

4. Bezopasnost' Rossii. Pravovye, sotsial'no-ekonomicheskie i nauchno-tehnicheskie aspekty. Zashchita naseleniya i territorij ot chrezvychajnykh situatsij prirodnogo i tekhnogenogo kharaktera / S.K. Shojgu i dr. M.: Znanie, 1999. 162 s.
5. Geodinamicheskie riski i stroitel'stvo. Matematicheskie modeli / V.A. Minaev i dr. M.: Akademiya GPS MChS Rossii, 2017. 208 s.
6. Demidovich B.P., Modenov V.P. Differentsial'nye uravneniya. SPb.: Lan', 2006. 288 s.
7. Kamke E. Spravochnik po obyknovennym differentsial'nym uravneniyam. M.: Nauka: Gl. red. fiz.-mat. lit., 1971. 576 s.
8. Minaev V.A., Faddeev A.O. Bezopasnost' i otdykh: sistemnyj vzglyad na problemu riskov // Turizm i rekreatsiya: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: trudy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii (Moskva, 20 aprelya 2007 g.). M.: MGU im. M.V. Lomonosova, 2008. S. 329–334.
9. Minaev V.A., Faddeev A.O. Metodika otsenki geoeologicheskogo riska i geoeologicheskoy bezopasnosti landshaftno-territorial'nykh kompleksov // Sistemy bezopasnosti – 2008: materialy semnadsatoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii (Moskva, 30 oktyabrya 2008 g.). M.: Akademiya GPS MChS Rossii, 2008. S. 96–102.
10. Minaev V.A., Faddeev A.O. Otsenki geoeologicheskikh riskov. Modelirovanie bezopasnosti turistsko-rekreatsionnykh territorij. M.: Finansy i statistika: INFRA-M, 2009. 370 s.
11. Minaev V.A., Faddeev A.O., Kuz'menko N.A. Modelirovanie i otsenka geodinamicheskikh riskov. M.: RTSof – Kosmoskop, 2017. 256 s.
12. Modeli i mekhanizmy upravleniya bezopasnost'yu / V.N. Burkov i dr. M.: SINTEG, 2001. 160 s.
13. Modelirovanie geodinamicheskikh riskov v chrezvychajnykh situatsiyakh: monografiya / A.V. Abramova i dr.; pod red. K.M. Bondarya, V.A. Minaeva, A.O. Faddeeva. Khabarovsk: DVYuI MVD Rossii, 2014. 124 s.
14. Shojgu S.K., Vorob'ev Yu.L., Vladimirov V.A. Katastrofy i gosudarstvo. M.: Energoatomizdat, 1997. 160 s.

DOI: 10.25586/RNU.V9187.20.02.P.018

УДК 007+621.391.82

Е.А. Алтай, А.С. Кремлев

---

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА МЕТОДОМ КАСКАДНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ РЕЖЕКТОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ\*

---

Представлены результаты обработки записи электрокардиосигналов на основе метода каскадной широкополосной режекторной фильтрации. В качестве аппроксимирующего полинома широкополосного режекторного фильтра предложено использовать полиномы Ньютона. Для устранения низкоамплитудных затухающих колебаний, вырабатываемых режекторными фильтрами, представлены результаты двунаправленной реализации каскада режекторных фильтров Ньютона. Продемонстрирована работоспособность двунаправленной реализации каскада режекторных фильтров и на основе анализа количественных показателей оценена точность фильтрации ЭКС.

*Ключевые слова:* фильтрация, электрокардиосигнал, режекторный фильтр, широкополосная электрическая помеха, каскадный фильтр, полином Ньютона, двунаправленная фильтрация.

---

\* Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации (грант 08-08).

Y.A. Altay, A.S. Kremlev

ESTIMATION OF ACCURACY ECG SIGNAL PROCESSING  
BY CASCADE WIDE-BAND NOTCH FILTERING METHOD

This paper presents ECG signal processing results by cascade the wide-band notch filtering method. It is proposed to use Newton polynomials as an approximating polynomial of a wide-band notch filter. To eliminate the low-amplitude damped oscillations generated by the notch filters, the results for forward-backward implementation cascade of Newton notch filters is presented. The forward-backward implementation cascade notch filters are demonstrated and based on the analysis of quantitative indicators the accuracy of ECG signal filtering is estimated.

*Keywords:* filtering, ECG signal, notch filter, wide-band electrical noise, cascade filter, Newton polynomial, forward-backward filtering.

*Введение*

На сегодняшний день при решении задач обработки электрокардиографической информации широкое распространение получили алгоритмы фильтрации, основанные на методах полиномиальной фильтрации электрокардиосигналов (ЭКС). Актуальность применения полиномиальных методов фильтрации заключается в том, что они во многом позволяют настраивать свои параметры к параметрам обрабатываемых ЭКС для выделения информативных составляющих сигнала из аддитивной смеси высокочастотной электрической помехи.

Электрическая помеха относится к основным факторам, снижающим точность обработки ЭКС [1; 8; 9; 12; 16; 17; 18]. В практических условиях точность обработки ЭКС снижается тогда, когда электрическая помеха имеет широкополосный диапазон [11]. Существующие алгоритмы обработки предназначены только для фильтрации узкополосной электрической помехи с помощью узкополосного режекторного фильтра [1; 8; 12; 16; 17; 18]. Анализ указанных работ позволяет отметить, что синтез узкополосных режекторных фильтров для обработки ЭКС часто осуществляется с помощью полиномов Баттерворта и, реже, полиномов Чебышева и Бесселя. Это можно связать с двумя особенностями. Во-первых, фильтры Баттерворта в отличие от фильтров Чебышева и Бесселя лишены эффектов пульсации в полосах пропускания сигнала и задержки помех. Во-вторых, происходит выработка наименьших значений собственных ошибок фильтров исходя из параметров и характеристик, влияющих на точность получаемых результатов обработки ЭКС. Благодаря этим двум особенностям режекторные фильтры на основе полинома Баттерворта широко применимы.

Вместе с тем, несмотря на развитие существующих методов обработки ЭКС, предназначенных для устранения электрических помех на основе узкополосных полиномиальных режекторных фильтров [Там же], в настоящее время наблюдается постоянный рост уровня помех из-за увеличения энергопотребления во всей сфере деятельности, что может привести к ухудшению общего электромагнитного фона [3]. Помимо этого также наблюдается появление высокочастотной электрической помехи, наводимой при помощи внутренних узлов ноутбуков [5].

Все вышеизложенные приводит к снижению точности оценки параметров ЭКС при их обработке. Необходимо также отметить, что во время узкополосной режекторной

фильтрации широкополосной электрической помехи, из-за недостаточности частоты среза нижней и верхней границы фильтра степень ослабления помехи будет невысокой, а также точность получаемых результатов обработки при фильтрации будет незначительной.

В этой связи актуальным является разработка метода полиномиальной режекторной фильтрации, позволяющей повысить точность обработки ЭКС по отношению к электрическим помехам, изменяющимся в широком диапазоне частот.

В работе [11] для фильтрации широкополосных электрических помех на основе метода каскадной режекторной фильтрации разработан способ обработки ЭКС. Разработанный способ обработки основан на широкополосных режекторных фильтрах, аппроксимированных с помощью полиномов Ньютона. Для улучшения подавления помех широкополосным режекторным фильтром, характеризующегося низкой добротностью, использована схема каскадной фильтрации. Применение схемы каскадной фильтрации позволяет повысить точность обработки ЭКС на выходе каждой спроектированной последовательности режекторных фильтров. При синтезе режекторных фильтров настройка их параметров основывалась на результатах эмпирической оценки частоты широкополосных электрических помех зашумленной записи ЭКС с помощью дискретного преобразования Фурье. Использование схемы каскадной фильтрации позволило повысить точность оценки параметров ЭКС и ослабить помехи на выходе каждой спроектированной последовательности фильтров. Отличительная особенность разработанного способа обработки от существующих способов заключается в том, что для повышения эффективности обработки ЭКС предложено использовать каскад широкополосных режекторных фильтров, аппроксимированных с помощью полиномов Ньютона. На основе количественных показателей проанализирована эффективность применения.

Кроме того, были проведены исследования эффективности фильтрации узкополосных синусоидальных электрических помех. В результате было установлено, что спроектированный каскад режекторных фильтров позволяет устранить не только широкополосные электрические помехи, но и узкополосные помехи с центральной частотой 50 Гц. Важно отметить, что использование полинома Ньютона в аппроксимации каскадных режекторных фильтров позволило повысить точность обработки ЭКС, ослабить помехи и в наименьшей степени вырабатывать собственные ошибки.

Актуальность выбора полинома Ньютона для аппроксимации режекторных фильтров заключается в том, что в современной теории фильтрации ЭКС, в частности при обработке электрокардиографической информации, применение данного полинома является менее освященным. Полиномы Ньютона являются элементами теории автоматического управления, которые в настоящее время широко применимы для синтеза регуляторов и наблюдателей ввиду того, что демонстрируют результаты наилучшего качества при решении задач систем управления [2; 7]. Данные полиномы, как и полиномы Баттерворта, являются общепринятым видом размещения в круговой структуре корней передаточной функции и полиномами биномиального распределения [Там же].

Однако, несмотря на все вышесказанное, в настоящее время вопрос данной методики каскадного режекторного фильтра Ньютона является не полностью рассмотренным. В частности, из-за наличия в числителе передаточной функции режекторного фильтра параметра  $s^2 + \omega^2$  [13] режекторные фильтры при фильтрации в сигналы вносят собственные искажения в виде низкоамплитудных затухающих колебаний, характерных для дан-

ных фильтров [13; 18]. Такие искажения могут привести к снижению точности оценки параметров при обработке записи ЭКС.

Ответы на данные вопросы могут быть найдены при реализации алгоритма двунаправленной фильтрации. Алгоритмы двунаправленной фильтрации широко применимы в обработке записи сигналов для устранения вносимых нежелательных искажающих воздействий полиномиальными фильтрами [1; 8; 12; 18]. При использовании данного алгоритма ЭКС фильтруется одним и тем же каскадом сначала в прямом, а затем в обратном направлении. Данный алгоритм применим к реализации только тогда, когда весь набор отсчетов записи заранее известен. Это позволяет применять алгоритм двунаправленной фильтрации для обработки записи ЭКС.

Целью настоящей работы является оценка количественно характеризующих показателей качества обработки ЭКС, выработанных при реализации метода каскадной широкополосной режекторной фильтрации Ньютона в прямом и обратном направлении для повышения эффективности обработки записи.

*Материалы и методы*

Материалом для исследований служили зашумленные образцы одноканальной записи сигнала, полученного при помощи многофункциональной измерительной системы биоэлектрических сигналов «Мицар-ЭЭГ 202» фирмы MITSAR DIAGNOSTICS SOLUTIONS в Институте кардиологической техники (ИНКАРТ). Для повышения достоверности получаемых образцов и предотвращения ошибочной записи параметров ЭКС из-за высокого электрического сопротивления контактных токопроводящих веществ электродов использовался хлорсеребряный электрод с твердым контактным веществом, предназначенный для длительного мониторинга [10].

Синтез широкополосных режекторных фильтров осуществлялся в нормированном диапазоне с помощью передаточных функций непрерывных фильтров-аналогов. Параметры фильтров настроены для идентифицированной частоты широкополосной помехи [11], а именно в диапазоне 44...56 Гц и выбранной частоте дискретизации 250 Гц, и с учетом рекомендаций [3; 14] рассчитаны в следующем виде [15]:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{c1,2} &= \left( \frac{f_{c1,2}}{f_A} \right) 2\pi, \quad \Omega_{c1,2} = \left( \frac{2}{T} \right) \operatorname{tg} \left( \frac{\omega_{c1,2}}{2} \right) \\ \Omega_c &= \sqrt{\Omega_{c1} \Omega_{c2}} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $\omega_{c1,2}$ ,  $\Omega_{c1,2}$  – соответственно нижняя и верхняя граница частоты среза для расчета режекторного фильтра;  $\Omega_c$  – среднегеометрическая частота среза фильтра.

Для синтеза полиномиальных режекторных фильтров были выбраны полиномы Ньютона первого и второго порядка [7]. Такой выбор порядков полинома осуществлялся с учетом того факта, что трансформация параметров нормированного фильтра-аналога сопровождается удвоением порядка непрерывной передаточной функции режекторных фильтров [6]. Для каскадирования широкополосных режекторных фильтров использовались передаточные функции фильтров второго и четвертого порядка, полученные при использовании полиномов Ньютона первого и второго порядка соответственно. Расчет общей передаточной функции каскада режекторных фильтров осуществлялся произведением передаточных функций каждой последовательности фильтров.

Рассчитанные передаточные функции непрерывных широкополосных режекторных фильтров и их билинейное  $z$ -преобразование представлены в таблице 1 [11]. Преобразование непрерывной передаточной функции фильтра  $W(s)$  в дискретную  $W(z)$  осуществлялось путем билинейного преобразования в программной среде MATLAB. Преобразование было выполнено с помощью функции bilinear как  $s = \frac{2}{T} \left( \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right)$  при  $T = 1$  с.

Таблица 1

**Передаточные функции широкополосных режекторных фильтров Ньютона**

Порядок фильтра	Передаточная функция фильтров в непрерывных $W(s)$ и дискретных $W(z)$ областях
$n = 2$	$W(s) = \frac{s^2 + 2,094}{s^2 + 0,463s + 2,094}$
	$W(z) = \frac{0,8681z^2 - 0,5427z + 0,8681}{z^2 - 0,5427z + 0,7362}$
$n = 4$	$W(s) = \frac{s^4 + 4,189s^2 + 4,388}{s^4 + 0,926s^3 + 4,404s^2 + 1,940s + 4,388}$
	$W(z) = \frac{0,7536z^4 - 0,9422z^3 + 1,802z^2 - 0,9422z + 0,7536}{z^4 - 1,085z^3 + 1,767z^2 - 0,799z + 0,542}$
$n = 6$	$W(s) = \frac{s^6 + 6,284s^4 + 13,166s^2 + 9,194}{s^6 + 1,389s^5 + 6,928s^4 + 5,919s^3 + 14,513s^2 + 6,096s + 9,194}$
	$W(z) = \frac{0,6542z^6 - 1,227z^5 + 2,73z^4 - 2,614z^3 + 2,73z^2 - 1,227z - 0,6542}{z^6 - 1,628z^5 + 3,092z^4 - 2,557z^3 + 2,277z^2 - 0,8825z + 0,399}$

Двунаправленная реализация каскада режекторных фильтров Ньютона было выполнено с помощью команды filtfilt в программной среде MATLAB. В данной реализации ЭКС проходит через каждый каскад режекторных фильтров в прямом направлении, затем повторно пропускается через этот же каскад, но в обратной последовательности отсчетов ЭКС. При этом порядок фильтров удваивается [8]. Команда filtfilt в программе MATLAB реализует обработку согласно рисунку 1 [6]. Инверсия времени представляет простое изменение последовательности отсчетов в обратное [6].

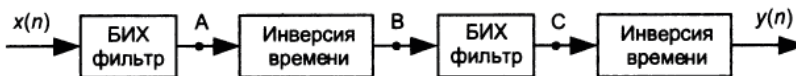


Рис. 1. Схема двунаправленной фильтрации [6]

С учетом представленной схемы двунаправленной фильтрации [6] для реализации двунаправленного каскада режекторных фильтров Ньютона на рисунке 2 представлена схема обработки записи ЭКС.

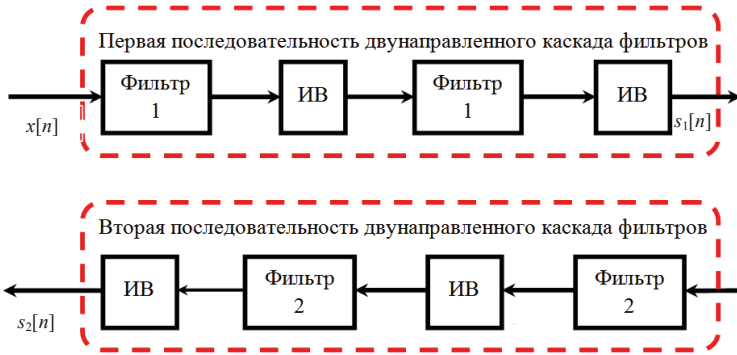


Рис. 2. Схема реализации двунаправленного каскада режекторных фильтров Ньютона

При двунаправленной реализации каскадных режекторных фильтров зашумленный ЭКС  $x[n]$  обрабатывается фильтрами первой последовательности  $s_1[n]$ , а затем подается на вход второй последовательности фильтров для выделения параметров ЭКС  $s_2[n]$ . Важно отметить, в блоках «Фильтр 1» обозначен режекторный фильтр второго порядка, а в блоках «Фильтр 2» – режекторный фильтр четвертого порядка. При этом на выходе каждой последовательности двунаправленного режекторного фильтра порядок фильтра удваивается.

Оценка эффективности применения каскада режекторных фильтров на основе полиномов Ньютона и при их двунаправленной реализации анализируется на основе количественных показателей. Для этой оценки вычисляются значения экспериментального среднеквадратического отклонения (СКО) отсчетов сигнала после фильтрации (2), а также коэффициент ослабления помехи (КОП) согласно (3) [6]:

$$СКО = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (n_i - \mu)^2}, \quad \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i; \tag{2}$$

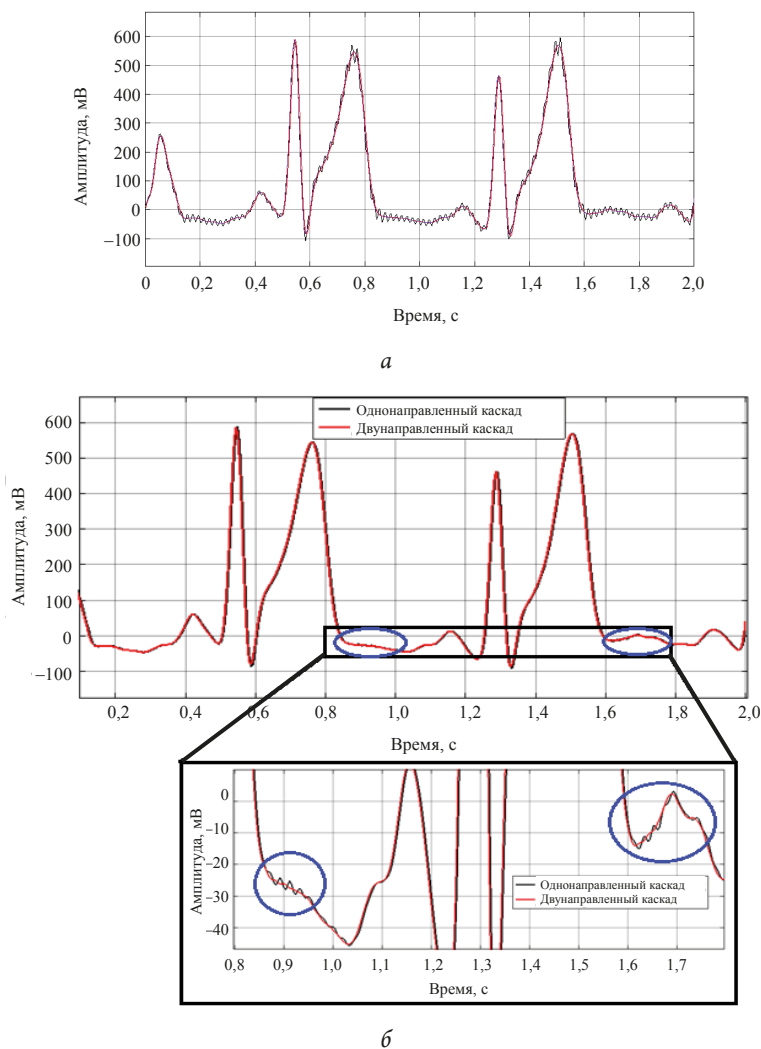
$$КОП = 20 \log_{10} \left( \frac{A_{\text{ВЫХОД}}}{A_{\text{ВХОД}}} \right), \tag{3}$$

где  $N$  – количество отсчетов;  $n_i$  – отсчеты;  $\mu$  – среднее значение отсчетов;  $A_{\text{ВЫХОД}}$  и  $A_{\text{ВХОД}}$  – среднеквадратическое значение амплитуды выходного (отфильтрованного) и входного (зашумленного) отсчетов сигнала.

### Результаты

На основе описанной выше методики в качестве примера представлен результат исходного ЭКС, содержащий широкополосную электрическую помеху, а также результат его обработки с помощью каскадного широкополосного режекторного фильтра на основе полинома Ньютона. На рисунке 3 проиллюстрированы результаты фильтрации зашумленной записи ЭКС каскадным режекторным фильтром Ньютона (рис. 3-а) и результаты однонаправленной (обычная реализация) и двунаправленной реализации метода каскадной режекторной фильтрации ЭКС (рис. 3-б). Для лучшей визуализации результатов

однонаправленной и двунаправленной реализации фильтров масштаб обработанной записи ЭКС был увеличен в отрезке времени от 0,8 до 1,75 секунд (см. рис. 3-б) из отфильтрованного участка сигнала (см. рис. 3-а).



**Рис. 3.** Эпюра обработки записи ЭКС:

*а – зашумленная и отфильтрованная запись ЭКС; б – однонаправленная и двунаправленная реализация каскада широкополосных режекторных фильтров Ньютона*

Вычислены количественные показатели с использованием рассчитанных передаточных функций широкополосных режекторных фильтров из таблицы 1 [11] для однонаправленной реализации, а именно в обычной последовательности фильтров без каскада ( $n = 2$ ,  $n = 4$ ), каскадной форме ( $n = 2$  и  $n = 4$ ) и с общей передаточной функцией каскадного фильтра ( $n = 6$ ). Аналогично представлены результаты для двунаправленной фильтрации (табл. 2).

Таблица 2

## Оценка показателей точности фильтрации

№ п/п	Способ реализации режекторного фильтра Ньютона	Показатели	
		СКО, мВ	КОП, дБ
<i>Однонаправленная реализация каскада режекторных фильтров (РФ)</i>			
1	Выход первого РФ, $n = 2$	178,814	-0,0269
2	Выход второго РФ, $n = 4$ без $n = 2$	178,719	-0,0304
3	Каскад $n = 2$ и $n = 4$	178,633	-0,0336
4	С общей передаточной функцией каскада $n = 6$	178,635	-0,0335
<i>Двунаправленная реализация каскада режекторных фильтров (РФ)</i>			
1	Выход первого РФ, $n = 2$	178,719	-0,0295
2	Выход второго РФ, $n = 4$ без $n = 2$	178,548	-0,0367
3	Каскад $n = 2$ и $n = 4$	178,380	-0,0430
4	С общей передаточной функцией каскада $n = 6$	178,386	-0,0422

Анализ полученных результатов позволяет выдвинуть утверждения о том, что каскад широкополосных режекторных фильтров, аппроксимированный полиномом Ньютона и настроенный на частоту режекции электрической помехи от 44 до 56 Гц для центральной частоты помехи 50 Гц, позволяет отфильтровать помехи при минимальных искажениях параметров ЭКС. Реализация алгоритма двунаправленной фильтрации для полиномиального каскада позволяет сгладить низкоамплитудные затухающие колебания, вносимые режекторными фильтрами. Также анализ количественных результатов показал, что алгоритм двунаправленной фильтрации, сглаживая низкоамплитудные затухающие колебания, приводит к уменьшению значений показателя экспериментального СКО, а также улучшает коэффициент ослабления помехи при сравнении с обычной (однонаправленной) реализацией каскада режекторных фильтров. Отметим, что низкое значение показателя экспериментального СКО демонстрирует уменьшения низкочастотных колебаний, приводящих к искажению участков ЭКС. Отрицательное значение коэффициента ослабления помехи обусловлено наименьшим значением амплитуды отфильтрованного ЭКС по отношению к входному (зашумленному) сигналу. Чем меньше значение данного показателя, тем лучше каскад режекторных фильтров ослабляет широкополосные электрические помехи.

Таким образом, учитывая полученные результаты, можно отметить, что двунаправленная реализация каскада широкополосных режекторных фильтров открывает новые возможности при обработке записи электрокардиосигналов.

## Заключение

В данной статье изучены особенности обработки записи ЭКС при двунаправленной реализации метода каскадной широкополосной режекторной фильтрации электрической помехи. Показано, что двунаправленная реализация каскада широкополосных режекторных фильтров Ньютона в значительной степени повышают точность обработки ЭКС, за счет устранения влияние низкоамплитудных затухающих колебаний, вносимых каскадом



фильтров. Реализация фильтра позволила при минимальных искажениях отфильтровать информативные составляющие сигнала из зашумленной записи для оценки параметров ЭКС.

### Литература

1. Авдеева Д.К., Казаков В.Ю., Наталинова Н.М., Иванов М.Л. Результаты моделирования воздействия фильтра высокой частоты и фильтра низкой частоты на качество регистрации микропотенциалов на электрокардиограмме // *Науковедение*. 2013. Т. 19, № 6. С. 1–15.
2. 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. Т. 16, № 3. С. 451–459.
3. Жесткова Ю.Е. Повышение помехоустойчивости измерительных преобразователей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2005. 24 с.
4. Калиниченко А.Н., Юрьева О.Д. Влияние частоты дискретизации ЭКГ на точность вычисления спектральных параметров variability сердечного ритма // *Информационно-управляющие системы*. 2008. Т. 33, № 2. С. 46–49.
5. Караник А.А., Гавриелок Ю.В. Компьютер как источник помех // *Актуальные проблемы энергетики: материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов*. Минск, 2017. С. 37–38.
6. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / пер. с англ.; под ред. А.А. Бритова. М.: Бинном, 2006. 655 с.
7. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. СПб.: Питер, 2005. 337 с.
8. Рангайян Р.М. Анализ биомедицинских сигналов / пер. с англ. А.Н. Калиниченко; под ред. А.П. Немирко. М.: Физматлит, 2010. 440 с.
9. Altay Y.A., Kremlev A.S. Analysis and Systematization of Noise Arising by Long-Term Recording of ECG Signal // *Proceedings of EICoN Rus Intern. Conf. St. Petersburg*, 2018. P. 1053–1057.
10. Altay Y.A., Kremlev A.S., Nuralinov O.M., Vlasov S.M., Penskoi A.V., Zimenko K.A., Margun A.A. Comparative Analysis of Characteristics of Electrodes to Estimate Accuracy in Recording Long-term ECG Signal Parameters // *Cardiometry*. 2019. Vol. 15. P. 63–72.
11. Altay Y.A., Kremlev A.S., Zimenko K.A. A New ECG Signal Processing Method Based on Wide-band Notch Filter // *Proceedings of EICoN Rus Intern. Conf. St. Petersburg*, 2020. P. 1464–1469.
12. Avdeeva D.K., Kazakov V.Y., Natalinova N.M., Ivanov M.L., Yuzhakova M.A., Turushev N.V. The Simulation Results of the High-pass and Low-Pass Filter Effect on the Quality of Micropotential Recordings on the Electrocardiogram // *Biology and Medicine*. 2014. Vol. 6, № 1. P. 1–10.
13. Ellis G. Filters in Control Systems // *Control System Design Guide*. 2012. Vol. 9. P. 165–183.
14. Kwon O., Jeong J. Electrocardiogram Sampling Frequency Range Acceptable for Heart Rate Variability Analysis // *Healthcare informatics research*. 2018. Vol. 24, № 3. P. 198–206.
15. Paarmann L.D. Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective. N. Y.: Kluwer Academic Publishers, 2003.
16. Suchetha M., Kumaravel N. Empirical Mode Decomposition Based Filtering Techniques for Power Line Interference Reduction in Electrocardiogram Using Various Adaptive Structures

and Subtraction Methods // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2013. Vol. 8, № 6. P. 575–585.

17. *Tompkins W.J.* *Biomedical Digital Signal Processing*. New Jersey: Upper Saddle River, 2000.

18. *Zaitsev E.V.* Elimination on Power Line Interference from ECG Signal Using Combined Bidirectional Narrow-band Notch Filter // *Biophysics*. 2015. Vol. 60, № 4. P. 656–658.

### Literatura

1. *Avdeeva D.K., Kazakov V.Yu., Natalinova N.M., Ivanov M.L.* Rezul'taty modelirovaniya vozdeystviya fil'tra vysokoy chastoty i fil'tra nizkoj chastoty na kachestvo registratsii mikro-potentsialov na elektrokardiogramme // *Naukovedenie*. 2013. T. 19, № 6. S. 1–15.

2. *Bystrov S.V., Vunder N.A., Ushakov A.V.* Reshenie problemy signal'noj neopredelennosti pri analiticheskom konstruirovanii posledovatel'nogo kompensatora v zadache upravleniya p'ezo-privodom // *Nauchno-tehnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki*. 2016. T. 16, № 3. S. 451–459.

3. *Zhestkova Yu.E.* Povyshenie pomekhoustojchivosti izmeritel'nykh preobrazovatelej: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Penza, 2005. 24 s.

4. *Kalinichenko A.N., Yur'eva O.D.* Vliyaniye chastoty diskretizatsii EKG na tochnost' vychisleniya spektral'nykh parametrov variabel'nosti serdechnogo ritma // *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2008. T. 33, № 2. S. 46–49.

5. *Karanik A.A., Gavrielok Yu.V.* Komp'yuter kak istochnik pomekh // *Aktual'nye problemy energetiki: materialy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov*. Minsk, 2017. S. 37–38.

6. *Lajons R.* Tsifrovaya obrabotka signalov / per. s angl.; pod red. A.A. Britova. M.: Binom, 2006. 655 s.

7. *Miroshnik I.V.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Linejnye sistemy. SPb.: Piter, 2005. 337 s.

8. *Rangajyan P.M.* Analiz biomeditsinskikh signalov / per. s angl. A.N. Kalinichenko; pod red. A.P. Nemirko. M.: Fizmatlit, 2010. 440 s.

9. *Altay Y.A., Kremlev A.S.* Analysis and Systematization of Noise Arising by Long-Term Recording of ECG Signal // *Proceedings of EICoN Rus Intern. Conf.* St. Petersburg, 2018. P. 1053–1057.

10. *Altay Y.A., Kremlev A.S., Nuralinov O.M., Vlasov S.M., Penskoj A.V., Zimenko K.A., Margun A.A.* Comparative Analysis of Characteristics of Electrodes to Estimate Accuracy in Recording Long-term ECG Signal Parameters // *Cardiometry*. 2019. Vol. 15. P. 63–72.

11. *Altay Y.A., Kremlev A.S., Zimenko K.A.* A New ECG Signal Processing Method Based on Wide-band Notch Filter // *Proceedings of EICoN Rus Intern. Conf.* St. Petersburg, 2020. P. 1464–1469.

12. *Avdeeva D.K., Kazakov V.Y., Natalinova N.M., Ivanov M.L., Yuzhakova M.A., Turushev N.V.* The Simulation Results of the High-pass and Low-Pass Filter Effect on the Quality of Micro-potential Recordings on the Electrocardiogram // *Biology and Medicine*. 2014. Vol. 6, № 1. P. 1–10.

13. *Ellis G.* Filters in Control Systems // *Control System Design Guide*. 2012. Vol. 9. P. 165–183.

14. *Kwon O., Jeong J.* Electrocardiogram Sampling Frequency Range Acceptable for Heart Rate Variability Analysis // *Healthcare informatics research*. 2018. Vol. 24, № 3. P. 198–206.

15. *Paarman L.D.* Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective. N. Y.: Kluwer Academic Publishers, 2003.

16. *Suchetha M., Kumaravel N.* Empirical Mode Decomposition Based Filtering Techniques for Power Line Interference Reduction in Electrocardiogram Using Various Adaptive Structures and Subtraction Methods // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2013. Vol. 8, № 6. P. 575–585.

17. *Tompkins W.J.* *Biomedical Digital Signal Processing*. New Jersey: Upper Saddle River, 2000.

18. *Zaitsev E.V.* Elimination on Power Line Interference from ECG Signal Using Combined Bidirectional Narrow-band Notch Filter // *Biophysics*. 2015. Vol. 60, № 4. P. 656–658.

DOI: 10.25586/RNU.V9I187.20.02.P.028

УДК 004.23

И.В. Захаров, П.В. Корчагин

---

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ КОНФИГУРИРОВАНИЕ  
БОРТОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО  
АППАРАТА НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЕЕ ДЕГРАДАЦИИ

---

Решение вопросов оперативного автономного управления бортовыми вычислительными системами космических аппаратов требует рационального выбора их конфигураций в целях достижения максимального полезного эффекта целевой системы. Разработанный подход отличается функционально-параметрической реконfigurацией бортовых вычислительных систем космических аппаратов посредством оперативного управления составом выполняемых задач и параметрами функционирования элементов структуры на основе прогнозирования их состояния с учетом анализа ресурса и условий функционирования. Он может быть использован при разработке алгоритмов оперативной автономной реконfigurации бортовых вычислительных систем перспективных специализированных космических аппаратов, функционирующих в условиях влияния неблагоприятных факторов различного происхождения.

*Ключевые слова:* бортовая вычислительная система, реконfigurируемая система, конфигурация, деградация, прогнозирование.

I.V. Zakharov, P.V. Korchagin

---

FUNCTIONAL-PARAMETRIC CONFIGURATION  
OF THE ONBOARD COMPUTER SYSTEM OF THE SPACECRAFT  
BASED ON THE PREDICTION OF ITS DEGRADATION

---

The decision of questions of operational autonomous control onboard computer systems of spacecrafts by means of a flexible control modes of components and dispatching computational process requires a rational choice of their configuration in order to achieve the maximum beneficial effect from the target system. Developed approach is functional-parametric reconfiguration onboard computer systems of spacecrafts through the operational management structure of the tasks and operational parameters of the elements of the structure-based prediction of its state, including analysis of the system resource and the conditions of its functioning. It can be used in the development of algorithms for operational autonomous reconfiguration of the onboard computer systems of promising specialized spacecrafts operating under the influence of adverse factors of different origin.

*Keywords:* on-board computer system, reconfigurable system, configuration, degradation, forecasting.