

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
МИНИСТЕРСТВА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

31/2/11

Одобрено кафедрой
«Транспортная связь»

**ТЕОРИЯ ЛИНЕЙНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ,
ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ**

Методические указания к выполнению
лабораторной работы (часть II)
для студентов VI курса

специальности

210700 АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ (АТС)



Москва – 2004

Составитель — ПАНКОВ Ю.Н.
Рецензент — канд. техн. наук, доц. ГУБЕНКО Ю.Н.

Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи

Методические указания к выполнению
лабораторной работы (часть II)

Редактор *Е.А. Ямицкова*
Компьютерная верстка *Н.Ф. Цыганова*

Тип. зак.	Изд. зак. 287	Тираж 400 экз.
Подписано в печать	Гарнитура Times.	Офсет
Усл. печ. л. 1,0		Формат 60×90 ¹ / ₁₆

Издательский центр РГОТУПС,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Типография РГОТУПС, 125993, Москва, Часовая ул., 22/2

© Российский государственный открытый технический
университет путей сообщения Министерства путей сообщения
Российской Федерации, 2004

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

Цель работы.

Моделирование схем и устройств на базе операционных усилителей, с использованием виртуальных электрических и измерительных приборов.

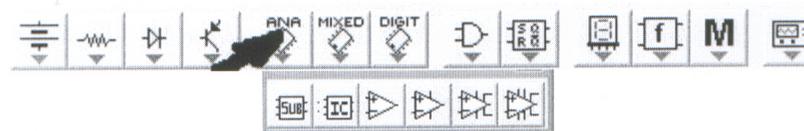
Ознакомление с компьютерной программой по моделированию электронных схем Electronics Workbench EDA.

Общие сведения:

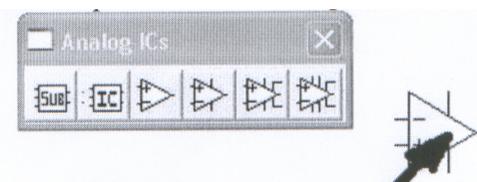
Программа Electronics Workbench EDA функционирует в среде Windows, имеет простой интуитивно понятный интерфейс, обеспечивает моделирование аналоговых, цифровых и смешанных аналого-цифровых устройств, имеет обширные библиотеки современных электронных компонентов, выпускаемых известными компаниями.

При моделировании электрических схем необходимо выбрать и перенести элементы этих схем на рабочий стол. Для этого сначала нужно открыть панели инструментов, которые группируют элементы по их назначению, а затем, выбрав сам элемент перетащить его на рабочий стол.

Например, для выбора операционного усилителя (ОУ) нужно открыть панель аналоговых ИМС, кликнув по ней одиночным щелчком мыши, после чего отобразятся эскизы схематичных изображений различных аналоговых микросхем.



Затем в зависимости от назначения ОУ, выбирается необходимый элемент и перетаскивается на рабочий стол.



После выбора необходимых элементов их нужно соединить между собой при помощи имитации проводников. Для этого нужно подвести мышку к первому из выводов элемента, нажать на левую кнопку и протянув ко второму отпустить.

Для открывания панелей настройки какого-либо прибора нужно кликнуть двойным щелчком по его эскизу.

Классической схемой пассивного фильтра второго порядка является последовательная цепь. Если в такой цепи выходной сигнал снимать с конденсатора, то получим ФНЧ второго порядка, а если с индуктивности, — то ФВЧ. При практической реализации RLC-фильтров (особенно низкочастотных) наибольшие трудности возникают с изготовлением катушек индуктивности, их экранированием, а при больших значениях индуктивности — с проблемой массы и геометрических размеров. С появлением ОУ эти проблемы были решены с использованием активных RC-фильтров. Появились так называемые безиндуктивные частотные фильтры.

При дальнейшем рассмотрении фильтровых систем основное внимание будет уделено активным фильтрам второго порядка, многообразию схемных реализаций которых следует из их обобщенного коэффициента передачи, который в операторной форме имеет вид [1]:

$$K(p) = (b_0 + b_1 p + b_2 p^2) / (a_0 + a_1 p + a_2 p^2).$$

Из этого выражения получаем формулы для коэффициента передачи ФНЧ при $b_1 = b_2 = 0$, ФВЧ — при $b_0 = b_1 = 0$, полосового фильтра (ПФ) — при $b_0 = b_2 = 0$, режекторного фильтра (РФ) — при $b_1 = 0$. При практической реализации таких фильтров наибольшее распространение получили схемы с симметричным Т-образным мостом и многоконтурной обратной связью. Для таких фильтров модуль и аргумент коэффициента передачи

$$|\hat{E}(j\omega)| = \Delta / [\omega^4 + \omega^2 \omega_0^2 (d^2 - 2) + \omega_0^4]^{1/2};$$

$$\varphi = B = -\arctg \left\{ \frac{2 - \omega/\omega_0 + (4 - d^2)^{1/2}}{d} \right\} - \arctg \left\{ \frac{2 - \omega/\omega_0 - (4 - d^2)^{1/2}}{d} \right\}, \quad (1)$$

где ω — текущее значение частоты;

ω_0 — частота среза;
 $d = \Delta\omega/\omega_0$ — коэффициент затухания;
 $\Delta\omega$ — полоса пропускания по уровню 0,707 (−3 дБ).

Коэффициент A в формуле (1) определяется типом фильтра:

для ФНЧ $A = K_0 \omega_0^2$;

для ФВЧ $A = K_0 \omega^2$,

где $K_0 = 1$ — коэффициент передачи при $\omega = 0$ (для ФНЧ) и $\omega \gg \omega_0$ (для ФВЧ);

фазовые углы $\varphi = B$ (для ФНЧ) и $\varphi = p = +B$ (для ФВЧ).

Пример реализации активных фильтров на базе симметричных Т-мостов показан на рис. 1, а, где на ОУ 1 выполнен ФНЧ, а на ОУ 2 — ФВЧ. Параметры ФНЧ определяются по формулам:

$$\omega_0 = 1/R2(C1 - C2)^{1/2} = 1/10^6(10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^{-10})^{1/2} = 414,2 \text{ c}^{-1} = 225,2 \text{ Гц};$$

$$d = \omega_0 R2 \cdot C1 = 2\omega_0 R2 \cdot C2 = 1414,2 \cdot 10^6 \cdot 10^{-9} = 1,414,$$

т.е. коэффициент передачи на частоте ω_0 будет равен $1/d = 0,707 = -3$ дБ, что согласуется с результатами моделирования (см. АЧХ на рис. 1, б).

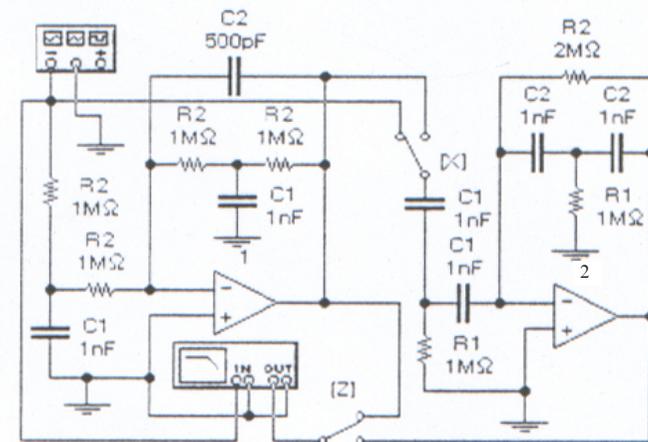


Рис. 1. Схемы ФНЧ и ФВЧ с Т-мостом (а) и АЧХ ФНЧ (б)

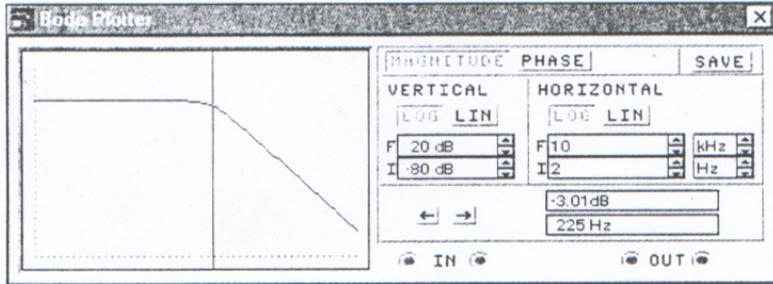


Рис. 1 (б)

Параметры ФВЧ при $C1 = C2 = C$ определяются по формулам:

$$\omega_0 = 1/C(R1 \cdot R2)^{1/2} = 1/10^{-9}(10^6 \cdot 2 \cdot 10^6)^{1/2} = 707 \text{ с}^{-1} = 112,6 \text{ Гц};$$

$$d = 2(R1/R2)^{1/2} = 2(10^6/2 \cdot 10^6)^{1/2} = 1,414,$$

т.е. коэффициент передачи на частоте ω_0 будет равен $1/d = 0,707 = -3 \text{ дБ}$.

Для получения АЧХ ФВЧ (рис. 2, а) ключ Z на рис. 1, а переводится в нижнее положение; к сожалению, из-за дискретности установки визирной линейки оказалось невозможным установить ее на расчетное значение частоты ω_0 . Если при этом ключ X перевести в правое положение, то получим суммарную АЧХ последовательно включенных ФНЧ-ФВЧ (рис. 2, б). Поскольку коэффициенты передачи фильтров при этом перемножаются, а их логарифмы складываются, то указанный на рис. 2, б коэффициент передачи $-1,95 \text{ дБ}$ можно получить суммированием коэффициентов передачи, получаемых по АЧХ на рис. 1, б и 2, а на частоте 154 Гц.

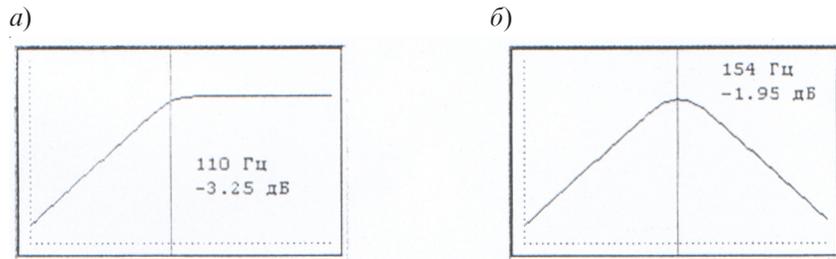


Рис. 2. АЧХ ФНЧ (а) и суммарная АЧХ ФВЧ-ФНЧ (б)

Пример реализации активных фильтров на основе многоконтурной обратной связи показан на рис. 3, а, где на ОУ 1 выполнен ФНЧ, а на ОУ 2 — ФВЧ. При $R1 = R2 = R3 = R$ параметры ФНЧ в этом случае определяются по формулам:

$$\omega_0 = 1/R(C1 \cdot C2)^{1/2} = 1/10^6(10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^{-11})^{1/2} = 4472,1 \text{ с}^{-1} = 712,1 \text{ Гц};$$

$$d = 3(C2/C1)^{1/2} = 3(5 \cdot 10^{-11}/10^{-9})^{1/2} = 0,671,$$

т.е. коэффициент передачи на частоте ω_0 будет равен $1/d = 1,5 = 3,47 \text{ дБ}$, что согласуется с результатами моделирования (см. АЧХ рис. 3, б). Параметры ФВЧ при $C1 = C2 = C$ определяются по формулам:

$$K_0 = C1/C2 = 10^{-9}/5 \cdot 10^{-10} = 2;$$

$$\omega_0 = 1/(R1 \cdot R2 \cdot C2 \cdot C3)^{1/2} = 1/(10^6 \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-9})^{1/2} = 316,2 \text{ с}^{-1} = 50,35 \text{ Гц};$$

$$d = (R1/R2)^{1/2} [(C1/C2)^{1/2} + (C3/C2)^{1/2} + (C2/C3)^{1/2}]^2 = (10^6/20 \cdot 10^6)^{1/2} [(10^{-9}/5 \cdot 10^{-10})^{1/2} + (5 \cdot 10^{10}/10^{-9})^{1/2}]^2 = 0,79,$$

т.е. коэффициент передачи на частоте ω_0 будет равен $K_0/d = 2,532 = 8,07 \text{ дБ}$.

Для получения АЧХ ФВЧ (рис. 3, в) ключ Z на рис. 3, а переводится в нижнее положение; как и в первом случае, из-за дис-

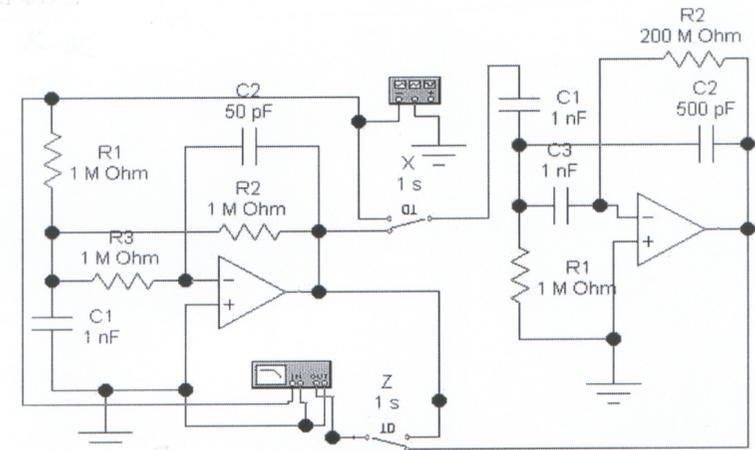


Рис. 3 (а). Схема фильтра ФНЧ и ФВЧ на основе многоконтурной обратной связи

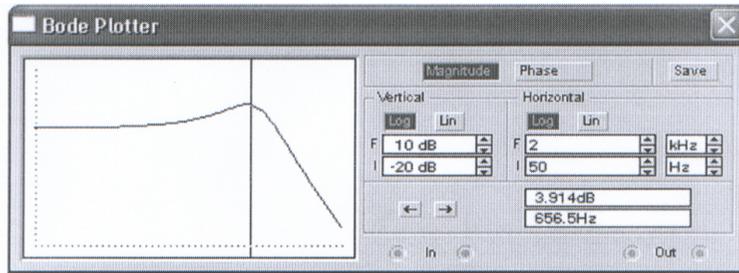


Рис. 3 (б). АЧХ фильтра ФНЧ на основе многоконтурной обратной связи

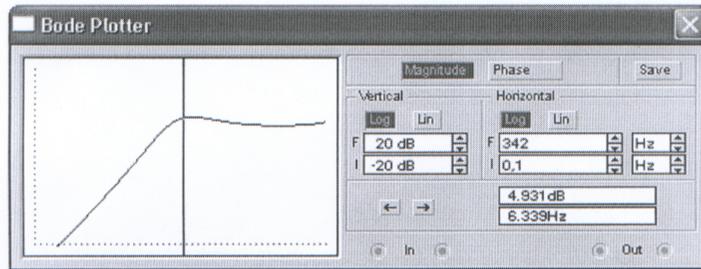


Рис. 3 (в). АЧХ фильтра ФВЧ на основе многоконтурной связи

кренности установки визирной линейки оказалось невозможным установить ее на расчетное значение частоты ω_0 .

Из сравнения схем на рис. 1 и 3 видно, что фильтры с многоконтурной обратной связью по числу элементов являются более простыми. Дополнительное упрощение схемы достигается в фильтрах с повторителем напряжения на ОУ (рис. 4). Для расчета параметров такого фильтра используются следующие формулы (для ФНЧ и ФВЧ):

$$\omega_0 = 1/(R1 \cdot R2 \cdot C2 \cdot C3)^{1/2};$$

$$d = (R2 \cdot C2 / R1 \cdot C1)^{1/2} + (R1 \cdot C2 / R2 \cdot C1)^{1/2} + (R1 \cdot C1 / R2 \cdot C2)^{1/2} - K_0 (R1 \cdot C1 / R2 \cdot C2)^{1/2}.$$

Для полосовых фильтров коэффициент $A = d \cdot K_0 \omega \omega_0$, а фазовый угол $\varphi = \pi + B$. Для их схемной реализации используется такие же RC-цепи, как в рассмотренных ФНЧ и ФВЧ.

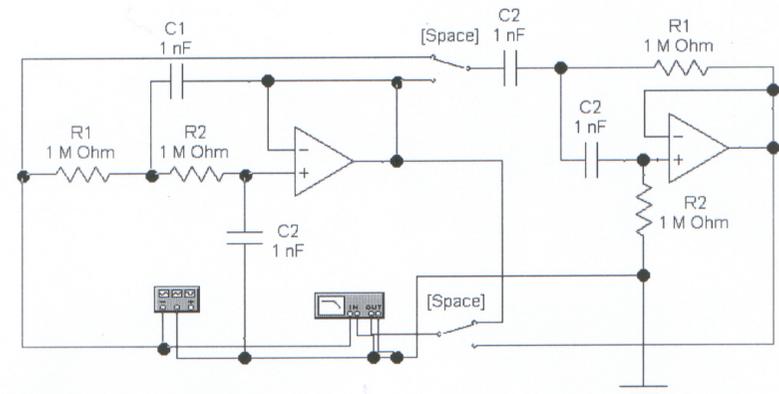


Рис. 4. Схемы фильтра ФНЧ ФВЧ на базе повторителя напряжения

Полосовый фильтр на базе двойного Т-моста (рис. 5, а) обеспечивает высокую добротность, однако при этом требуется поддерживать условие его баланса ($C1 = 2C2$; $R3 = R2/2$), что может быть обеспечено только при использовании прецизионных резисторов и конденсаторов. При условии выполнения баланса параметры фильтра рассчитываются по формулам:

$$K_0 = 2R4 - R2/R1(R4 + 2R2) = 2 \cdot 10^6 - 10^4/2 \cdot 10^4(10^6 + 2 \cdot 10^4) = 0,98;$$

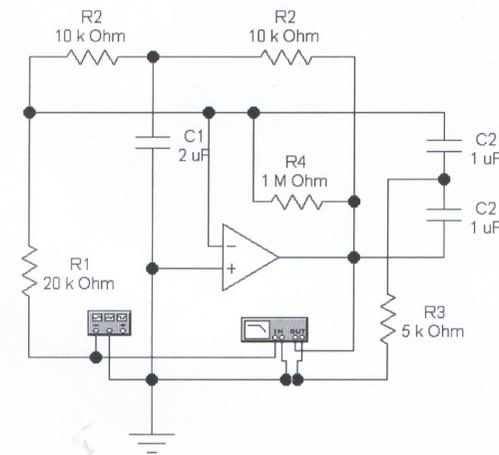


Рис. 5 (а). Полосовой фильтр на базе Т-моста

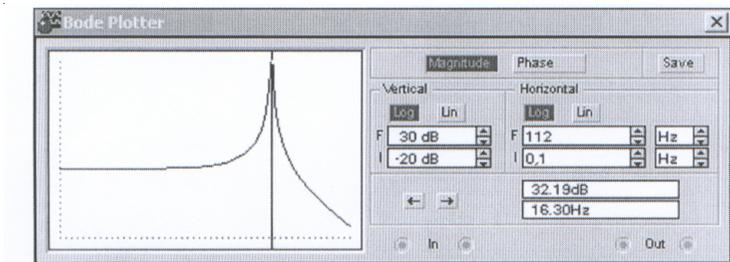


Рис. 5. АЧХ полосового фильтра на базе Т-моста

$$\omega_0 = (1 + 2R_2/R_4)^{1/2} / R_2 C_2 = (1 + 2 \cdot 10^4 / 10^6)^{1/2} / 10^4 \cdot 10^{-6} = 101 \text{ c}^{-1} = 16,08 \text{ Гц};$$

$$d = 2R_2/R_4(1 + 2R_2/R_4)^{1/2} = 2 \cdot 10^4 / 10^6 (1 + 2 \cdot 10^4 / 10^6)^{1/2} = 0,0198,$$

коэффициент передачи на частоте ω_0 равен $K_0/d = 49,5 = 33,9 \text{ дБ}$, т.е. расчетные данные достаточно хорошо согласуются с результатами моделирования (см. АЧХ на рис. 5, б). Сопоставление результатов расчета и моделирования позволяет скорректировать формулу для K_0 , (аналогичная формула в [1] справедлива только для $2R_2 \gg R_4$).

Параметры ПФ с многопетлевой обратной связью (рис. 6) выбирается с помощью формул:

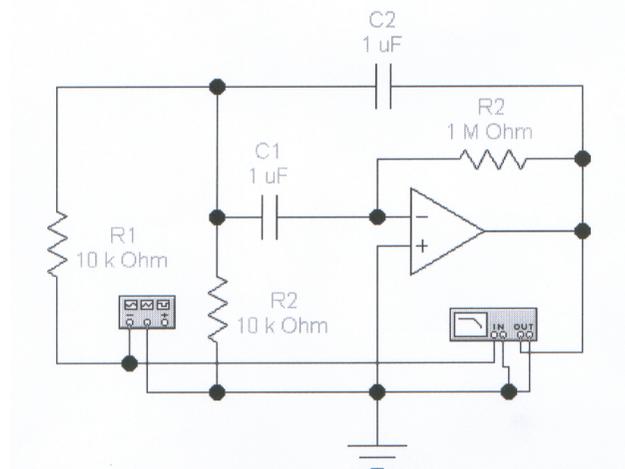


Рис 6(a). Полосовой фильтр с многопетлевой обратной связью

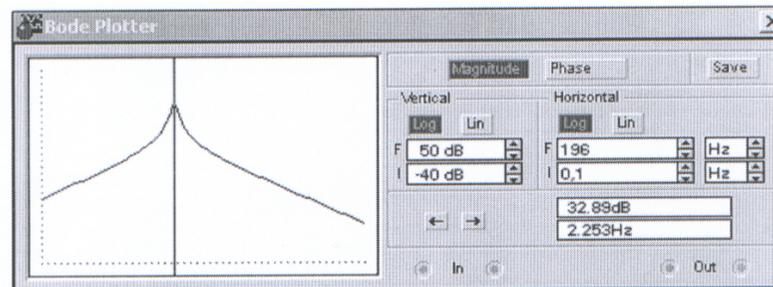


Рис. 6 (б). АЧХ полосового фильтра с многопетлевой обратной связью

$$K_0 = R_3/R_1(1 + C_2/C_1);$$

$$\omega_0 = [(1/R_1 + 1/R_2)/R_3 \cdot C_1 \cdot C_2];$$

$$d = [1/(1/R_1 + 1/R_2) \cdot R_3]^{1/2} [(C_1/C_2)^{1/2} + (C_2/C_1)^{1/2}].$$

В ПФ на рис. 7, а реализована возможность регулирования затухания и следовательно, полосы пропускания при неизменной резонансной частоте (в данном случае — 22,8 Гц). Это достигается изменением коэффициента усиления $K = R_5/R_4$.

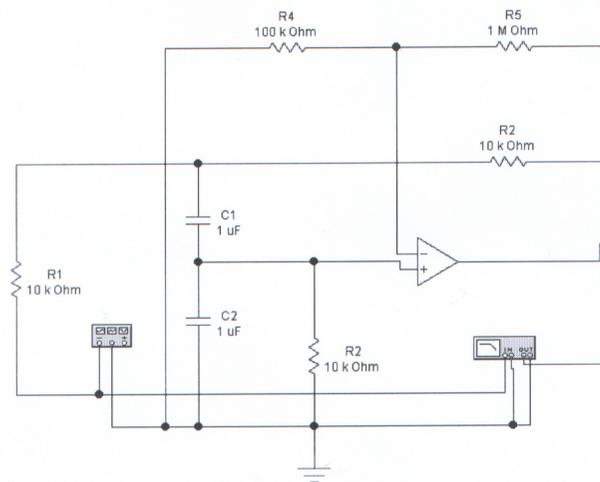


Рис. 7 (а). Полосовой фильтр с многопетлевой обратной связью и регулируемым затуханием

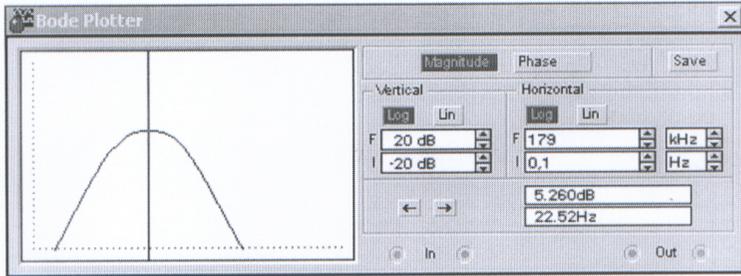


Рис. 7 (б). АЧХ полосового фильтра с многпетлевой обратной связью и регулируемым затуханием

Параметры фильтра определяются формулами:

$$K^0 = K[1+R1/R3+(C2/C1)(1+R1/R2)+(1-K)(R1/R2)];$$

$$\omega^0 = [(1/R1+1/R2)/R3 \cdot C1 \cdot C2]^{1/2};$$

$$d = [R3/(1/R1+1/R2)]^{1/2} \{ [1/R1+1/R3+(1-K)/R3](C1/C2)^{1/2} + (1/R1+1/R2)(C2/C1) \}.$$

При использовании в ПФ положительной обратной связи удастся реализовать избирательное устройство с достаточно высокой добротностью. Схема ПФ с использованием Т-моста показана на рис. 8, а. Резонансная частота, Гц

$$\omega^0 = 1/R \cdot C = 1/10^4 \cdot 10^{-8} = 10000 c^{-1} = 1,58 \text{ кГц};$$

$$K_0 = 1+R2/R1 = 1+2 \cdot 10^4 / 10,1 \cdot 10^3 = 2,961;$$

$$d = (3-K_0)/2 = 0,0195,$$

коэффициент передачи на резонансной частоте

$$K_0/d = 151,85 = 43,6 \text{ дБ},$$

т.е. расчетные данные согласуются с результатами моделирования на рис. 8, б.

Широкополосные полосовые фильтры можно реализовать путем последовательного включения рассмотренных ФВЧ, ФНЧ или ПФ. Если к АЧХ таких фильтров предъявляются специальные требования по неравномерности коэффициента передачи в полосе пропускания и крутизне, то в таком слу-

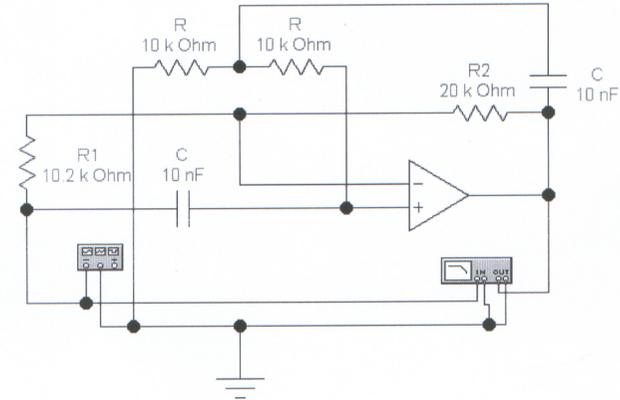


Рис. 8 (а). ПФ с высокой добротностью

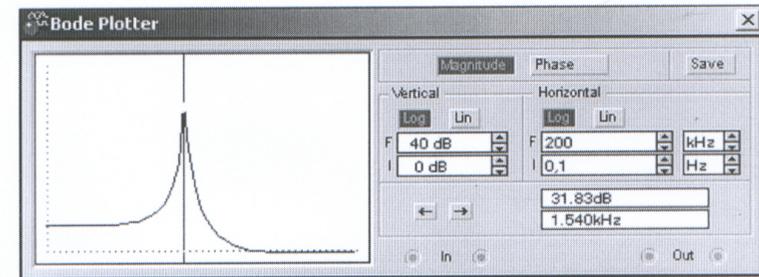


Рис. 8 (б). АЧХ ПФ с высокой добротностью

чае используются фильтры, АЧХ которых описывается полиномами Баттерворта, Чебышева и Бесселя; для расчета таких фильтров применяются специальные таблицы [1; 2].

Фильтры Баттерворта характеризуются максимально плоской АЧХ в полосе пропускания. Управление величиной выходного напряжения и перестройка по частоте в широком диапазоне осуществляются в этих фильтрах проще, чем в других, поскольку при каскадном соединении все секции настраиваются на одну и ту же частоту.

Фильтры Чебышева обеспечивают наивысшую крутизну АЧХ в переходной полосе частот. Однако, при этом АЧХ в полосе пропускания приобретает колебательный характер.

Чем больше неравномерность в полосе пропускания, тем выше крутизна затухания в переходной полосе частот.

Фильтры Бесселя обладают максимально плоской характеристикой группового времени запаздывания (производная от ФЧХ по частоте) и линейностью ФЧХ в полосе пропускания. Однако крутизна затухания фильтра невелика.

В качестве примера рассмотрим ВЧ-фильтр Баттерворта (рис. 9, а), построенный на трех последовательно включенных ФВЧ по схеме (рис. 4) с тем отличием, что в усилителе каждой секции ФВЧ предусмотрена возможность установки коэффициента усиления за счет изменения сопротивления резисторов R_1 , R_2 , R_3 что позволяет изменять затухание каждой секции в соответствии с расчетным значением. Частота среза каждой секции ФВЧ одинакова и равна $1/RC = 1/10^{-8} \cdot 10^6 = 100c^{-1} = 15,92$ Гц; согласно расчетным данным, в полосе пропускания фильтр имеет коэффициент передачи 12,4 дБ при крутизне АЧХ 120 дБ/дек.

Из АЧХ рассматриваемого фильтра (рис. 9, б) видно, что частота среза по уровню $12,4 - 3 = 9,4$ дБ практически равна расчетной. Крутизна АЧХ, полученной путем измерения коэффициента передачи на частотах 1 и 10 Гц, также соответствует расчетному значению 120 дБ/дек.

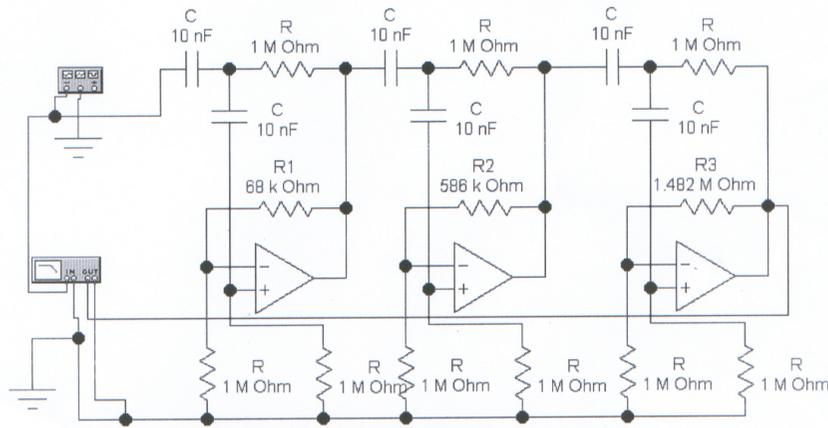


Рис. 9 (а). ФВЧ Баттерворта 6-го порядка

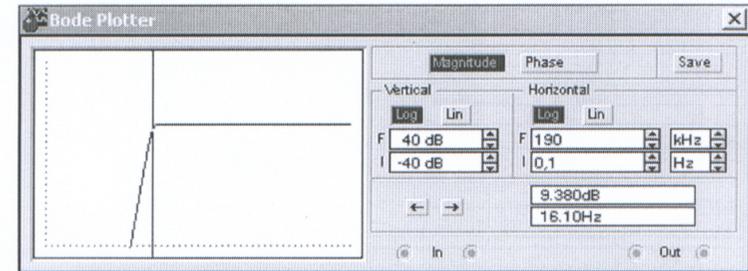


Рис. 9 (б). АЧХ ФНЧ Баттерворта 6-го порядка

Рассмотрим режекторный фильтр (рис. 10, а). Он относится к фильтрам третьего порядка. Сопротивление резистора R_1 выбирается из условия $R_1 = R/12$; частота режекции $\omega_p = 1/RC = 1/12 \cdot 10^4 \cdot 10^{-8} = 1443.4c^{-1} = 229.8$ Гц, практически совпадает с полученным при моделировании (см. рис. 10, б); аналитическое выражение для затухания в работе отсутствует; с уменьшением коэффициента деления делителя (на выходе ОУ) затухание уменьшается.

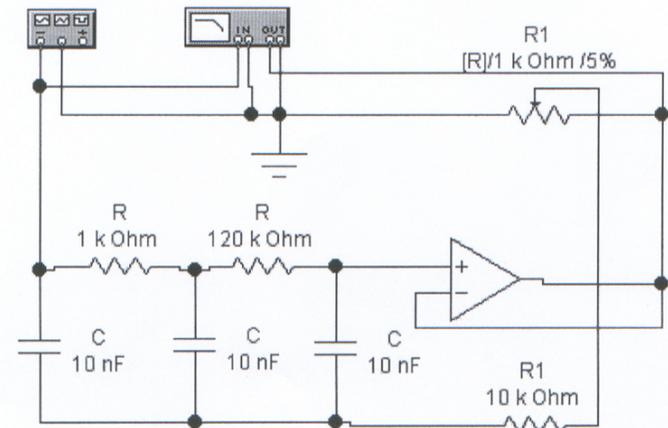


Рис 10 (а). Режекторный фильтр

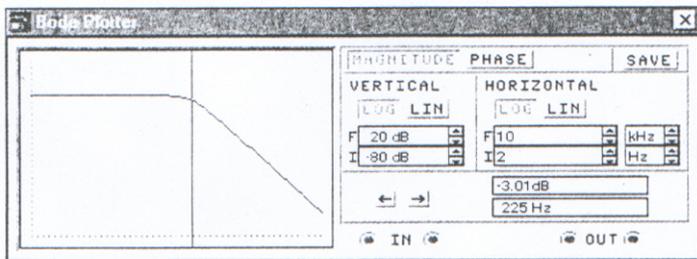


Рис. 10 (б). АЧХ Режекторный фильтр

Контрольные вопросы и задания

1. Какими недостатками обладают пассивные фильтры?
2. Просуммировав значения коэффициентов передач (в дБ) фильтров на рис. 3 на частотах 10...1000 Гц, постройте суммарную АЧХ и проверьте результат проделанной работы на модели (ключи *Z* и *X* переводятся в положение, противоположное показанному на рис. 3, *a*).
3. Проведите расчет параметров фильтров на рис. 4 и проверьте их моделированием.
4. Проведите сравнительный анализ по крутизне АЧХ фильтров на рис. 1-4 при затухании $d = 1,414$.
5. Достоинством фильтров на рис. 4 является возможность введения элементов, обеспечивающих регулировку затухания при неизменной частоте среза. Введите в схему такие элементы и проведите ее испытания.
6. Проведите расчет параметров фильтров на рис. 6 и 7 сравните полученные данные с результатами моделирования, представленными на этих рисунках.
7. Для фильтров на рис. 1-7 проведите расчет ФЧХ (см. формулу 1) и полученные данные сравните с результатами моделирования.
8. Используя свойство дуальности, преобразуйте схему фильтра на рис. 9 в ФНЧ Баттерворта 6-го порядка (сопротивления резисторов $R1...R3$ остаются без изменений).

Литература

1. Щербakov В.И., Грездов Г.И. «Электронные схемы на операционных усилителях». Справочник. — Киев: Техника, 1983, — 213 с.