

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОДЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЕ,  
НА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКИЙ СИГНАЛ  
(THE INVESTIGATION OF PHYSICAL MODELS FILTERS APPLIED TO THE ELEC-  
TROCARDIOGRAPHIC EQUIPMENT ON A THE ELECTROCARDIOGRAPH SIGNAL)**

Ч.Э. Бадеев, М.Л. Иванов  
С.Н. Badeev, M.L. Ivanov

Научный руководитель: Д.К. Авдеева, профессор, д.т.н.  
Scientific supervisor: D.K. Avdeeva, professor, doctor of technical sciences

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
E-mail: Lydoz@mail.ru

В настоящее время практически любой регистратор биопотенциалов оснащен даже не одним, а целой системой фильтров. В статье приведены модели физических фильтров, разработанные в программных пакетах Matlab. Построены амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики фильтров. Показано влияние фильтров Баттерворта и Чебышева на электрокардиографический сигнал. Установлено, что фильтры, независимо от типа искажают форму биопотенциалов, их амплитуду и положение на оси времени.

(Currently almost any registrar biopotentials equipped even with not one, but a whole system of filters. The models of physical filters modeled in software packages Matlab. Built amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the filters. Shows the effect of Butterworth and Chebyshev filters on the electrocardiographic signal. It has been established that the filters regardless of the type distort the biopotential of the amplitude and the position on the time axis.)

**Ключевые слова:**

Фильтр, амплитудно-частотная характеристика, частота среза, передаточная функция, коэффициенты фильтра.

(Filter, frequency response function, cutoff frequency, transfer function, filter coefficients.)

**Фильтры для ЭКГ**

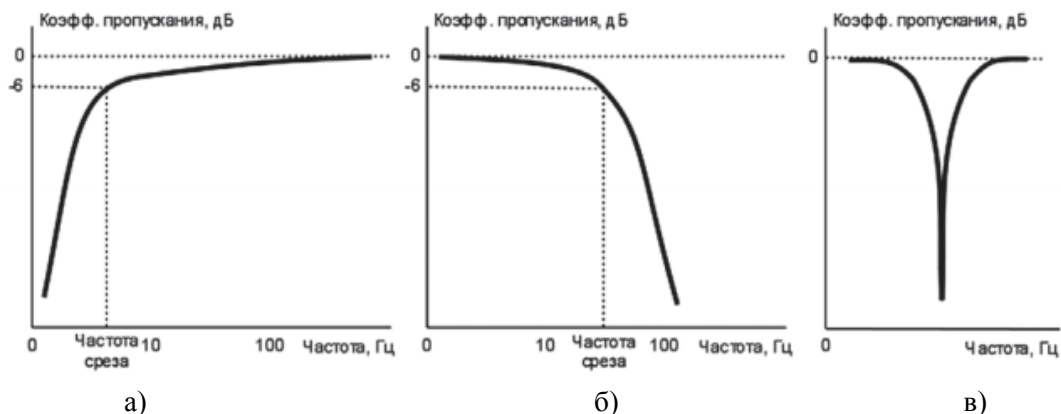
Фильтр - это частотно-избирательное устройство, которое пропускает сигналы определенных частот и задерживает или ослабляет сигналы других частот [1-4]. Фильтры могут быть классифицированы по ряду признаков:

1) по виду АЧХ они разделяются на: фильтры нижних частот (ФНЧ); фильтры верхних частот (ФВЧ); полосовые фильтры (ПФ); режекторные (заграждающие) фильтры (РЖ). В отдельную группу могут быть выделены фазовые фильтры (ФФ);

2) в зависимости от полиномов, используемых при аппроксимации передаточной функции, различают фильтры: критического затухания, Бесселя, Баттерворта, Чебышева;

3) по элементной базе фильтры разделяются на: пассивные и активные фильтры. Активные фильтры включают в схему RLC – фильтра активный элемент, в качестве которого часто используются операционные усилители.

Наиболее полно свойства фильтра отражает амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) - график, показывающий зависимость коэффициента пропускания фильтра от частоты сигнала. Коэффициент пропускания чаще всего выражается в децибелах (логарифм отношения амплитуд сигналов). Ослабление амплитуды сигналов в 2 раза соответствует – 6 дБ. На рисунке 1 приведены примеры АЧХ фильтров различных видов.



**Рис. 1.** Примеры АЧХ фильтров:

а) высоких частот, б) низких частот, в) полосно-заграждающий

### Моделирование фильтров в программных пакетах Matlab

Для моделирования фильтров в программе Matlab существует несколько команд и для получения передаточной функции нужного фильтра следует воспользоваться встроенными функциями с заданием определенных параметров. После того как была получена передаточная функция ФВЧ и ФНЧ собирается схема со звеньями, в которых указывается данная функция и производится импорт данных из файла. По этим данным восстанавливается структура сигнала, которая пройдет через фильтры и выведется на график. Для определения влияния фильтров на сигнал требуется сравнить отличия между входным и выходным сигналами[5].

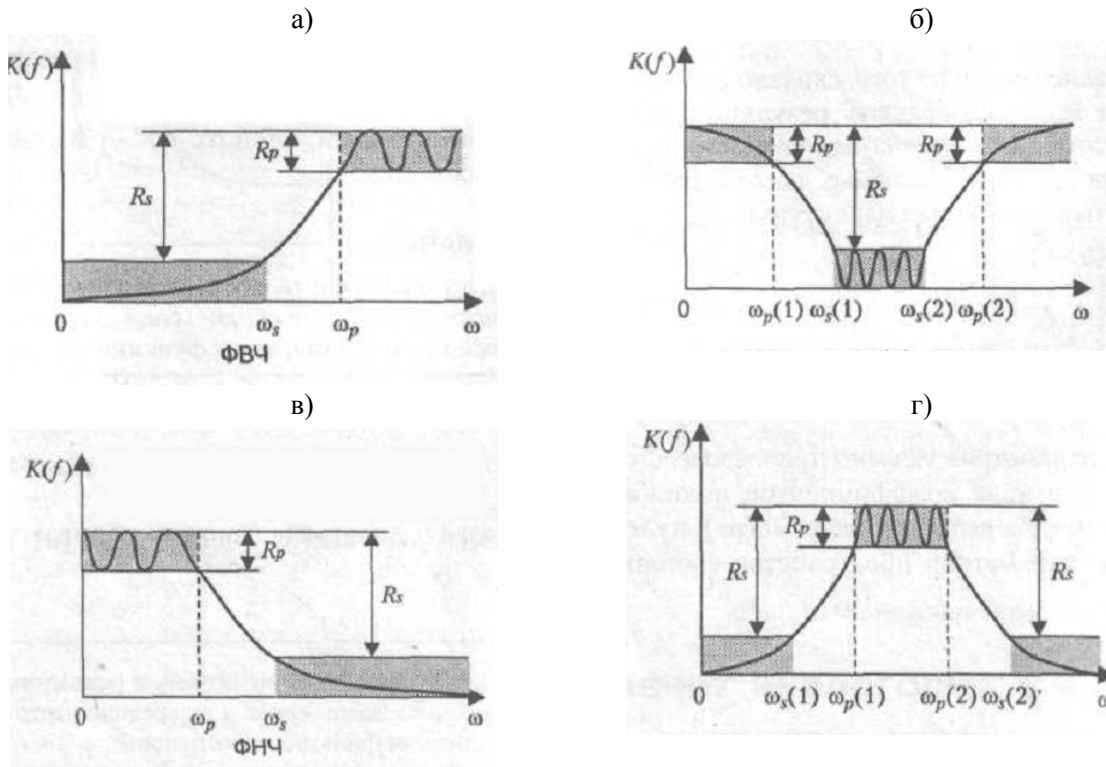
В состав библиотек MATLAB включены 3 функции:

- 1)  $[n, Wn] = \text{buttord}(Wp, Ws, Rp, Rs, 's');$
- 2)  $[n, Wn] = \text{cheb1ord}(Wp, Ws, Rp, Rs, 's');$
- 3)  $[n, Wn] = \text{ellipord}(Wp, Ws, Rp, Rs, 's');$

Указанные функции обеспечивают вычисление минимального порядка ( $n$ ) и граничной частоты ( $Wn$ ) фильтров по следующим заданным параметрам:

- $Rp$  - допустимый уровень пульсаций в полосе пропускания (в децибелах),
- $Rs$  - минимально необходимое затухание в полосе задерживания (в децибелах),
- $Ws$  - полоса задерживания (значение частоты, на которой обеспечивается требуемое затухание сигнала),
- $Wp$  - полоса пропускания фильтра.

Способ задания параметров  $Wp$  и  $Ws$  зависит от типа проектируемого фильтра. Для ФНЧ:  $Wp$  и  $Ws$  - числа, при этом должно выполняться неравенство  $Wp < Ws$ . Для ФВЧ:  $Wp$  и  $Ws$  - числа, при этом должно выполняться неравенство  $Wp > Ws$ . Для полосового фильтра:  $Wp$  и  $Ws$  - двухэлементные векторы, при этом должны выполняться неравенства  $Ws(1) < Wp(1) < Wp(2) < Ws(2)$ . Для режекторного фильтра:  $Wp$  и  $Ws$  - двухэлементные векторы, при этом должны выполняться неравенства  $Wp(1) < Ws(1) < Ws(2) < Wp(2)$ . Выходными параметрами являются минимально необходимый для выполнения заданных требований порядок фильтра  $n$  и частота среза фильтра  $Wn$ . Параметры обозначены на рисунке 2.



**Рис. 2.** Вид амплитудно-частотных характеристик различных фильтров:  
 а – фильтр верхних частот;  
 б – фильтр нижних частот;  
 в – режекторный фильтр;  
 г – полосовой фильтр

После определения порядка и частоты среза в зависимости от типа фильтра следует воспользоваться следующими функциями:

- 1) `butter(n, Wn, type, 's')` - расчет фильтров Баттерворта;
- 2) `cheby1(n, Rp, Wn, type, 's')` - расчет фильтров Чебышева первого рода;
- 3) `ellip(n, Rp, Rs, Wn, type, 's')` - расчет эллиптических фильтров;
- 4) `besself(n, Wn, type)` - расчет фильтров Бесселя.

**Фильтр Баттерворта низких частот 2-го порядка с частотой среза 75 Гц:**

```
Rs=25
Rp=2
Ws=2500
Wp=471
[n,Wn]=buttord(Wp, Ws, Rp, Rs, 's')
n=2
Wn=593.3130
[b,a]=butter(n, Wn, 's')
b= 1.0e+005 * 0 0 3.520203620299260
a= 1.0e+005 * 0.0000100000000000 0.008390713462274 3.520203620299260
```

**Фильтр Баттерворта высоких частот 2-го порядка с частотой среза 0.05 Гц:**

```
Rs=25
Rp=2
Wp=0.314
Ws=0.05
[n,Wn]=buttord(Wp, Ws, Rp, Rs, 's')
```

```

n = 2
Wn = 0.210681363499605
[b,a]=butter(n, Wn, 'high','s')
b = 1 0 0
a= 1.000000000000000 0.297948441600398 0.044386636926053
    
```

На рисунке 3 представлена схема, состоящая из ФВЧ, ФНЧ Баттерворта и режекторного, на рисунке 4 – АЧХ и ФЧХ фильтров Баттерворта второго порядка с частотой среза 0.05 Гц и 75 Гц

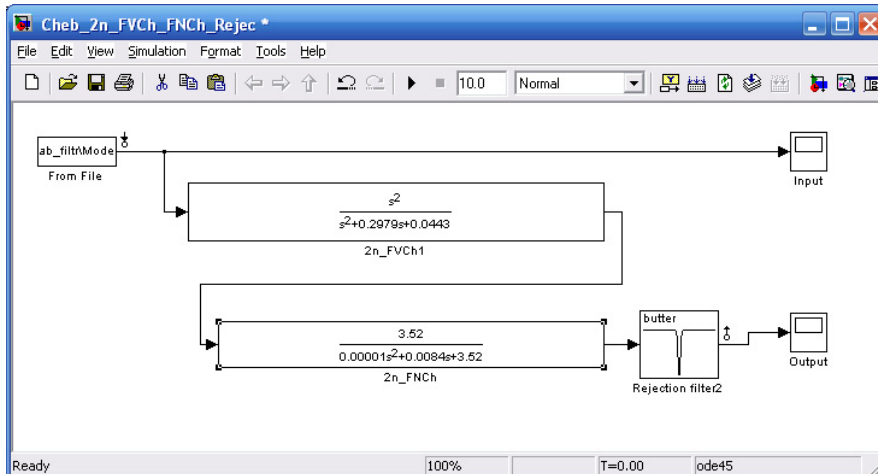


Рис. 3. Схема ФВЧ и ФНЧ Баттерворта второго порядка

Данный фильтр используют в системах, где требуется выделить сигнал в определенном частотном диапазоне с наименьшими искажениями. Если в некоторых случаях требуется увеличить скорость спада и нарастания кривой в пределах частоты среза, то увеличивают порядок фильтра. В таких фильтрах отсутствуют пульсации, но искажение сигнала происходит. Если сравнить сигналы на входе и выходе (рисунок 5 и рисунок 6), то можно заметить, что есть небольшой временной сдвиг, кроме этого происходит сглаживание импульсов на частотах более 75 Гц. Так же если обратить внимание на кривую ЭКГ после зубца R, то хорошо видно изменение выходного сигнала, в него добавились колебания – это может привести к неправильной постановке диагноза.

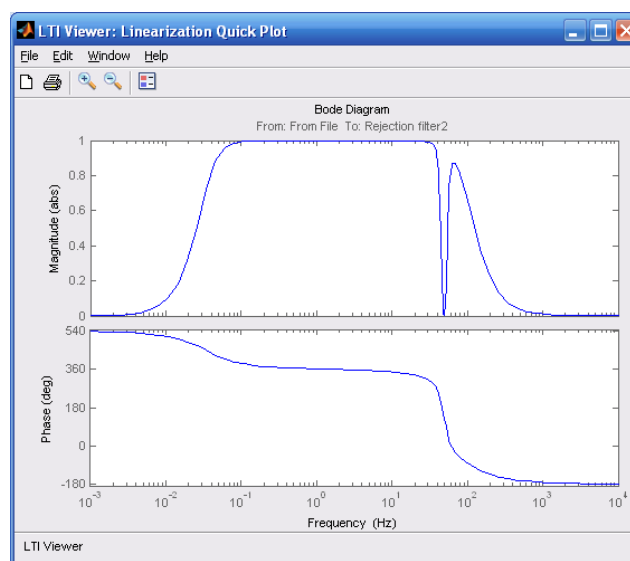


Рис. 4. АЧХ и ФЧХ фильтров Баттерворта второго порядка с частотой среза 0.05 Гц и 75 Гц

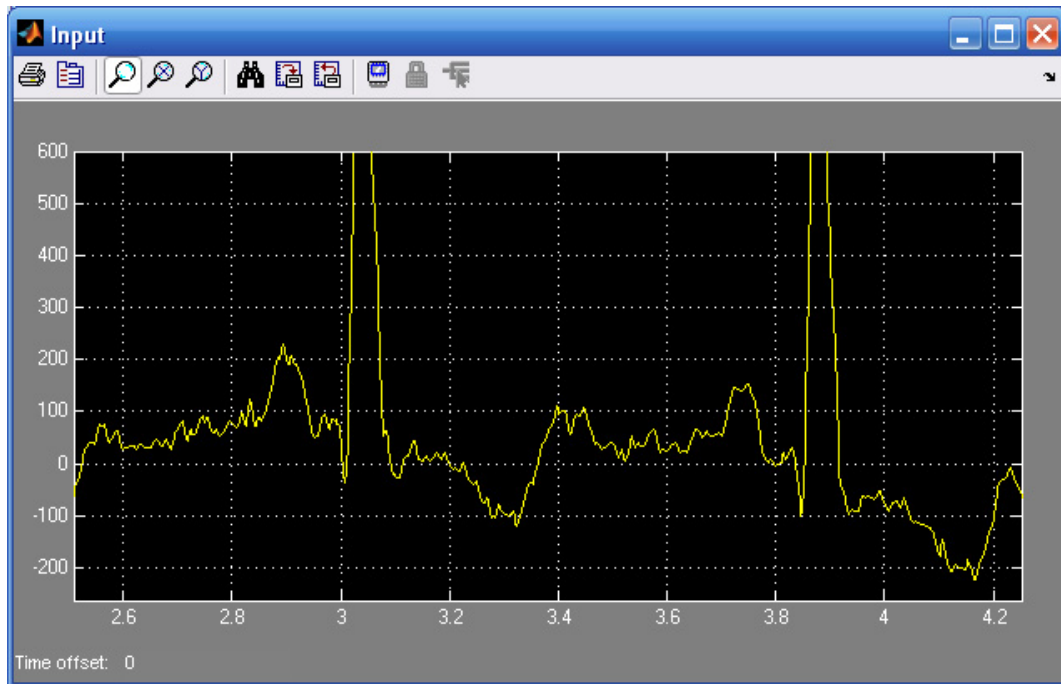


Рис. 5. Входной сигнал в увеличенном масштабе

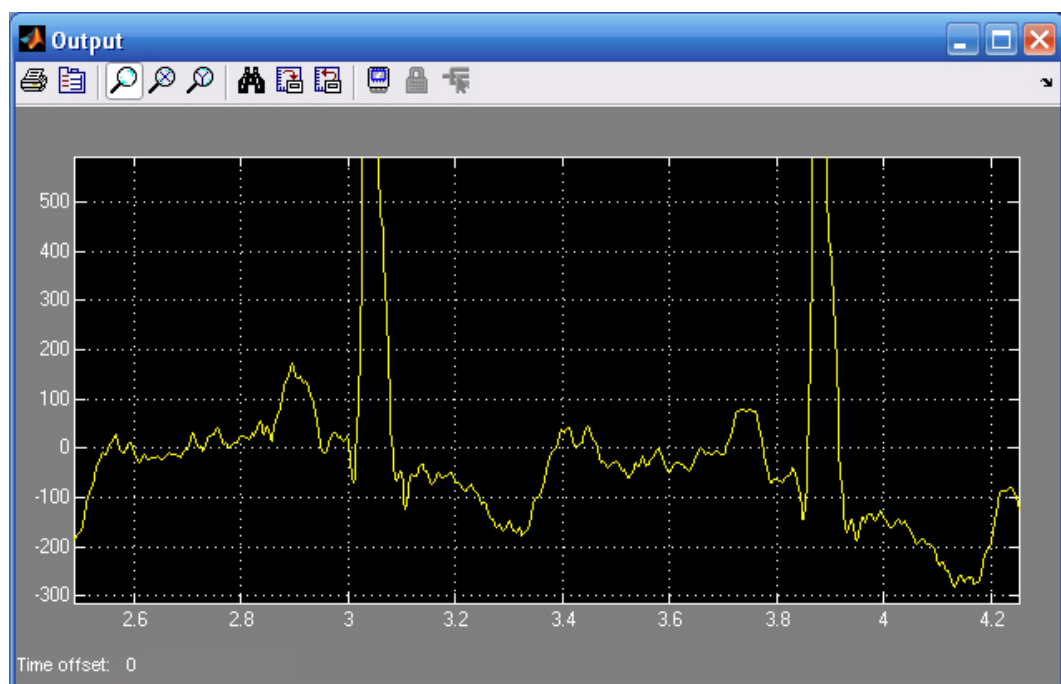


Рис. 6. Выходной сигнал в увеличенном масштабе (0,05 – 75) Гц

**Фильтр Баттерворта низких частот 4-го порядка с частотой среза 75 Гц:**

$R_s=25$

$R_p=2$

$W_s=1100$

$W_p=471$

$[n, Wn]=\text{buttord}(W_p, W_s, R_p, R_s, 's')$

$n=4$

$Wn=535.8764$

$[b,a]=\text{butter}(n, Wn, 's')$

$b= 0 0 0 0 8.246288192768231$

$a = 0.000000000100000 \ 0.000000140031250 \ 0.000098043755315 \ 0.040211865458534$   
 $8.246288192768231$

**Фильтр Баттерворта высоких частот 4-го порядка с частотой среза 0.05 Гц:**

$R_s=25$

$R_p=2$

$W_p=0.314$

$W_s=0.14$

$[n, Wn]=\text{buttord}(W_p, W_s, R_p, R_s, 's')$

$n=4$

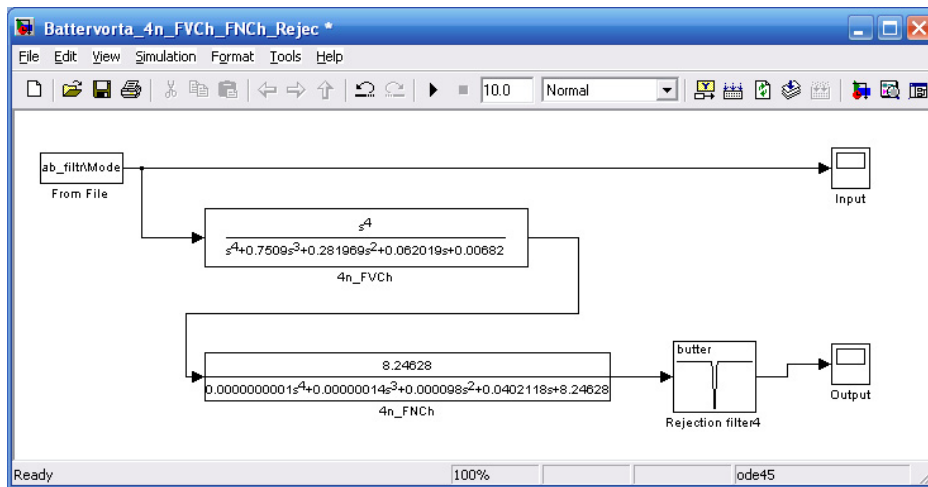
$Wn=0.2874$

$[b,a]=\text{butter}(4, Wn, 'high', 's')$

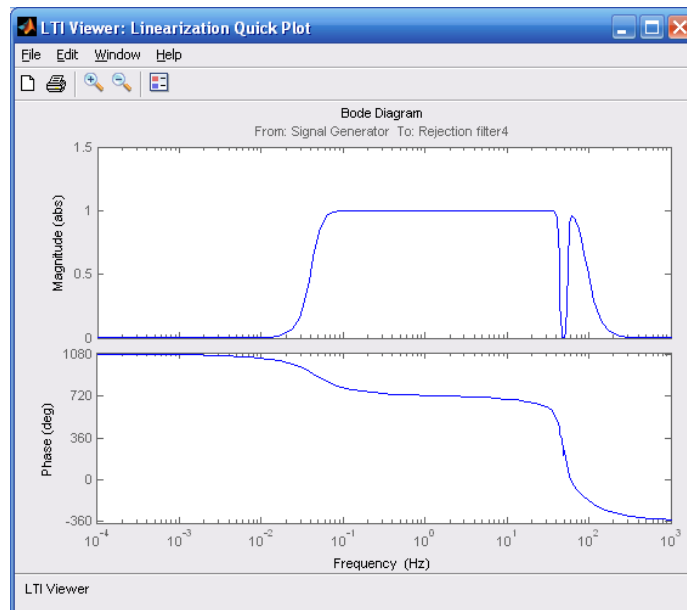
$b = 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0$

$a = 1.0000 \ 0.7510 \ 0.2820 \ 0.0620 \ 0.0068$

На рисунке 7 представлена схема, состоящая из ФВЧ, ФНЧ Баттерворта четвертого порядка и режекторного, на рисунке 8 – АЧХ и ФЧХ фильтров.



**Рис. 7.** Схема ФВЧ и ФНЧ Баттерворта четвертого порядка



**Рис. 8.** АЧХ и ФЧХ фильтров Баттерворта четвертого порядка с частотой среза 0.05 и 75 Гц

При прежней полосе пропускания сглаживание импульсов также наблюдается. Колебания в конце комплекса QRS усилились, рисунок 9 и 10.

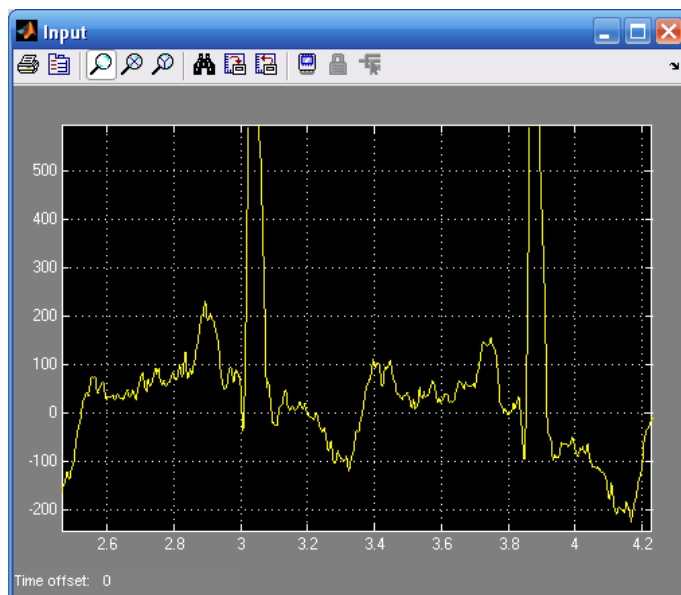


Рис. 9. Входной сигнал в увеличенном масштабе

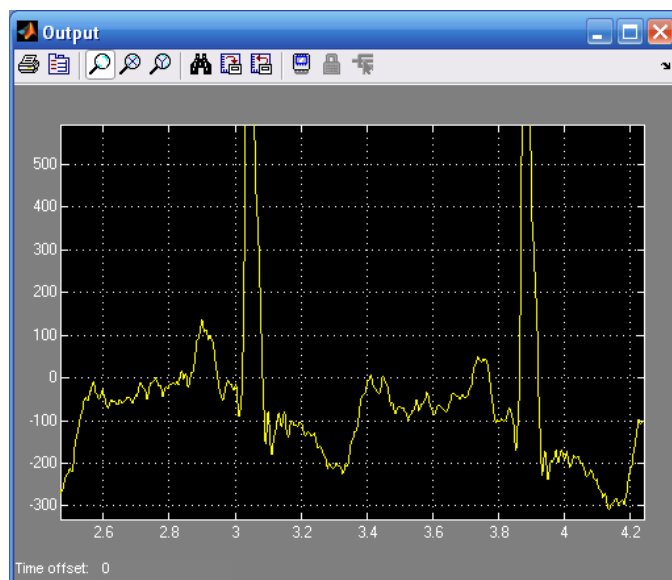


Рис. 10. Выходной сигнал в увеличенном масштабе (0,05 – 75) Гц

На рисунке 11 представлена схема, состоящая из элемента, импортирующего данные, и трех фильтров: ФВЧ, ФНЧ Чебышева и режекторного.

**Фильтр Чебышева низких частот 2-го порядка с частотой среза 75 Гц:**

$R_s=25$

$R_p=3$

$W_s=1500$

$W_p=471$

$[n, Wn] = \text{cheb1ord}(W_p, W_s, R_p, R_s, 's')$

$n = 2$

$Wn = 471$

$[b, a] = \text{cheby1}(n, R_p, Wn, 's')$

$b = 1.0e+005 * 0 \ 0 \ 1.111841905290496$

$a = 1.0e+005 * 0.0000100000000000 \ 0.003037477357637 \ 1.570518434907723$

**Фильтр Чебышева высоких частот 2-го порядка с частотой среза 0.05 Гц:**

$R_s=25$

$R_p=3$

```

Wp=0.314
Ws=0.1
[n, Wn] = cheb1ord(Wp, Ws, Rp, Rs, 's')
n=2
Wn=0.3140000000000000
[b,a]=cheby1(n, Rp, Wn,'high', 's')
b = 0.707945784384138  0  0
a = 1.000000000000000  0.286035914221337  0.139270159138789
    
```

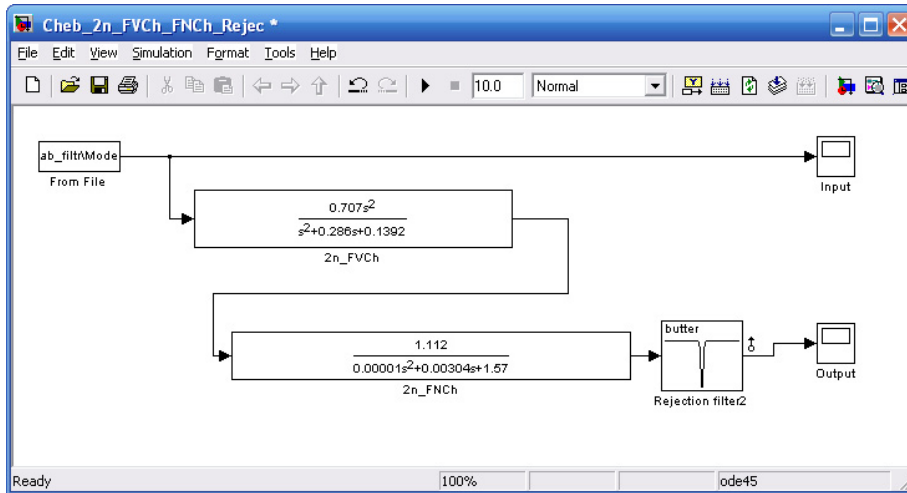


Рис. 11. Схема ФВЧ и ФНЧ Чебышева второго порядка

Данная схема оставляет сигнал в полосе от 0.05 Гц до 75 Гц и убирает сигналы с частотой 50 Гц (во всех схемах используется одинаковая модель режекторного фильтра с АЧХ от 43 Гц до 57 Гц). После построения АЧХ (рисунок 12) видно, что в полосе пропускания есть пульсации, из-за которых будет искажаться сигнал. При сравнении входного и выходного сигналов (рисунок 13 и рисунок 14) заметно как выходной сигнал опустился чуть ниже и выпрямился - это результат отсеивания постоянной составляющей. Если рассматривать в увеличенном масштабе (рисунок 15 и рисунок 16), то заметно как произошло сглаживание и уменьшение амплитуд зубцов. Если до изменения разница между зубцом Q и S была 300 мкВ, то после фильтров она стала чуть более 150 мкВ. В конце комплекса QRS (момент окончания процесса деполяризации) после воздействия фильтра появляются паразитные осцилляции.

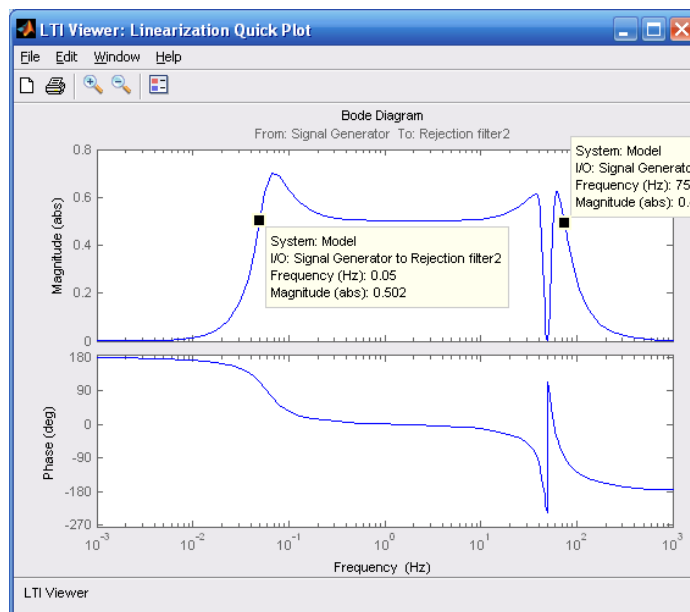


Рис. 12. АЧХ и ФЧХ фильтров Чебышева второго порядка



с частотой среза 0.05 Гц и 75 Гц

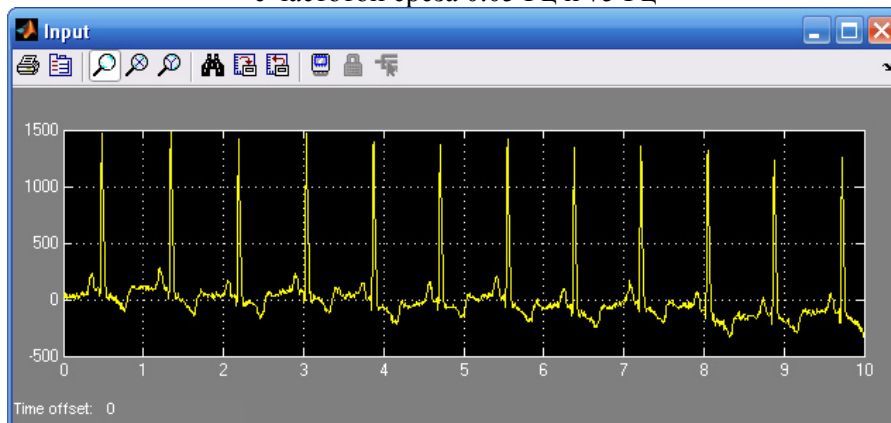


Рис. 13. Входной сигнал

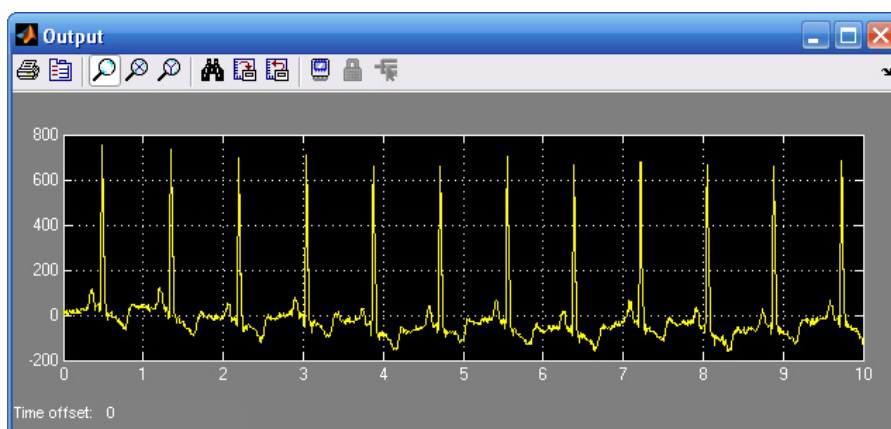


Рис. 14. Выходной сигнал

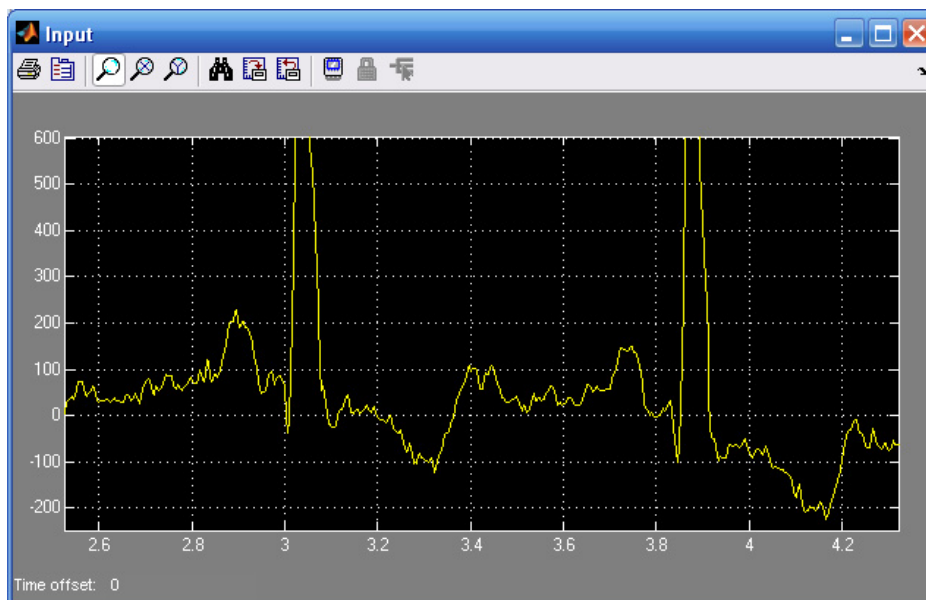


Рис. 15. Входной сигнал в увеличенном масштабе

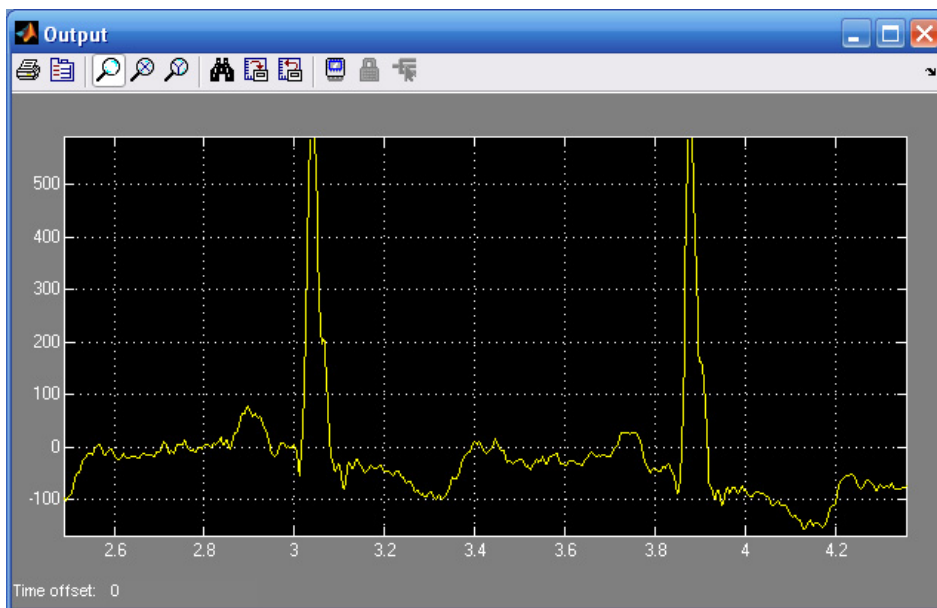


Рис. 16. Выходной сигнал в увеличенном масштабе (0,05 – 75) Гц

### Вывод

В ходе исследований установлено, что фильтрующие звенья независимо от типа фильтров уменьшают амплитуды биопотенциалов, записанных без фильтров, искажают их форму и положение на оси времени, добавляют переходные процессы. Для повышения точности получаемого сигнала следует стремиться регистрировать биопотенциалы без использования фильтров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: «Высшая школа», 1991.– 622 с.
2. Титце У., Шенк К., Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем.- М.: Мир, 1982. – 512 с.
3. Поляков В. Активный фильтр нижних частот // Электроника xЭлектронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elektronika.rukodelkino.com/stati/uzly/192-aktivnyj-filtr-nizhnix-chastot.html> (дата обращения: 15.12.2013).
4. Классификация фильтров [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://analogiu.ru/6/6-5-1.html> (Дата обращения: 30.04.2014).
5. Солонина А. И., Арбузов С.М. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB. – СПб: БХВ-Петербург, 2008. – 816 с.

### Сведения об авторах:

**Бадеев Ч.Э.:** магистрант гр. 1БМ2Б кафедры Информационно-измерительной техники Института неразрушающего контроля Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Иванов М.Л.:** аспирант лаборатории №63Института неразрушающего контроля Национального исследовательского Томского политехнического университета.