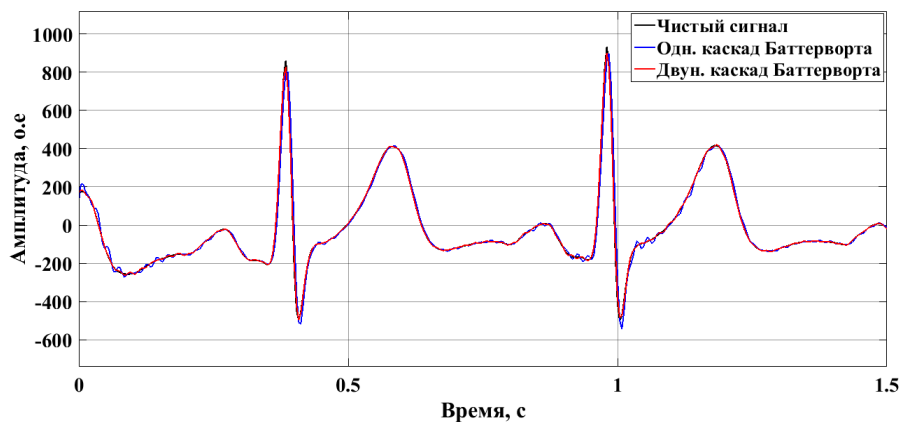
помеху ЭКС (рис. 2,*а*). Анализ обработки также показал, что из-за особенностей самих синтезированных РЖФ и нелинейности их фазовой характеристики в каждом кардиоцикле сигнала наблюдаются искажения в виде низкоамплитудных затухающих колебаний. Это связано с тем, что из-за наличия в числителе передаточной функции РЖФ, составляющей $s^2 + \omega^2$ [22], режекторные фильтры вносят характерные собственные искажения в сигналы при фильтрации в виде низкоамплитудных затухающих колебаний [22]. Однако из рис. 2,*б* можно заметить, что для разработанного каскада данное искажение меньше, чем для каскада фильтров с полиномом Баттерворта.



а)



б)



в)

Рис. 2. Результаты однонаправленной и двунаправленной обработки зашумленного ЭКС:
а – зашумление ЭКС (из базы МИТ); б – РЖФ Ньютона; в – РЖФ Баттерворта

Компенсация низкоамплитудных затухающих колебаний, вносимых каскадом РЖФ, в частности в каждом кардиоцикле сигнала, минимизирована при двунаправленной фильтрации

(черная и красная линия на рис. 2,б,в). При визуальной оценке результата обработки также можно заметить, что результаты двунаправленной фильтрации подтверждают сходство отфильтрованной формы ЭКС с исходной формой сигнала.

Результаты полиномиальной цифровой фильтрации ЭКС показали, что разработанные алгоритмы обработки позволяют компенсировать влияние низкочастотной помехи дрейфа изолиний и высокочастотной электрической помехи.

В табл. 2 представлена сравнительная количественная оценка точности и помехоустойчивости обработки ЭКС при двух режимах системы обработки: однонаправленная и двунаправленная фильтрация помехи. Для развернутой оценки различия количественных показателей при двух режимах фильтрации все числовые значения рассчитанных показателей представлены с точностью до третьего знака после запятой.

Таблица 2

Результаты оценки точности и помехоустойчивости методов фильтрации

Фильтры	Показатели			
	$SNR_{до}$, дБ	$SNR_{после}$, дБ	$MSE_{до}$, усл. ед.	$MSE_{после}$, усл. ед.
Разработанный ФВЧ (однаправл. реализация)	0,105	14,056	0,237	0,013
ФВЧ Баттерворта (однаправл. реализация)		13,562		0,022
Разработанный ФВЧ (двунаправл. реализация)		17,255		0,0063
ФВЧ Баттерворта (двунаправл. реализация)		16,839		0,0071
Разработанный каскад (однаправл. реализация)	0,327	16,076	1,128	0,389
Каскад Баттерворта (однаправл. реализация)		11,425		0,446
Разработанный каскад (двунаправл. реализация)		17,922		0,044
Каскад Баттерворта (двунаправл. реализация)		14,288		0,101

Вычисленные количественные оценки обработки показывают, что значения ошибки (MSE) на выходе фильтров на основе полиномов Ньютона (при однонаправленной и двунаправленной фильтрации) уменьшаются, при этом показатель отношения сигнал/помеха (SNR) повышается. Отметим, что из наименьшего значения MSE относительно к исходному значению данного показателя следует минимальность искажения параметров сигнала во время фильтрации, и это способствует повышению результативности обработки по точности и помехоустойчивости при выделении информативных составляющих из аддитивной смеси ЭКС и помехи. Высокие значения показателя SNR относительно его исходного значения демонстрирует помехоустойчивость методов, т.е. устойчивость фильтров к помеховым воздействиям при сравнении с фильтрами Баттерворта.

Ранее повышение результативности обработки ЭКС при реализации полиномиального цифрового фильтра Ньютона впервые было выявлено в работах [9, 11, 15] только при обработке натуральных (экспериментальных) записей сигнала 12-канального Холтер-монитора, что также не противоречит расчетно-теоретическому результату, полученному в рассматриваемой статье.

Необходимо подчеркнуть, что на повышение результативности обработки ЭКС в значительной степени оказывают влияние наделяемые свойства фильтров Ньютона, а именно его прямые и косвенные показатели качества, к которым, как правило, относятся [23]: время переходного процесса, переуправление и корневые локусы и далее. Так, фильтры с полиномами Ньютона в отличие от фильтров Баттерворта менее наделяют переуправление в переходных характеристиках системы фильтрации ЭКС за счет наличия корневых локусов на мнимой оси комплексной плоскости.

Научная новизна рассматриваемой работы заключается в том, что при реализации цифрового фильтра аппроксимирующим полиномом Ньютона впервые выявлено повышение избирательности системы обработки ЭКС по точности и помехоустойчивости. Ранее исследование для обоснования выбора и разработки системы обработки ЭКС на основе данной полиномиальной модели не рассматривалось.

Заключение

Разработаны новые методы фильтрации ЭКС при наличии помех. Методы фильтрации основаны на аппроксимации характеристик фильтров при помощи полиномов Ньютона. Представлены результаты расчета передаточной функции ФВЧ и каскада РЖФ для однонаправленной и двунаправленной фильтрации ЭКС. Результаты фильтрации подтверждает сходство отфильтрованной формы сигнала с исходной формой. Это достигается за счет использования двунаправленной обработки для компенсации фазовых сдвигов и минимизации низкоамплитудных затухающих колебаний, вносимых фильтрами. Результаты количественных оценок показали минимизацию ошибки фильтрации для фильтра верхних частот 0,0063 усл. ед. и режекторного фильтра 0,044 усл. ед., а также максимизацию отношения сигнал/помеха для фильтра верхних частот 17 дБ и режекторного фильтра 18 дБ соответственно, что способствует повышению результативности обработки сигнала ЭКС.

Список литературы

1. Bui N. T. Real-Time Filtering and ECG Signal Processing Based on Dual-Core Digital Signal Controller System // *IEEE Sensors Journal*. 2020. Vol. 12. P. 6492–6503.
2. Malghan P. G., Hota M. K. A review on ECG filtering techniques for rhythm analysis // *Research on Biomedical Engineering*. 2020. Vol. 2. P. 171–182.
3. Ozkan H. A Portable Wearable Tele-ECG Monitoring System // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. Vol. 1. P. 173–182.
4. Li J., Deng G., Wei W., Wang H. Design of a real-time ECG filter for portable mobile medical systems // *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 696–704.
5. Rangayyan R. M. *Biomedical signal analysis*. John Wiley & Sons, 2015. 707 p.
6. Немирко А. П., Манило Л. А., Калиниченко А. Н. Математический анализ биомедицинских сигналов и данных. М. : Физматлит, 2017. 242 с.
7. Fedotov A. A. Selection of Parameters of Bandpass Filtering of the ECG Signal for Heart Rhythm Monitoring Systems // *Biomedical Engineering*. 2016. Vol. 2. P. 114–118.
8. Altay Y. A., Kremlev A. S., Zimenko K. A. A new ECG signal processing method based on wide-band notch filter // *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. 2020. P. 1464–1469.
9. Altay Y. A., Kremlev A. S. Polynomial filtering of low- and high- frequency noise for improving the accuracy of ECG signal processing: new data // *Cardiometry*. 2020. Vol. 16. P. 85–96.
10. Altay Y. A., Kremlev A. S. Analysis and systematization of noise arising by long-term recording of ECG signal // *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. 2018. P. 1053–1057.
11. Алтай Е. А., Кремлев А. С. Оценка точности обработки электрокардиосигнала методом каскадной широкополосной режекторной фильтрации // *Вестник Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление*. 2020. № 2. P. 18–28.
12. Лямин А. В., Разыграева В. А., Скушидлевский А. А. Модель формирования обучающего воздействия на основе анализа функционального состояния студента // *Открытое и дистанционное образование*. 2011. № 2. С. 12–18.
13. Lisitsyna L., Lyamin A., Skshidlevsky A. Estimation of Student Functional State in Learning Management System by Heart Rate Variability Method // *Smart digital futures*. 2014. Vol. 262. P. 726–731.
14. Berdnikova E. A., Lyamin A. V., Skshidlevsky A. A. Analysis of Heart Rate Monitors for Evaluating Student's Mental Working Capacity // *Lecture Notes in Computer Science*. 2016. Vol. 9584. P. 13–22.
15. Алтай Е. А., Кремлев А. С. Оценка взаимосвязи низкочастотных помех при многоканальной регистрации электрокардиосигнала // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2020. № 7. С. 626–633.
16. Быстров С. В., Вундер Н. А., Ушаков А. В. Решение проблемы сигнальной неопределенности при аналитическом конструировании последовательного компенсатора в задаче управления пьезоприводом // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016. № 3. С. 451–459.
17. Калиниченко А. Н., Юрьева О. Д. Влияние частоты дискретизации ЭКГ на точность вычисления спектральных параметров variability сердечного ритма // *Информационно-управляющие системы*. 2008. № 2. С. 46–49.
18. Kwon O., Jeong J. Electrocardiogram Sampling Frequency Range Acceptable for Heart Rate Variability Analysis // *Healthcare informatics research*. 2018. Vol. 3. P. 198–206.
19. Paarman L. D. *Design and analysis of analog filters: a signal processing perspective*. New York : Kluwer academic publishers, 2003. P. 625.
20. Лайонс Р. *Цифровая обработка сигналов*. М. : Бином, 2006. 655 с.

21. Алтай Е. А., Кремлев А. С., Зименко К. А., Маргун А. А. Влияние параметров фильтра на точность измерения электрокардиографического сигнала // Медицинская техника. 2019. № 3. С. 19–22.
22. Ellis G. Filters in control systems // Control system design guide. 2012. Vol. 9. P. 165–183.
23. Altay Y. A., Lyamin A. V., Skakov D. M., Kelemseit N. E. Cascade Notch Filter with a Unity Feedback and Improved Transient Response // V IEEE International Conference on Control in Technical Systems (CTS). 2023. P. 217–220.

References

1. Bui N.T. Real-Time Filtering and ECG Signal Processing Based on Dual-Core Digital Signal Controller System. *IEEE Sensors Journal*. 2020;12:6492–6503.
2. Malghan P.G., Hota M.K. A review on ECG filtering techniques for rhythm analysis. *Research on Biomedical Engineering*. 2020;2:171–182.
3. Ozkan H.A. Portable Wearable Tele-ECG Monitoring System. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019;1:173–182.
4. Li J., Deng G., Wei W., Wang H. Design of a real-time ECG filter for portable mobile medical systems. *IEEE Access*. 2017;5:696–704.
5. Rangayyan R.M. *Biomedical signal analysis*. John Wiley & Sons, 2015:707.
6. Nemirko A.P., Manilo L.A., Kalinichenko A.N. *Matematicheskiy analiz biomeditsinskikh signalov i dannykh = Mathematical analysis of biomedical signals and data*. Moscow: Fizmatlit, 2017:242. (In Russ.)
7. Fedotov A.A. Selection of Parameters of Bandpass Filtering of the ECG Signal for Heart Rhythm Monitoring Systems. *Biomedical Engineering*. 2016;2:114–118.
8. Altay Y.A., Kremlev A.S., Zimenko K.A. A new ECG signal processing method based on wide-band notch filter. *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. 2020:1464–1469.
9. Altay Y.A., Kremlev A.S. Polynomial filtering of low- and high- frequency noise for improving the accuracy of ECG signal processing: new data. *Cardiometry*. 2020;16:85–96.
10. Altay Y.A., Kremlev A.S. Analysis and systematization of noise arising by long-term recording of ECG signal. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. 2018:1053–1057.
11. Altay E.A., Kremlev A.S. Evaluation of the accuracy of electrocardiosignal processing by cascade broadband notch filtration method. *Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Ser.: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie = Bulletin of the Russian New University. Ser.: Complex systems: models, analysis and management*. 2020;(2):18–28. (In Russ.)
12. Lyamin A.V., Razygraeva V.A., Skshidlevskiy A.A. A model for the formation of educational impact based on the analysis of the student's functional state. *Otkrytoe i distantsionnoe obrazovanie = Open and distance education*. 2011;(2):12–18. (In Russ.)
13. Lisitsyna L., Lyamin A., Skshidlevskiy A. Estimation of Student Functional State in Learning Management System by Heart Rate Variability Method. *Smart digital futures*. 2014;262:726–731.
14. Berdnikova E.A., Lyamin A.V., Skshidlevskiy A.A. Analysis of Heart Rate Monitors for Evaluating Student's Mental Working Capacity. *Lecture Notes in Computer Science*. 2016;9584:13–22.
15. Altay E.A., Kremlev A.S. Evaluation of the relationship of low-frequency interference in multichannel recording of an electrocardiosignal. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie = News of higher educational institutions. Instrumentation*. 2020;(7):626–633. (In Russ.)
16. Bystrov S.V., Vunder N.A., Ushakov A.V. Solving the problem of signal uncertainty in the analytical design of a sequential compensator in the piezo drive control problem. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2016;(3):451–459. (In Russ.)
17. Kalinichenko A.N., Yur'eva O.D. The influence of the ECG sampling rate on the accuracy of calculating the spectral parameters of heart rate variability. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and control systems*. 2008;(2):46–49. (In Russ.)
18. Kwon O., Jeong J. Electrocardiogram Sampling Frequency Range Acceptable for Heart Rate Variability Analysis. *Healthcare informatics research*. 2018;3:198–206.
19. Paarman L.D. *Design and analysis of analog filters: a signal processing perspective*. New York: Kluwer academic publishers, 2003:625.
20. Layons R. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital signal processing*. Moscow: Binom, 2006:655. (In Russ.)
21. Altay E.A., Kremlev A.S., Zimenko K.A., Margun A.A. Influence of filter parameters on the accuracy of electrocardiographic signal measurement. *Meditsinskaya tekhnika = Medical equipment*. 2019;(3):19–22. (In Russ.)
22. Ellis G. Filters in control systems. *Control system design guide*. 2012;9:165–183.
23. Altay Y.A., Lyamin A.V., Skakov D.M., Kelemseit N.E. Cascade Notch Filter with a Unity Feedback and Improved Transient Response. *V IEEE International Conference on Control in Technical Systems (CTS)*. 2023:217–220.

*Информация об авторах / Information about the authors***Ельдос Алтайұлы Алтай**

доктор Ph.D., кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры робототехники
и технических средств автоматизации,
Институт автоматизации
и информационных технологий,
Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К. И. Сатпаева
(Республика Казахстан, г. Алматы,
ул. Сатпаева, 22а)
E-mail: aeldos@inbox.ru

Yeldos A. Altay

Doctor Ph.D., candidate of technical science,
senior lecturer of the sub-department
of robotics and automation equipment,
Institute of Automation
and Information Technologies,
K.I. Satbayev Kazakh National
Research Technical University
(22a Satbaev street, Almaty, Republic of Kazakhstan)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 22.12.2023

Поступила после рецензирования / Revised 19.01.2024

Принята к публикации / Accepted 15.02.2024