

Эффективная режекторная фильтрация биоэлектрических сигналов

А. В. Белов¹, А. А. Анисимов^{1,2}, Т. В. Сергеев^{1,2}, Н. Б. Суворов¹

¹ФГБНУ «Институт экспериментальной медицины»

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

E-mail: stim9@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены способы повешения эффективности режекторной фильтрации: возможность регулировки добротности и частоты режекции, использование пары режекторных фильтров с небольшим отличием значений частоты режекции. Разработана схема, реализующая в себе указанные способы. Проведено моделирование этой схемы в программе структурного и схематехнического моделирования Micro-Cap с использованием различных тестовых и реальных ЭКГ сигналов, включая сигналы имитирующие сетевые помехи. Показано значение указанных способов повешения эффективности режекторной фильтрации. Приведены рекомендации по созданию режекторных фильтров для обработки биоэлектрических сигналов.

Ключевые слова: частотная фильтрация; режекторный фильтр; биоэлектрический сигнал; сетевая помеха

I. ВВЕДЕНИЕ

Режекторные фильтры (РФ, Notch Filter) широко применяются в различных измерительных приборах для удаления из обрабатываемого сигнала определённых частотных составляющих [1]. Особое значение режекторная фильтрация имеет в устройствах регистрации биоэлектрических сигналов (БЭС) в условиях наличия помех от сетевой частоты 50 или 60 Гц.

Передаточная функция РФ имеет вид:

$$K_{NF}(p) = \frac{p^2 + \omega_0^2}{p^2 + p\omega_0 \frac{1}{Q_{NF}} + \omega_0^2}, \quad (1)$$

где p – оператор Лапласа, Q_{NF} – коэффициент добротности РФ, ω_0 – циклическая (угловая) частота режекции, f_0 – частота режекции, $\omega_0 = 2\pi f_0$.

При проектировании РФ для устройств обработки БЭС нередко не учитывается, что существует отклонение частоты переменного тока в промышленных электросетях. Это отклонение в России регламентируется государственными стандартами. Согласно ГОСТ 32144–2013 «отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать $\pm 0,2$ Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и $\pm 0,4$ Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю» [2].

В изолированных системах электроснабжения автономных генераторных установок, не подключенных к синхронизированным системам передачи электрической энергии «отклонение частоты... не должно превышать ± 1 Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и ± 5 Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю» [2].

В РФ второго порядка ширину полосы подавления определяет значение величины добротности Q_{NF} . При проектировании такого фильтра на частоту $50 \pm 0,4$ Гц его добротность будет равна:

$$Q_{NF} = 50 \text{ Гц} / (2 \cdot 0,4 \text{ Гц}) = 62,5. \quad (2)$$

При этом ширина полосы подавления фильтра составляет 0,8 Гц.

При проектировании РФ на частоту 50 ± 5 Гц его добротность будет равна:

$$Q_{NF} = 50 \text{ Гц} / (2 \cdot 5 \text{ Гц}) = 5. \quad (3)$$

Однако необходимо отметить, что при использованном подходе помеха на границе частотного диапазона, например, при частоте 45 Гц будет ослаблена только на 3 дБ, т. е. в 0,707 раз.

Кроме того, при таких высоких значениях величины добротности особое значение приобретают два следующих фактора.

1. Влияние смещения частоты режекции от ее номинального значения на коэффициент подавления сетевой частоты. Это может произойти вследствие действия различных факторов: разброса параметров электронных компонентов, дрейфа их со временем, изменения температуры окружающей среды и др.

2. Возникновение паразитных колебаний («звона») в регистрируемом БЭС как реакции высокодобротного режекторного фильтра на импульсные составляющие полезного сигнала.

С учетом указанных факторов можно сформулировать требования к эффективной режекторной фильтрации:

- Единичная передача РФ на постоянном токе.
- Обеспечение коэффициента подавления сетевой частоты не ниже определенного порогового значения в заданной полосе частот.

- Наличие подстройки основных параметров РФ: добротности и частоты режекции.
- Исключение влияния разброса параметров электронных компонентов на основные параметры РФ.
- Паразитные колебания («звон») вносимые режекторным фильтром не должны оказывать значимого влияния на форму регистрируемых БЭС.

Цель исследования состоит в определении условий и технических путей достижения эффективной режекторной фильтрации биоэлектрических сигналов.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучения работы режекторных фильтров и их влияния на БЭС используется программа схемотехнического и структурного моделирования Micro-Cap.

На рис.1 приведены логарифмические АЧХ режекторных фильтров А и В (красная и синяя кривые, соответственно). Эти фильтры отличаются значениями частот режекции: f_{A0} – частота режекции фильтра А, f_{B0} – частота режекции фильтра В ($f_{A0} \neq f_{B0}$), добротности этих фильтров Q_A и Q_B совпадают ($Q_A = Q_B$).

Для АЧХ РФ N приняты следующие обозначения:

- f_{N0} – частота режекции,
- f_{N1} – нижняя частота среза,
- f_{N2} – нижняя частота полосы эффективного подавления режекторного фильтра N,
- f_{N3} – верхняя частота полосы эффективного подавления режекторного фильтра N,
- f_{N4} – верхняя частота среза,
- Δf_N – полоса подавления,
- $\Delta f_{N_MIN} = (f_{N3} - f_{N2})$ – полоса эффективного подавления режекторного фильтра N.

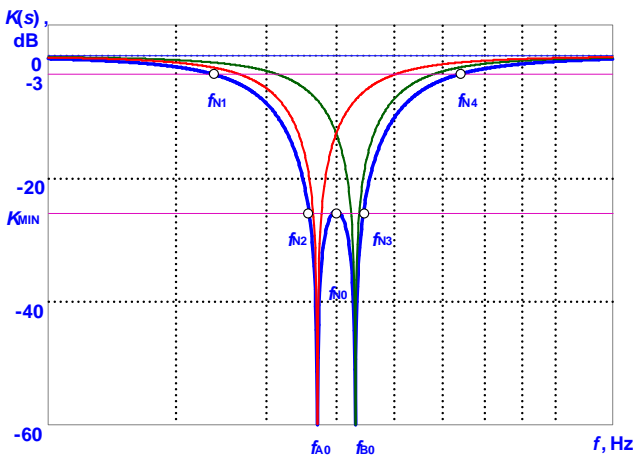


Рис. 1. Логарифмические АЧХ режекторных фильтров А и В, и полученного, путем их последовательного соединения, РФ N (обозначения приведены в тексте)

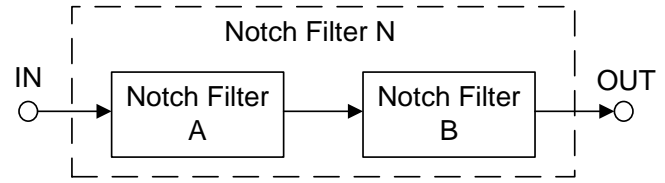


Рис. 2. Структурная схема режекторного фильтра N

При этом условием для определения полосы эффективного подавления является неравенство:

$$K(s)_N < K_{MIN}. \quad (3)$$

Например, $K_{MIN} = -40$ дБ.

Выполнение данного условия обеспечивает первое из приведенных выше требований к эффективной режекторной фильтрации.

Синяя кривая это АЧХ РФ четвертого порядка, обозначенного как N и полученного при последовательном соединении режекторных фильтров А и В (рис. 2).

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для выполнения второго из условий были рассмотрен ряд режекторных фильтров второго порядка (табл. I).

Они сравнивались по возможности регулировки частоты режекции f_0 , добротности Q_{NF} , сохранения постоянства коэффициента передачи в полосе пропускания K (const обозначает, что при регулировке f_0 , добротности Q_{NF} K остается постоянным, var – изменяет свое значение), количеству используемых операционных усилителей (ОУ) и используемым элементам для регулировки (СР – двоянный резистор, Р – резистор, П – потенциометр).

ТАБЛИЦА I. СРАВНЕНИЕ РФ ВТОРОГО ПОРЯДКА

РФ по фамилии автора(ов)	ОУ, шт.	Регулируемый параметр		К	Источник
		f_0	Q_{NF}		
Bainter J.R.	3	СР	СР	const	[3]
Fliege N.	2	СР	СР	const	[4]
Белов А.В.-1	2	СР	П	const	[5]
Симон В.А.	6	Р	П	var	[6]
Белов А.В.-2	6	П	Р	var	[7]
Белов А.В.-3	4	П	Р	const	[8]
Kenneth R. Laker	2	СР	Р	const	[9]

Ниже приведено описание особенностей рассмотренных фильтров.

Схема инвертирующего РФ Байтнера [3] содержит единичный инвертор, инвертирующий интегратор и дифференцирующую RC цепь, которые на пассивном сумматоре формируют нулевое напряжение на частоте режекции. Это напряжение через повторитель напряжения поступает на выход фильтра. Частотно-задающее кольцо: CRCRRR. Добротность задается изменением одного переменного заземленного резистора.

Схема РФ Fliege N. получена методом нулловых эквивалентных преобразований схемы кольца

интеграторов на трех ОУ. Частоту режекции задают две RC цепочки. Добротность изменяется при одновременном изменении двух равных резисторов.

В схеме [5] частота режекции неинвертирующего РФ задается параметрами RC T-моста, а добротность изменяется с помощью перемещения движка потенциометра в цепи отрицательной обратной связи (ООС) первого ОУ.

В схеме Симона [6] два последовательно включенные инвертирующие фазовые контуры первого порядка на ОУ сдвигают фазу входного напряжения на 180° на частоте режекции при сохранении их равенства входному напряжению. Сумма этих двух напряжений дает нулевое напряжение, образуя режекторный фильтр. Частота режекции подстраивается одним резистором, а добротность регулируется другим заземленным резистором.

Схема РФ [7] получена с помощью дополнительного топологического преобразования исходной классической схемы полосового фильтра второго порядка (KHN). Частота режекции задается перемещением движка потенциометра, а добротность с помощью резистора. Коэффициента передачи задается соотношением двух резисторов. Недостаток схемы – требуется источник входного напряжения с минимальным выходным сопротивлением и высокое синфазное напряжение на входах ОУ.

Схема перестраиваемого РФ [8] дает возможность независимо регулировать частоту режекции фильтра, без изменения добротности полюса, обеспечить регулирование частоты режекции при перемещении движка потенциометра от одного его вывода до другого, а добротность переменным резистором в цепи ООС выходного ОУ.

Режекторный фильтр [9] инвертирует входное напряжение усилителя к входному резистору. Частота режекции задается резисторами и конденсаторами RC T-моста, а добротность резистивным делителем перед повторителем напряжения.

Из рассмотренных фильтров в качестве основы для РФ четвертого порядка был выбран фильтр [8].

Принципиальная схема разработанного РФ, моделируемая в Micro-Cap, приведена на рис. 3.

Схема представляет полосовой режекторный фильтр 4 порядка с двумя управляемыми параметрами – частотой режекции и добротностью, построенный каскадным соединением одинаковых РФ второго порядка, но с различными частотами режекции и с одинаковыми добротностями.

Приведено подробное описание работы схемы первого каскада А (РФ второго порядка), второй каскад В работает аналогичным образом.

Частотно селективная часть выполнена в виде параллельно включенных инвертирующих интегратора и дифференциатора.

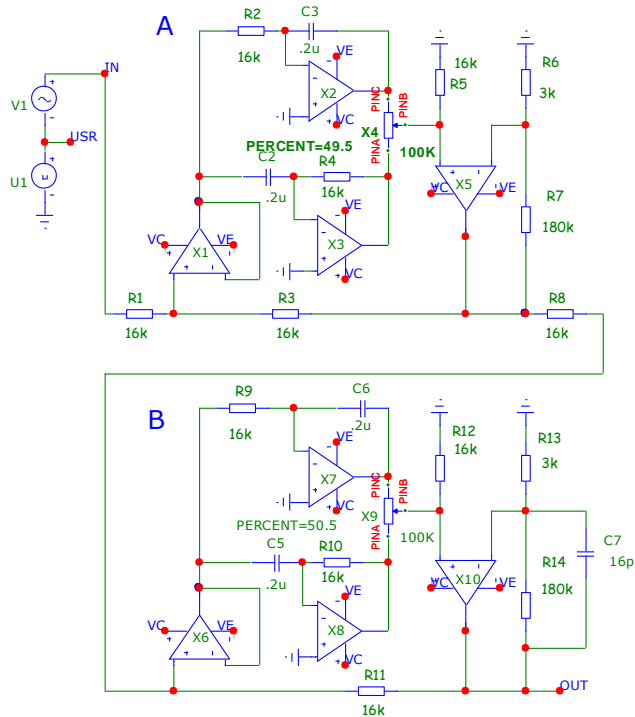


Рис. 3. Принципиальная схема режекторного фильтра четвертого порядка из двух РФ по патенту RU207908U1 [8]

На частоте режекции, где напряжения интегратора и дифференциатора за счёт постоянного фазового на любой частоте составляет плюс-минус 90° , находятся в противофазе. После их суммирования на движке потенциометром формируется нулевое выходное напряжение, поскольку нулевой баланс напряжение может осуществляться на различных частотах при сохранении постоянного фазового сдвига интегратора и дифференциатора.

Выходные напряжения интегратора и дифференциатора взаимно обратно и зависят от частоты.

Выбором соответствующего положения движка потенциометра от среднего положения, можно получить настройку режекторного фильтра на частоты большие или меньше начальной средней частоты. Перемещение движка в сторону выхода интегратора от среднего положения приводит к снижению частоты режекции, а сторону дифференциатора увеличивает частоту реакции режекции.

Выходное напряжение с движка потенциометра поступает на вход неинвертирующего выходного усилителя.

Фильтр охвачен цепью резистивной общей обратной связи в виде делителя, задающего коэффициент передачи фильтра на нулевой и бесконечно большой частоте.

Выходное напряжение делителя через повторитель напряжения поступают на параллельно включённые входы интегратора и дифференциатора.

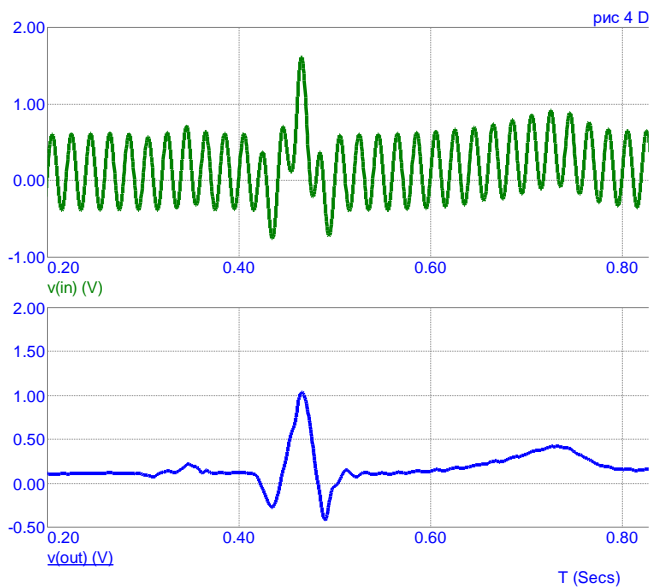


Рис. 4. Принципиальная схема режекторного фильтра четвертого порядка из двух РФ по патенту RU207908U1 [8]

Фильтр является инвертирующим, поскольку он состоит из трёх последовательно включённых усилительных элементов: неинвертирующего повторителя напряжения, инвертирующего интегратора и дифференциатора и выходного неинвертирующего усилителя.

Введение компенсационного резистора, включенного между движком потенциометра и общим проводом, обеспечивает сохранение постоянства добротности при перестройке частоты режекции, ценой снижения величины петлевого усиления в замкнутом контуре общей отрицательной обратной связи фильтра.

Для построения режекторного фильтра 4 порядка использованы два режекторных фильтра второго порядка, включенные каскадно (последовательно). Значение добротности обоих фильтров устанавливается одинаковыми с помощью переменных резисторов.

Один из РФ настраивается перемещением движка потенциометра на частоту ниже сетевой частоты 50 Гц, а другой РФ настраивается на частоту выше 50 Гц. В итоге получена АЧХ, представленная на рис. 1.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 представлены временные графики моделирования в программе MicroCap12 предложенного режекторного фильтра. Верхний график – исходный ЭКГ-сигнал с сетевой помехой (50 Гц), отношение сигнал шум примерно равно двум. Нижний график – выходное напряжение режекторного фильтра четвертого порядка без сетевой помехи. Результат получен для диапазона сетевой помехи 50 ± 0.4 Гц.

Это доказывает, что цель исследования достигнута – получен эффективный режекторный фильтр для заданного диапазона частот сетевых помех, не вносящий значительных искажений в обрабатываемый биоэлектрический ЭКГ-сигнал.

Благодаря возможности подстройки основных параметров РФ – добротности и частоты режекции – предложенная схема может быть настроена на работу при других значениях частотного диапазона сетевых помех.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе сформулированы требования к эффективной режекторной фильтрации сетевой помехи при обработке БЭС. Представлено оригинальное схемотехническое решение, реализующее указанные требования при проектировании РФ для устройств обработки БЭС в условиях работы в сетевых синхронизированных системах электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Muzaffer Ahmad Siddiqi. Continuous Time Active Analog Filters, 2020, 620 p.
- [2] ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
- [3] Bainter J.R. Active filter has stable notch, and response can be regulated // Electronics, October 2, 1975. P.115.
- [4] Fliege N., Fliege Notch Filter, 1973.
- [5] Патент РФ № 59911 U1 / А.В. Белов, Д.Г. Пуликов, Т.В. Сергеев. Регулируемый активный режекторный фильтр (РФ). Оpubл.: 27.12.2006. Бюл. № 36.
- [6] Патент РФ № 180799 U1 / Симон В.А. Кострин Д.К., Сенотрусова Е.А., Герасимов В.А., Селиванов Л.М., Ухов А.А. Режекторный фильтр. Оpubл.: 22.06.2018 Бюл. № 18.
- [7] Пат. РФ № 188003 U1 / Белов А.В., Иншаков Ю.М. Перестраиваемый активный RC фильтр, Опубликовано: 26.03.2019 Бюл. № 9.
- [8] Патент РФ № 207908 U1 / Белов А.В., Сергеев Т.В., Иншаков Ю.М., Анисимов А.А., Суворов Н.Б. Перестраиваемый активный RC режекторный фильтр для электрофизиологических сигналов. Оpubл. 2021.
- [9] Patent US 4242642 / Kenneth R. Laker. Pole Quality Factor (Q) Enhancement Technique Filters, 1980.