

**Министерство общего и профессионального образования  
Российской Федерации**

**Ульяновский государственный технический университет**

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ФИЛЬТРОВ**

**Методические указания по курсовому проектированию для  
студентов, обучающихся по направлению 5515**

**Ульяновск 1999**

**Министерство общего и профессионального образования  
Российской Федерации**

**Ульяновский государственный технический университет**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ФИЛЬТРОВ**

**Методические указания по курсовому проектированию для  
студентов, обучающихся по направлению 5515**

**Составитель И. П. Ефимов**

**Ульяновск 1999**

# **ВВЕДЕНИЕ**

## **1. ФИЛЬТРЫ И ИХ ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ**

### **1.1. Основные параметры фильтров**

## **2. ВЫБОР СЕМЕЙСТВА ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ**

### **2.1. Нормирование исходных данных для расчета фильтров**

### **2.2. Нормирование АЧХ ФНЧ**

### **2.3. Нормирование АЧХ ФВЧ**

### **2.4. Нормирование АЧХ ПФ**

### **2.5. Нормирование АЧХ режекторного фильтра**

## **3. ТИПОВЫЕ СЕМЕЙСТВА АЧХ ФИЛЬТРОВ**

## **4. Табличный метод расчета пассивных LC-фильтров.**

### **4.1. Масштабирование по частоте и импедансу**

### **4.2. Типовые схемы фильтров и параметры их элементов**

### **4.3. Расчет ФНЧ**

### **4.4. Расчет ФВЧ**

### **4.5. Расчет ПФ**

## **5. РАСЧЕТ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ**

### **5.1. Расчет ФНЧ**

### **5.2. Расчет ФВЧ**

### **5.3. Расчет ПФ**

### **5.4. Расчет РФ**

## **Список литературы**

# ВВЕДЕНИЕ

В процессе разработки электронных устройств часто необходимо обеспечивать фильтрацию аналоговых сигналов. Это достигается за счет введения в схему устройства пассивных и активных фильтров, решающих задачи преобразования спектра сигнала.

Проектирование фильтров представляет собой формализованный процесс. В настоящих методических указаниях рассматривается табличный метод расчета, заключающийся в том, что по требуемой характеристике устройства из типовых звеньев составляется принципиальная схема, для которой из справочных таблиц берутся номиналы электрорадиоэлементов. Дальнейшая задача разработки заключается в масштабировании номинальных значений элементов схемы по частоте и импедансам источника входного сигнала и нагрузки.

Приведенные методики расчета и справочные данные достаточны для синтеза фильтров в рамках выполнения курсового проекта по дисциплине «Электроника» студентами направления 5515 «Приборостроение».

## 1. ФИЛЬТРЫ И ИХ ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Фильтром называется устройство, устанавливаемое между выводами электрической цепи с целью изменения соотношения между частотными составляющими, проходящего через него сигнала.

В зависимости от формы амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) различают четыре основных класса фильтров (рис. 1.1):

- 1) фильтр нижних частот (ФНЧ), см. рис.1.1а;
- 2) фильтр верхних частот (ФВЧ), см. рис.1.1б;
- 3) полосовой фильтр (ПФ), см. рис.1.1в;
- 4) режекторный фильтр (РФ), см. рис.1.1г.

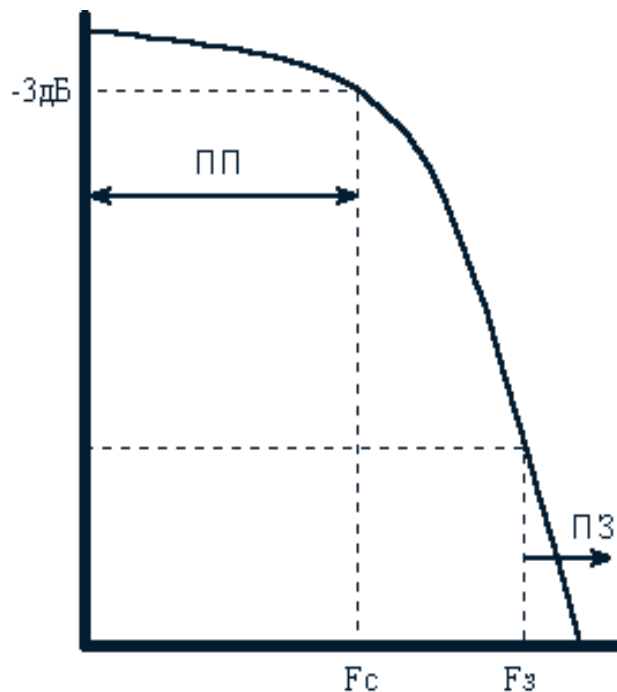
### 1.1. Основные параметры фильтров

1) Частота среза ( $F_C$ ).  $F_C$  определяет границу полосы пропускания (ПП) фильтра и в реальных фильтрах обычно соответствует уровню затухания 3 дБ.

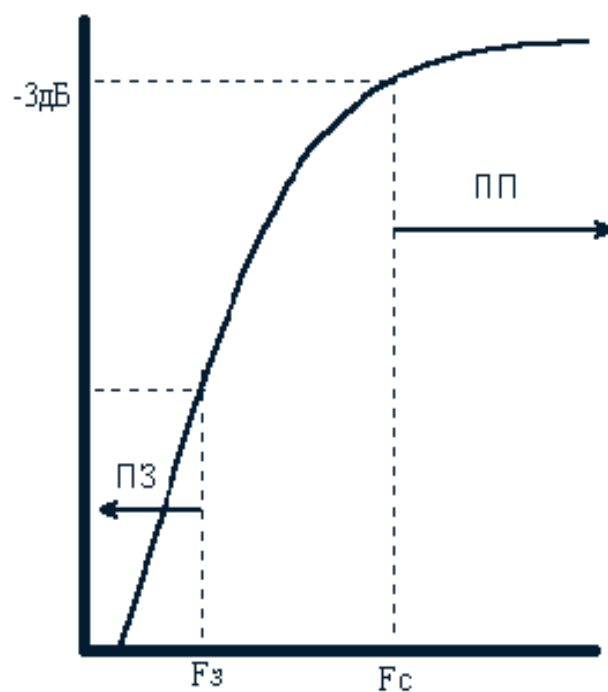
2) Центральная частота ( $F_0$ ). Важным свойством ПФ является геометрическая симметрия его АЧХ. Это означает, что если по горизонтальной оси отложить логарифм частоты, а по вертикальной – величину затухания и построить АЧХ фильтра, то она окажется симметричной относительно некоторой центральной частоты  $F_0$ :

$$F_0 = \sqrt{(F_{C1} \cdot F_{C2})}, \quad (1.1)$$

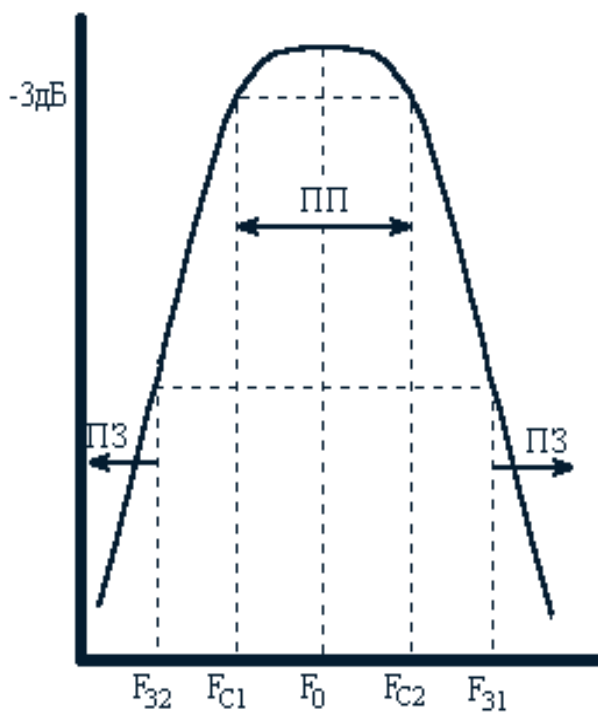
где  $F_{C1}$ ,  $F_{C2}$  – нижняя и верхняя частоты среза.



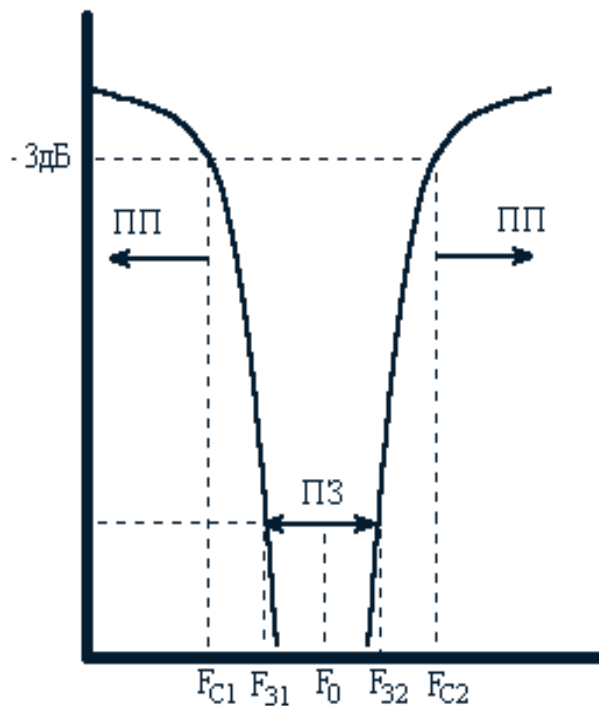
а



б



в



г

**Рис 1.1. АЧХ типовых фильтров:**

- а) ФНЧ - фильтр низких частот,
- б) ФВЧ - фильтр высоких частот,
- в) ПФ - полосовой фильтр,
- г) РФ - режекторный фильтр

Для узкополосных фильтров ( $F_{C2} / F_{C1} < 1,5$ ):

$$F_0 = \frac{F_{C1} + F_{C2}}{2}. \quad (1.2)$$

3) Граничная частота полосы задержания ( $F_3$ ). Между ПП и полосой задержания (ПЗ) располагается переходная область.  $F_3$  – это такая частота в этой зоне, для которой задается гарантированный уровень затухания спектральных составляющих сигнала.

4) Добротность ( $Q$ ). Определяется как отношение  $F_0$  ПФ к ширине его ПП:

$$Q = \frac{F_0}{F_{C2} - F_{C1}}. \quad (1.3)$$

Альтернативным показателем является относительная ширина ПП, определяемая соотношением:

$$B = \frac{F_{C2} - F_{C1}}{F_0} \cdot 100\%. \quad (1.4)$$

5) Коэффициент формы КФ. Для ПФ  $K_f$  определяется отношением ширины ПЗ к ширине ПП. При этом ширина ПЗ измеряется на уровне гарантированного затухания, который задается в качестве исходного при расчете фильтров и обычно составляет 40 дБ.

## 2. ВЫБОР СЕМЕЙСТВА ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ

С целью унификации процесса расчета фильтров различного класса существует единая методика, в соответствии с которой первым этапом синтеза фильтра является нормирование исходных данных для его расчета.

### 2.1. Нормирование исходных данных для расчета фильтров

Правило нормировки требует, чтобы все АЧХ ФНЧ пересекали уровень затухания 3 дБ на нормированной частоте  $\omega = 1$  рад. Такой фильтр и его АЧХ называются нормированными к 1 рад. Поэтому общим элементом расчета любого фильтра является, в первую очередь, преобразование его исходных данных к виду, позволяющему воспользоваться нормированными АЧХ ФНЧ. Это достигается с помощью нормирования исходных данных, характеризующих АЧХ искомого фильтра к 1 радиану. Далее производится сравнение полученной нормированной АЧХ с набором кривых, описывающих нормированные ФНЧ различного порядка, и выбирается та из них, которая наилучшим образом соответствует нормированным исходным данным. Затем по таблицам, в соответствии с выбранным порядком фильтра, определяются значения параметров элементов схемы. Затем полученные значения масштабируются для того, чтобы обеспечить требуемое положение АЧХ на оси частот.

## 2.2. Нормирование АЧХ ФНЧ

**Пример 1.** Требуется ФНЧ с частотой среза 600 Гц и граничной частотой ПЗ 1800 Гц при гарантированном затухании 50 дБ. Произвести нормировку АЧХ фильтра к 1 радиану и определить, фильтр какого порядка может обеспечить выполнение заданных требований.

Решение. Вычисляем крутизну характеристики фильтра:

$$A_S = \frac{F_3}{F_C}. \quad (2.1)$$

Затем по графикам нормированных кривых ФНЧ различного порядка выбираем такой фильтр, который при рассчитанной  $A_S$  обеспечивал бы гарантированное затухание в ПЗ не менее заданного.

$$A_S = \frac{1800}{600} = 3.$$

Воспользуемся графиком (рис.2.1), на котором представлено семейство нормированных АЧХ ФНЧ различного порядка, и определим, фильтр какого порядка обеспечивает гарантированное затухание в полосе задержания 50 дБ при 3 рад. Как видно из рис.2.1.а, этим требованиям удовлетворяют ФНЧ не менее 5-го порядка.

## 2.3. Нормирование АЧХ ФВЧ

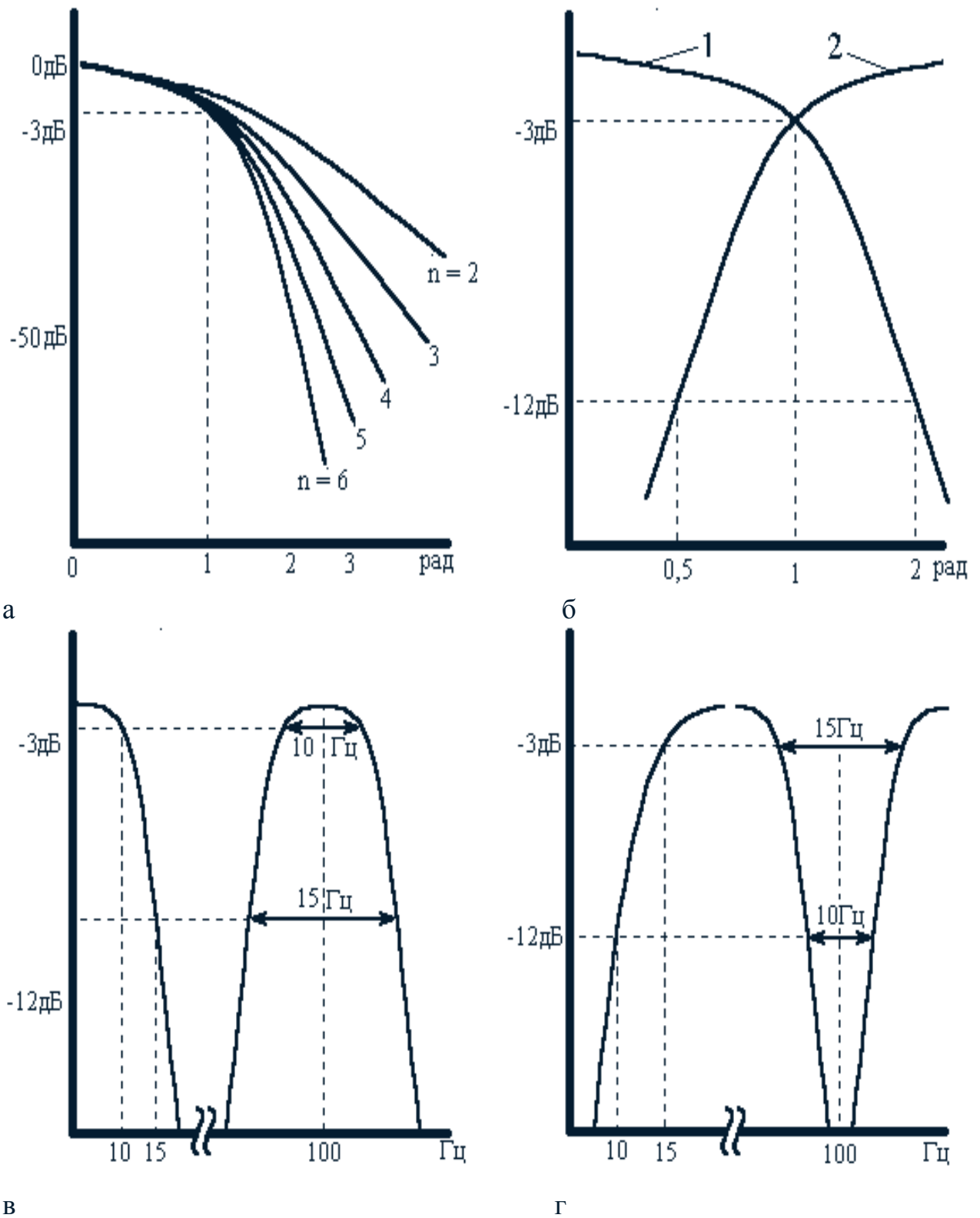
**Пример 2.** Требуется ФВЧ с  $F_C = 900$  Гц, у которого на уровне гарантированного затухания 50 дБ граничная частота ПЗ равна 300 Гц. Провести нормировку АЧХ к 1 рад и определить с помощью рис.2.1а минимальный порядок фильтра, удовлетворяющий предъявленным требованиям.

Решение. Каждый нормированный ФНЧ может быть преобразован в нормированный ФВЧ, АЧХ которого также пересекает уровень 3 дБ при 1 рад (рис.2.1б). Оба фильтра ФНЧ (кривая 1) и ФВЧ (кривая 2) имеют идентичное затухание на взаимно обратных частотах. Так, затухание 12 дБ ФНЧ имеет в точке 2 рад, а преобразованный ФВЧ обеспечивает то же затухание при 0.5 рад. Поэтому крутизна АЧХ ФВЧ является величиной, обратной крутизне ФНЧ. Следовательно, для ФВЧ справедливо:

$$A_S = \frac{F_C}{F_3}. \quad (2.2)$$

В нашем случае  $A_S = 900/300 = 3$ . Из рис.2.1а видно, что гарантированное затухание 50 дБ при 3 рад обеспечивает фильтр 5-го порядка.

Стандартный алгоритм расчета фильтра в качестве следующего этапа включает определение значений параметров элементов схемы (R,L,C). Для нормированного ФНЧ они помещены в справочных таблицах, что позволяет, зная порядок фильтра, легко их определить.



**Рис. 2.1. К вопросу выбора семейств характеристик фильтров:**

- а) ФНЧ различных порядков,
- б) взаимосвязь АЧХ фильтров низких и верхних частот,
- в) взаимосвязь АЧХ полосового фильтра и ФНЧ,
- г) взаимосвязь АЧХ режекторного фильтра и ФНЧ



Если, как в рассматриваемом примере, синтезируется ФВЧ, то полученная схема ФНЧ с помощью стандартной процедуры трансформируется в схему ФВЧ.

## 2.4. Нормирование АЧХ ПФ

ПФ делятся на две группы: узкополосные ( $F_{C2}/F_{C1} \leq 1,5$ ) и широкополосные ( $F_{C2}/F_{C1} > 1,5$ ).

**Пример 3.** Требуется ПФ, имеющий нижнюю и верхнюю частоты среза соответственно 150 и 300 Гц и гарантированное затухание 50 дБ на граничных частотах полосы задержания 50 и 900 Гц. Провести нормировку АЧХ данного ПФ к 1 рад и с помощью рис.2.1а подобрать наиболее подходящий фильтр.

*Решение.* Данный фильтр является широкополосным ( $300/150=2$ ). Широкополосный ПФ можно рассматривать как два отдельных фильтра (ФНЧ и ФВЧ), каждый со своими характеристиками. Последние затем нормируются отдельно, и в соответствии с уже рассмотренными процедурами выбирается минимальный порядок ФНЧ и ФВЧ, обеспечивающий заданные требования. Если далее выбранные фильтры соединить последовательно, то будут соблюдены общие требования к ПФ.

В нашем случае требуемый ПФ может быть составлен из двух последовательно соединенных фильтров 5-го порядка (рис.2.1а)

ФНЧ: 3 дБ на 300 Гц	ФВЧ: 3 дБ на 150 Гц
50 дБ на 900 Гц	50 дБ на 50 Гц
$A_S = 900/300 = 3,$	$A_S = 150/50 = 3.$

**Пример 4.** Требуется ПФ с  $F_{C1}=900$  Гц и  $F_{C2}=1100$  Гц, имеющий гарантированное затухание 50 дБ на граничных частотах 700 Гц и 1300 Гц. Провести нормировку АЧХ данного ПФ к 1 рад и с помощью рис.2.1,а подобрать наиболее подходящий фильтр.

*Решение.* Данный фильтр является узкополосным. Такие фильтры нельзя представить в виде 2-х отдельных фильтров – ФНЧ и ФВЧ. Задача синтеза такого фильтра решается использованием правила преобразования АЧХ ФНЧ в АЧХ ПФ так, чтобы ширина полосы пропускания оставалась постоянной (рис.2.1в). Как видно из рис.2.1в, соответствие между АЧХ этих фильтров состоит в том, что при одном и том же уровне затухания ширина ПП ПФ равна частоте среза ФНЧ. Так, на уровне -3 дБ ширина ПП ПФ равна 10 Гц – так же, как и частота среза ФНЧ. Аналогичным образом на уровне -12 дБ соответствующие величины равны 15 Гц.

Рассмотренное правило позволяет вести расчет узкополосных ПФ. Оно заключается в преобразовании АЧХ искомого ПФ к АЧХ ФНЧ и использовании, как это имело место выше, нормированных кривых, отображающих АЧХ ФНЧ различного порядка.

Для этого сперва определяем центральную частоту  $F_0$  по формуле (1.1) или (1.2):

Если  $F_0$  известна, необходимо обеспечить равенство (2.1). С этой целью для уровня гарантированного затухания определяют две новых пары

граничных частот ПЗ: одну, задавшись  $F_0$  и нижней граничной частотой  $F_{31}$ , а другую –  $F_0$  и верхней граничной частотой  $F_{32}$ . Для дальнейших расчетов берется та пара частот ( $F_{31}, F_{32}$ ), которая дает меньшее значение ширины полосы задержания.

Крутизна ПФ находится следующим образом:

$$A_s = \frac{\text{ширина ПЗ}}{\text{ширина ПП}} = \frac{F_{32} - F_{31}}{F_{C2} - F_{C1}}, \quad (2.3)$$

где  $F_{31}, F_{32}$  – частоты выбранной пары.

После этого, используя график нормированных АЧХ ФНЧ, можно выбрать фильтр такого порядка, который обеспечивает гарантированное затухание для требуемой величины  $A_s$ .

Для рассматриваемого случая в соответствии с (1.1):

$$F_0 = \sqrt{900 \cdot 1100} = 995 \text{ Гц}.$$

Определим для каждой из граничных частот ПЗ геометрически сопряженные частоты:

– первая пара

$$F_{31} = 700 \text{ Гц},$$

$$F_{32\text{сопр.}} = 995^2 / 700 = 1414 \text{ Гц},$$

$$F_{32\text{сопр.}} - F_{31} = 1414 - 700 = 714 \text{ Гц}.$$

– вторая пара

$$F_{32} = 1300 \text{ Гц},$$

$$F_{31\text{сопр.}} = 995^2 / 1300 = 762 \text{ Гц},$$

$$F_{32} - F_{31\text{сопр.}} = 1300 - 762 = 538 \text{ Гц}.$$

Вторая пара частот выбирается для дальнейших расчетов, т.к. она обеспечивает минимальную ширину ПЗ.

$$A_s = \frac{538}{200} = 2,69$$

Из рис.2.1а видно, что при 2,69 рад затухание не менее 50 дБ обеспечивает фильтр шестого порядка. В дальнейшем нормированный ФНЧ должен быть приведен к требуемому ПФ.

## 2.5. Нормирование АЧХ режекторного фильтра

**Пример 5.** Требуется РФ, АЧХ которого удовлетворяет следующим требованиям: нижняя и верхняя частоты среза равны 900 и 1100 Гц соответственно, а гарантированное затухание 50 дБ обеспечивается на граничных частотах 970 и 1030 Гц.

Решение. Связь АЧХ ФВЧ и РФ представлена на рис.2.4г. Параметры АЧХ ФВЧ должны быть таковы, чтобы при одинаковом затухании ширина ПЗ РФ равнялась граничной частоте ФВЧ. Например, в РФ ширине полосы 15 и 10 Гц соответствует такое же затухание, как и в ФВЧ на частотах 15 и 10 Гц (рис.2.4г).

Методика расчета РФ состоит в следующем:

1. С помощью (1.1) или (1.2) определяем  $F_0$ ;

2. Аналогично примеру 4 определяем пары геометрически сопряженных частот и выбираем для расчетов ту из них, которая дает наибольшую разность, а не наименьшую, как в случае ПФ;

3. Находим крутизну

$$A_s = \frac{F_{c2} - F_{c1}}{F_{32} - F_{31}}. \quad (2.4)$$

4. Используя рис.2.1а, определяем порядок фильтра;

5. Схема нормированного ФНЧ должна быть преобразована в ФВЧ и затем сведена к соответствующему РФ.

Для рассматриваемого случая в соответствии с (1.1):

$$F_0 = \sqrt{900 \cdot 1100} = 995 \text{ Гц.}$$

Определим для каждой из граничных частот ПЗ геометрически сопряженные частоты:

- первая пара

$$F_{31} = 970 \text{ Гц,}$$

$$F_{32\text{сопр.}} = 995^2 / 970 = 1021 \text{ Гц,}$$

$$F_{32\text{сопр.}} - F_{31} = 1021 - 970 = 51 \text{ Гц.}$$

- вторая пара

$$F_{32} = 1030 \text{ Гц,}$$

$$F_{31\text{сопр.}} = 995^2 / 1030 = 961 \text{ Гц,}$$

$$F_{32} - F_{31\text{сопр.}} = 1030 - 961 = 69 \text{ Гц.}$$

Для дальнейших расчетов принимаем вторую пару частот.

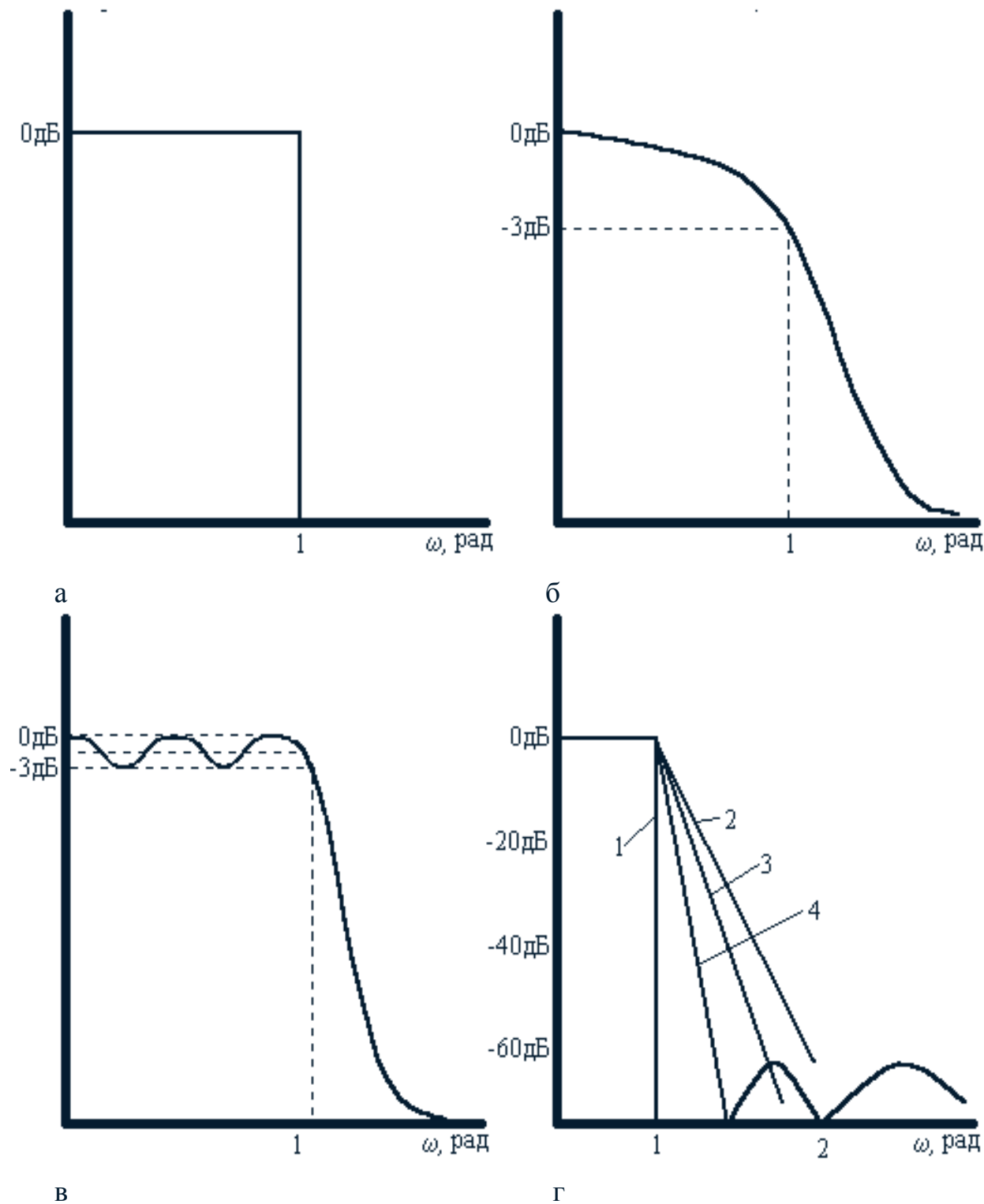
$$A_s = \frac{200}{69} = 2,9$$

Из рис.2.1а видно, что затухание не менее 50 дБ при 2,9 рад обеспечивает схема фильтра 5-го порядка.

### 3. ТИПОВЫЕ СЕМЕЙСТВА АЧХ ФИЛЬТРОВ

АЧХ идеального нормированного ФНЧ представлена на рис.3.1а. Он пропускает без затухания все компоненты от постоянной составляющей до 1 рад, а вне полосы обеспечивает бесконечное затухание.

Аппроксимация идеального ФНЧ фильтром Баттерворта показана на рис.3.1б. Как видно из рис.3.1б, данная аппроксимация оказывается наиболее удачной на удалении от нормированной частоты среза 1 рад, а в окрестности этой точки она получается достаточно грубой.



**Рис. 3.1. АЧХ различных фильтров:**

- а) идеальный ФНЧ,
- б) фильтр Баттерворта,
- в) фильтр Чебышева,
- г) сравнение АЧХ различных фильтров одного порядка

Более точно воспроизводит АЧХ идеального ФНЧ кривая Чебышева (рис.3.1в). В области частоты среза АЧХ фильтра Чебышева является почти прямоугольной, а ее спуск к полосе задержания более крутой. Однако это новое качество достигается за счет определенных потерь неравномерности АЧХ в полосе пропускания.

Особенностью фильтров Баттерворта и Чебышева является то, что спектральные составляющие входного сигнала при прохождении через них испытывают различную временную задержку, что является причиной искажений сигнала внутри ПП. Однако известны фильтры, свободные от этого недостатка – фильтры Бесселя, которые однако обеспечивают более медленное затухание, по сравнению с другими фильтрами. Следует помнить, что у таких фильтров при преобразовании ФНЧ в ФВЧ, ПФ или РФ постоянство времени задержки внутри полосы пропускания не сохраняется.

Другую группу представляют эллиптические фильтры, АЧХ которых характеризуется наличием пульсаций в полосе задержания. Спуск АЧХ эллиптических фильтров к ПЗ самый крутой, см. рис.3.1г (1– идеальный ФНЧ, 2– ФНЧ Баттерворта, 3 – ФНЧ Чебышева, 4 – эллиптический ФНЧ). Семейства нормированных кривых затухания  $\gamma$  фильтров Баттерворта, Чебышева и Бесселя представлены на рис.3.2 (кривые затухания  $\gamma = F(\omega)$  аппроксимированы прямыми линиями с погрешностью не более 5%).

## 4. Табличный метод расчета пассивных LC-фильтров.

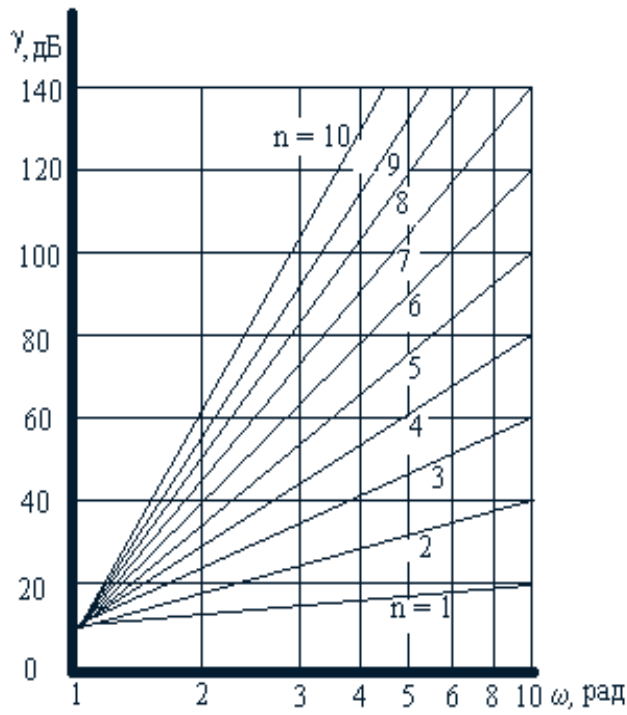
### 4.1. Масштабирование по частоте и импедансу

При расчетах фильтров часто используется одно важное с практической точки зрения их свойство: если значения параметров всех реактивных элементов фильтра поделить на некоторый частотный масштабный множитель  $K_f$ , то АЧХ нового фильтра будет аналогична АЧХ первичного фильтра, но окажется сдвинутой в другой частотный диапазон. При осуществлении масштабного сдвига АЧХ в качестве  $K_f$  выбирается отношение двух частот, соответствующих в АЧХ нового  $F_{нов.}$  и старого  $F_{ст.}$  фильтров одинаковому уровню затухания:

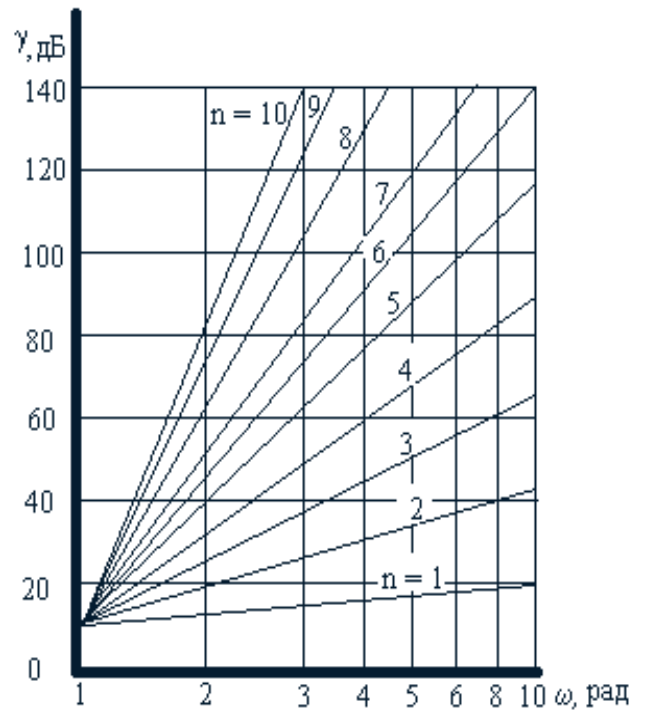
$$K_f = \frac{F_{нов.}}{F_{ст.}} \quad (4.1)$$

Чтобы определить вид АЧХ сдвинутого в другой частотный диапазон фильтра, достаточно просто умножить все единицы измерения на шкале частот на множитель  $K_f$ . Пример этой операции дан на рис.4.1 ( $K_f=10$ ). Деление значений всех реактивных элементов на 10 сдвигает во столько же раз АЧХ фильтра в сторону более высоких частот.

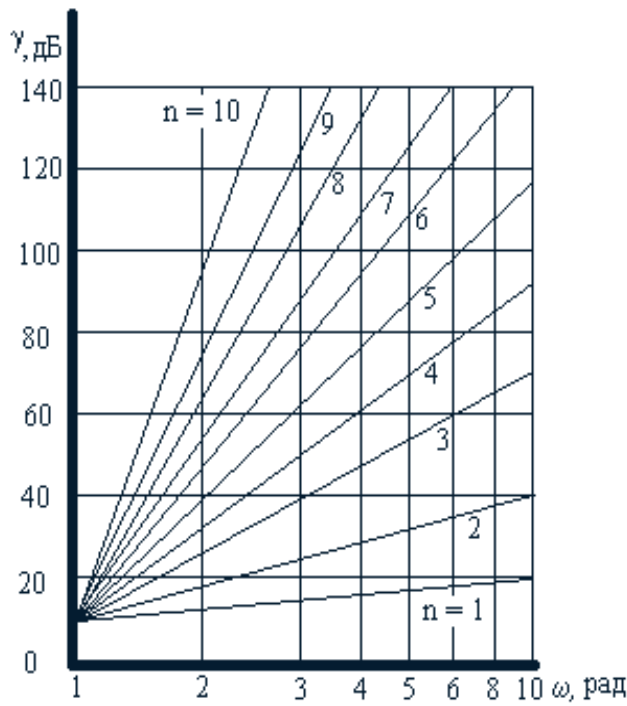
Величины сопротивлений источника сигнала (генератора) и нагрузки для искомого фильтра имеют очень малую величину – 1 Ом. На практике значения этих сопротивлений могут существенно отличаться от 1 Ом. В то же время желательно уменьшить емкость конденсатора. В противном случае практическая реализация фильтра (рис.4.1б) будет затруднительна – необходима емкость 141000 мкФ.



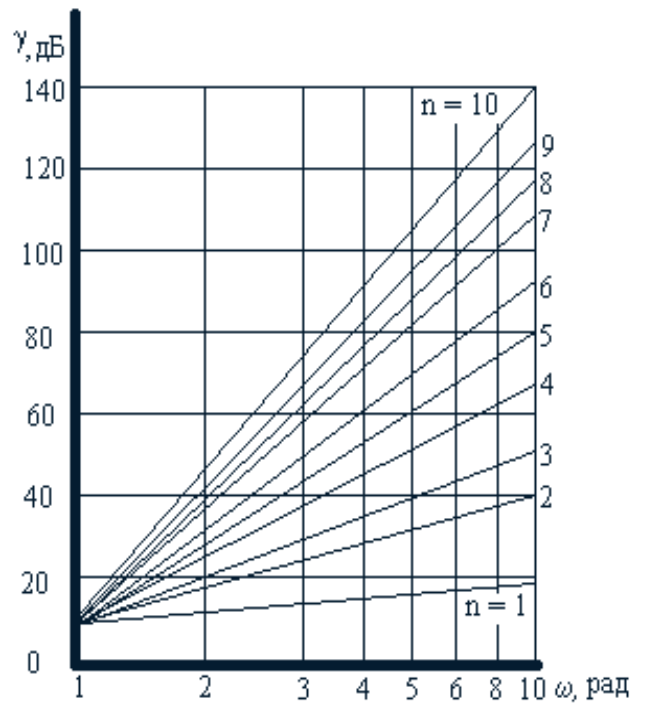
а



б



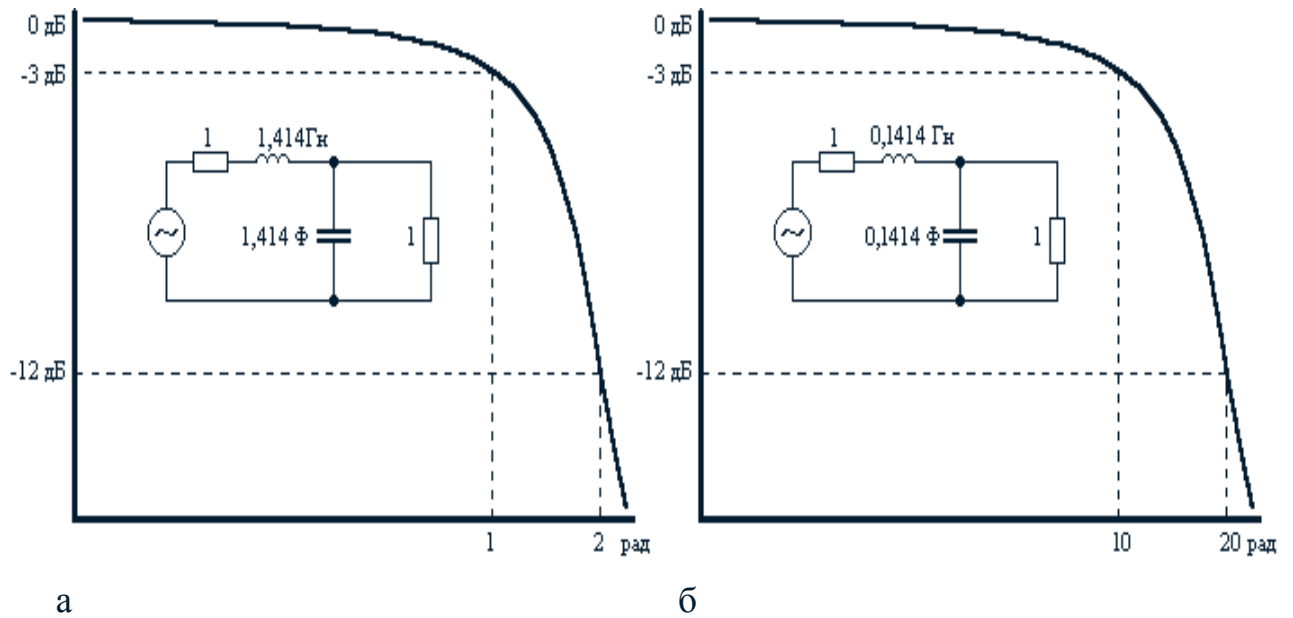
в



г

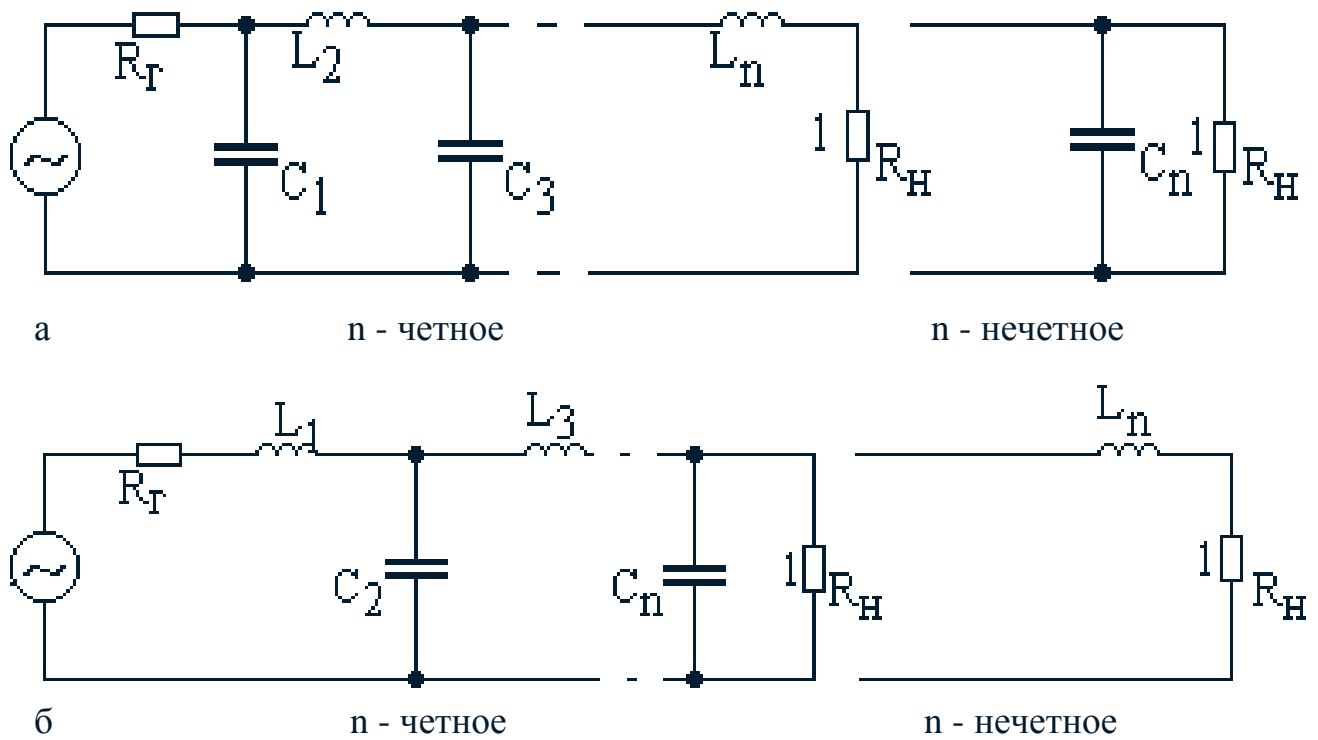
**Рис. 3.2. Затухание для некоторых фильтров:**

- а) фильтр Баттерворта,
- б) фильтр Чебышева с уровнем пульсаций 0,1 дБ,
- в) фильтр Чебышева с уровнем пульсаций 0,5 дБ,
- г) фильтр Бесселя



**Рис. 4.1. Масштабирование по частоте ФНЧ:**

- а) нормированный ФНЧ,
- б) масштабированный по частоте



**Рис. 4.2. Схемы - ФНЧ Баттерворта, Чебышева и Бесселя:**

- а) первый вариант,
- б) второй вариант

Выход из данного затруднения осуществляется с помощью операции, называемой масштабирование импеданса. Дело в том, что если полное сопротивление схемы фильтра увеличить в  $Z$  раз, то его АЧХ останется прежней. Для этого сопротивления резисторов и индуктивности катушек умножаются на  $Z$ , а емкости конденсаторов с целью обеспечения столь же кратного увеличения их импеданса делятся на  $Z$ .

При расчете фильтров масштабирование по частоте и импедансу производится одновременно:

$$R_M = Z \cdot R; \quad L_M = \frac{Z}{K_f} \cdot L; \quad C_M = \frac{1}{Z \cdot K_f} \cdot C, \quad (4.2)$$

где  $R_M$ ,  $L_M$ ,  $C_M$  - элементы схемы фильтра после его масштабирования по частоте и импедансу.

Использование (4.2) позволяет, применяя таблицы с заранее известными значениями элементов схем нормированных фильтров, легко рассчитывать как пассивные, так и активные фильтры. Задача сводится лишь к вычислению соответствующих масштабных множителей  $Z$  и  $K_f$ , обеспечивающих «перенос» АЧХ в подходящий диапазон по частоте и импедансу.

## 4.2. Типовые схемы фильтров и параметры их элементов

Любой из ФНЧ (Баттерворта, Чебышева или Бесселя) может быть реализован одним из двух вариантов схем, представленных на рис.4.2. Значения элементов этих схем для фильтров разного порядка даны в табл.4.1, 4.2, 4.3 и 4.4. В верхних колонках каждой из этих таблиц указаны два параметра: в «числителе» для первого варианта схемы, в «знаменателе» – для второго.

## 4.3. Расчет ФНЧ

**Пример 6.** Требуется ФНЧ, АЧХ которого удовлетворяет следующим требованиям: частота среза полосы пропускания - 3000 Гц; на граничной частоте 9000 Гц нужно обеспечить затухание не менее 25 дБ. Фильтр должен включаться между источником с сопротивлением 600 Ом и нагрузкой с таким же сопротивлением.

Решение. Синтез искомого фильтра должен включать в себя следующие этапы:

1. Нормирование исходных данных для расчета ФНЧ - вычисление крутизны  $A_S$  его АЧХ (см. раздел 2);
2. Выбор типа АЧХ и порядка фильтра;
3. Расчет частотного множителя  $K_f$  и величины  $Z$ ;
4. Масштабирование по частоте и импедансу параметров нормированного ФНЧ;
5. Получение подходящих параметров схемы.

Для требуемого фильтра  $A_S = F_3 / F_C = 9000 / 3000 = 3$ .



Таблица 4.1

## Параметры LC-ФНЧ Баттерворта

Поряд. Фильтра	R <sub>г</sub>	C1	L2	C3	L4	C5	L6	C7
	1/R <sub>г</sub>	L1	C2	L3	C4	L5	C6	L7
2	1,000	1,4142	1,4142	—	—	—	—	—
3	1,000	1,0000	2,0000	1,0000	—	—	—	—
4	1,000	0,7654	1,8478	1,8478	0,7654	—	—	—
5	1,000	0,6180	1,6180	2,0000	1,6180	1,6180	—	—
6	1,000	0,5176	1,4142	1,9319	1,9319	1,4142	0,5176	—
7	1,000	0,4450	1,2470	1,8019	2,0000	1,8019	1,2470	0,4450

Таблица 4.2

## Параметры LC-ФНЧ Чебышева с уровнем пульсаций 0,1 дБ

Поряд. Фильтра	R <sub>г</sub>	C1	L2	C3	L4	C5	L6	C7
	1/R <sub>г</sub>	L1	C2	L3	C4	L5	C6	L7
2	1,3554	1,2087	1,6382	—	—	—	—	—
3	1,0000	1,4328	1,5937	1,4328	—	—	—	—
4	1,3554	0,9924	0,1476	1,5845	1,3451	—	—	—
5	1,0000	1,3031	1,5559	2,2411	1,5559	1,7060	—	—
6	1,3554	0,9419	2,0797	1,6581	2,2473	1,5344	1,2767	—
7	1,0000	1,2615	1,5196	2,2392	1,6804	2,2392	1,5196	1,2615

Таблица 4.3

## Параметры LC-ФНЧ Чебышева с уровнем пульсаций 0,5 дБ

Поряд. Фильтра	R <sub>г</sub>	C1	L2	C3	L4	C5	L6	C7
	1/R <sub>г</sub>	L1	C2	L3	C4	L5	C6	L7
2	1,9841	0,9827	1,9497	—	—	—	—	—
3	1,0000	1,8636	1,2804	1,8636	—	—	—	—
4	1,9841	0,9902	2,5864	1,3036	1,8258	—	—	—
5	1,0000	1,8068	1,3025	3,6914	1,3025	1,8068	—	—
6	1,9841	0,9053	2,5774	1,3675	2,7133	1,2991	1,7961	—
7	1,0000	1,7896	1,2961	2,7177	1,3848	2,7177	1,2961	1,7896

Таблица 4.4

## Параметры LC – ФНЧ Бесселя

Поряд. Фильтра	R <sub>г</sub>	C1	L2	C3	L4	C5	L6	C7
	1/R <sub>г</sub>	L1	C2	L3	C4	L5	C6	L7
2	1,0000	0,5755	2,1478	—	—	—	—	—
3	1,0000	0,3374	0,9705	2,2034	—	—	—	—
4	1,0000	0,2334	0,6725	1,0815	2,2404	—	—	—
5	1,0000	0,1743	0,5072	0,8040	1,1110	2,2582	—	—
6	1,0000	0,1365	0,4002	0,6392	0,8538	1,1126	2,2645	—
7	1,0000	0,1106	0,3259	0,5749	0,7020	0,8690	1,1052	2,2659

В качестве типовой АЧХ выбираем АЧХ фильтра Баттерворта. Тогда по графикам, (рис.3.2а), находим, что на 3 рад затухание не менее 25 дБ

обеспечивается фильтром третьего порядка. Схема соответствующего нормированного ФНЧ, с учетом данных табл.4.1, представлена на рис.4.3а.

Рассчитаем  $K_f$ , переведя при этом Гц в радианы:

$$K_f = 2\pi \cdot 3000 = 18850.$$

С учетом заданных сопротивлений источника сигнала ( $R_\Gamma$ ) и нагрузки ( $R_H$ )  $Z = 600$ . В других случаях  $Z$  может быть произвольным, но таким, чтобы обеспечивать требуемое согласование источника и нагрузки, а номиналы емкостей и индуктивностей имели «разумные» значения.

Выполним масштабирование по частоте и импедансу параметров нормированной схемы, используя формулы (4.2):

$$C_{1M} = C_{3M} = \frac{1}{18850 \cdot 600} = 0,0884 \text{ мкФ}$$

$$L_{2M} = \frac{600 \cdot 2}{18850} = 63,7 \text{ мГн}$$

$$R_{\partial M} = R_{нМ.мкФ} = 1 \cdot 600 = 600 \text{ Ом}$$

Искомая схема фильтра показана на рис.4.3б.

#### 4.4. Расчет ФВЧ

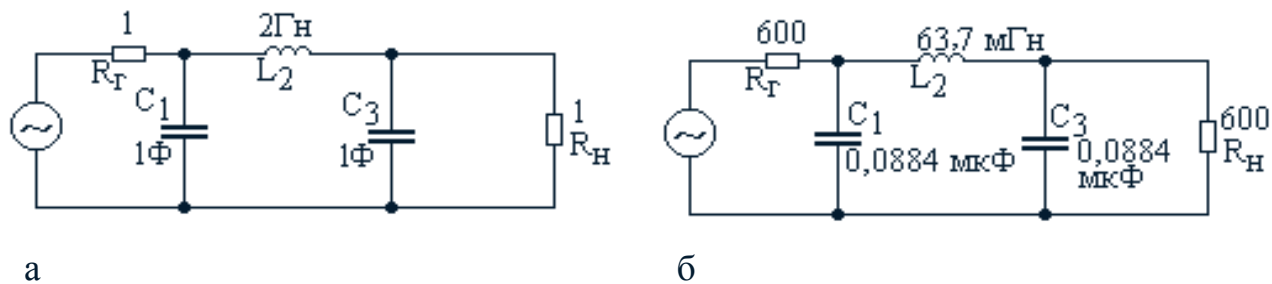
**Пример7.** Требуется ФВЧ, имеющий частоту среза 1000 Гц, а при гарантированном затухании 45 дБ – граничную частоту полосы задержания 350 Гц.

Решение. Расчет ФВЧ должен производиться в следующей последовательности:

1. Нормирование исходных данных для расчета ФВЧ вычислением крутизны его АЧХ  $A_s$  (раздел 2);
2. Выбор типа и порядка фильтра (разделы 2,3);
3. Преобразование схемы нормированного ФНЧ в схему ФВЧ, для чего в схеме нормированного ФНЧ все конденсаторы заменяются катушками индуктивности с индуктивностями  $1/C$ , а все катушки индуктивности заменяются конденсаторами с емкостью  $1/L$ , т.е.

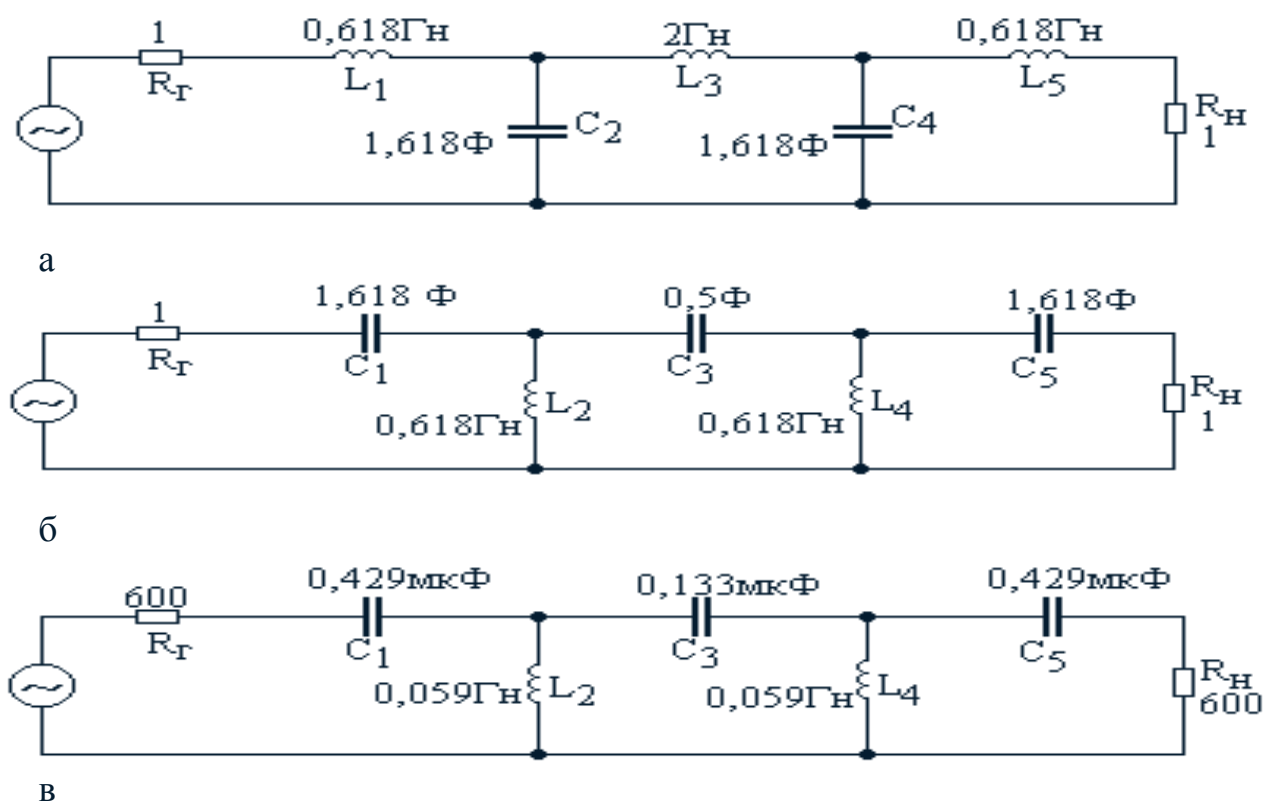
$$C_{\Phi ВЧ} = \frac{1}{L_{\Phi НЧ}}; L_{\Phi ВЧ} = \frac{1}{C_{\Phi НЧ}}; \quad (4.3)$$

4. После вычисления частотного масштабного множителя  $K_f$  и выбора  $Z$  полученный ФВЧ масштабируется по частоте и импедансу.



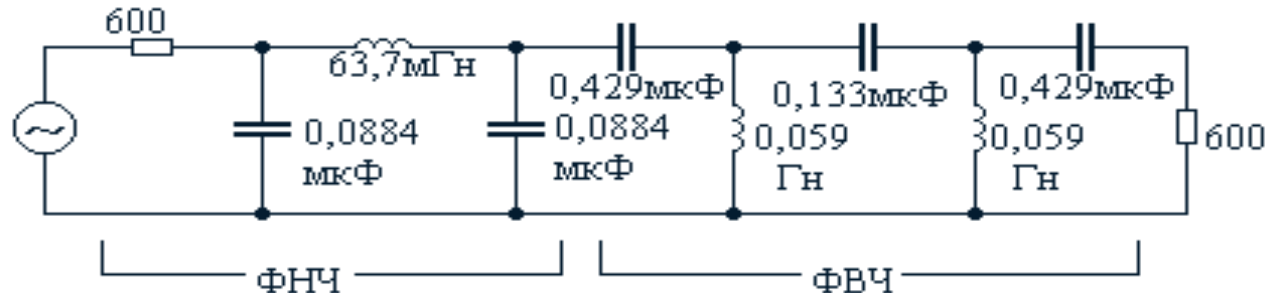
**Рис. 4.3. Синтез ФНЧ (пример 6):**

- а) нормированный Баттерворта ( $n = 3$ ),
- б) масштабированный по частоте и импедансу



**Рис. 4.4. Синтез ФВЧ (пример 7):**

- а) нормированный Баттерворта ( $n = 5$ ),
- б) нормированный ФВЧ,
- в) искомый ФВЧ



**Рис. 4.5. Синтез широкополосного ПФ**

В соответствии с данным алгоритмом получим схему искомого ФВЧ и номиналы ее элементов.

$$A_s = 1000 / 350 = 2.69$$

Выберем фильтр Баттерворта. Тогда, согласно рис.3.2а, порядок фильтра  $n=5$ .

На рис.4.4 приведена схема нормированного ФНЧ, см. рис.4.2б и табл.4.1.

Осуществим переход от ФНЧ к ФВЧ, см. рис.4.4б:

$$C_{1\text{ФВЧ}} = C_{5\text{ФВЧ}} = 1 / 0,618 = 1,618 \text{ Ф};$$

$$L_{2\text{ФВЧ}} = L_{4\text{ФВЧ}} = 1/1,618 = 0,618 \text{ Гн};$$

$$C_{3\text{ФВЧ}} = 1/2 = 0,5 \text{ Ф}.$$

Перейдем теперь к масштабированию по частоте и импедансу:

$$K_f = 2\pi \cdot 1000 = 6280. \text{ Положим, что } Z = 600.$$

$$C_{1M} = C_{5M} = \frac{1,618}{6280 \cdot 600} = 0,429 \text{ мкФ}$$

$$L_{2M} = L_{4M} = \frac{600 \cdot 0,618}{6280} = 0,059 \text{ Гн}$$

$$C_{3M} = \frac{0,5}{6280 \cdot 600} = 0,133 \text{ мкФ}$$

Искомая схема ФВЧ представлена на рис.4.4в.

#### 4.5. Расчет ПФ

Рассмотрим вначале расчет широкополосных фильтров, как наиболее простой случай. Как уже было показано в разделе 2, исходные данные для их расчета легко разделяются на две части, соответствующие ФНЧ и ФВЧ, расчет которых рассматривался в п.4.3. На завершающем этапе синтеза ПФ полученные схемы ФНЧ и ФВЧ включаются последовательно друг с другом, образуя двухкаскадную цепь. Считается, что таким образом требования к широкополосному ПФ оказываются выполненными. Хотя в действительности в подобной схеме могут проявляться некоторые паразитные эффекты, связанные со взаимным влиянием каскадов друг на друга. Обычно они являются незначительными, особенно для ПФ с большим отношением верхней и нижней частот среза полосы пропускания.

**Пример 8.** Требуется ПФ с нижней и верхней частотами среза полосы пропускания, равными соответственно 1000 и 3000 Гц. Кроме того, ПФ должен обеспечивать подавление сигнала на частоте 350 Гц более 45 дБ, а на частоте 9000 Гц – более 25 дБ. Источник сигнала и нагрузка имеют полное сопротивление 600 Ом.

Решение. Поскольку отношение  $F_{C2} / F_{C1} = 3000 / 1000$  больше 1,5, искомый ПФ является широкополосным. Поэтому его расчет можно производить отдельно для ФНЧ и ФВЧ. Разделим исходные данные на 2 части:

для ФНЧ частота среза полосы пропускания равняется 3000 Гц, а граничная частота полосы задержания на уровне 25 дБ – 9000 Гц;

для ФВЧ частота среза полосы пропускания составляет 1000 Гц, а граничная частота полосы задержания на уровне 45 дБ – 350 Гц.

Сформулированным требованиям удовлетворяют ФНЧ из **примера 6** и ФВЧ из **примера 7**. Таким образом, искомый ПФ получается с помощью последовательного включения фильтров, представленных на рис.4.3б и 4.4в. Искомая схема представлена на рис.4.5.

Если фильтр узкополосный, к нему нельзя применять описанный выше метод расчета. В примере 4 было показано, как АЧХ узкополосного ПФ соотносится с АЧХ ФНЧ. Рассмотрим, как, используя сформулированные в нем правила, можно спроектировать и рассчитать схему полосового фильтра.

**Пример 9.** Требуется ПФ с центральной частотой 1000 Гц, частотами среза 900 и 1100 Гц и гарантированным затуханием 15 дБ на граничных частотах 800 и 1200 Гц. Полное сопротивление источника и нагрузки составляет 600 Ом.

*Решение.* Алгоритм расчета узкополосного фильтра таков:

1. Нормирование исходных данных в соответствии с правилами, рассмотренными в примере 4;
2. Выбор ФНЧ, удовлетворяющего сформулированным требованиям (рис.3.2);
3. Масштабирование нормированного ФНЧ по частоте и импедансу так, чтобы, во-первых, частота среза его полосы пропускания совпадала с шириной полосы пропускания ПФ, а во-вторых, импеданс равнялся импедансу источника и нагрузки рассчитываемого ПФ;
4. Преобразование схемы масштабированного ФНЧ в схему ПФ, причем так, чтобы ширина его полосы пропускания оказалась равной частоте среза ФНЧ. Это производится следующим образом: в схеме ФНЧ последовательно с каждой катушкой индуктивности подключается конденсатор, а параллельно каждому конденсатору – индуктивность. В результате на месте реактивных элементов в схеме ФНЧ оказывается включенным последовательный или параллельный колебательный контур. При этом параметры этого контура выбираются из условия, чтобы резонансная частота его совпадала с геометрически центральной частотой ПФ  $F_0$ . Вычисление значений номиналов дополнительных реактивных элементов осуществляется по формулам:

$$F_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}; \quad L_D = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot F_0)^2 \cdot C}; \quad C_D = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot F_0)^2 \cdot L} \quad (4.4)$$

Перейдем теперь к реализации представленного алгоритма. Центральная геометрическая частота:

$$F_0 = \sqrt{900 \cdot 1100} = 995 \text{ Гц.}$$

Определим для каждой из граничных частот ПЗ геометрически сопряженные частоты:

- первая пара

$$F_{31} = 800 \text{ Гц,}$$

$$F_{32\text{сопр.}} = 995^2 / 800 = 1237 \text{ Гц,}$$

$$F_{32\text{сопр.}} - F_{31} = 1237 - 800 = 437 \text{ Гц.}$$

- вторая пара

$$F_{32} = 1200 \text{ Гц,}$$

$$F_{31\text{сопр.}} = 995^2 / 1200 = 825 \text{ Гц},$$

$$F_{32} - F_{31\text{сопр.}} = 1200 - 825 = 375 \text{ Гц}.$$

$$A_S = 375/200 = 1,88$$

Из рис.3.2а видно, что затухание не менее 15 дБ при 1.88 рад обеспечивает фильтр Баттерворта третьего порядка. Схема данного фильтра представлена на рис.4.6а. Выполним масштабирование нормированного ФНЧ по частоте и импедансу так, чтобы его частота среза равнялась ширине ПП требуемого ПФ (200 Гц), а импеданс - необходимому уровню - 600 Ом:

$$K_f = 1257;$$

$$C_{1M} = C_{2M} = \frac{1}{(1257 \cdot 600)} = 1,33 \text{ мкФ};$$

$$L_{2M} = \frac{(600 \cdot 2)}{1257} = 0,95 \text{ Гн}.$$

С учетом полученных значений  $C_M$  и  $L_M$  схема масштабированного ФНЧ представлена на рис.4.6б.

Найдем параметры дополнительных реактивных элементов в соответствии с (4.4):

$$L_B = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 995)^2 \cdot 1,33 \cdot 10^{-6}} = 19,2 \text{ мГн},$$

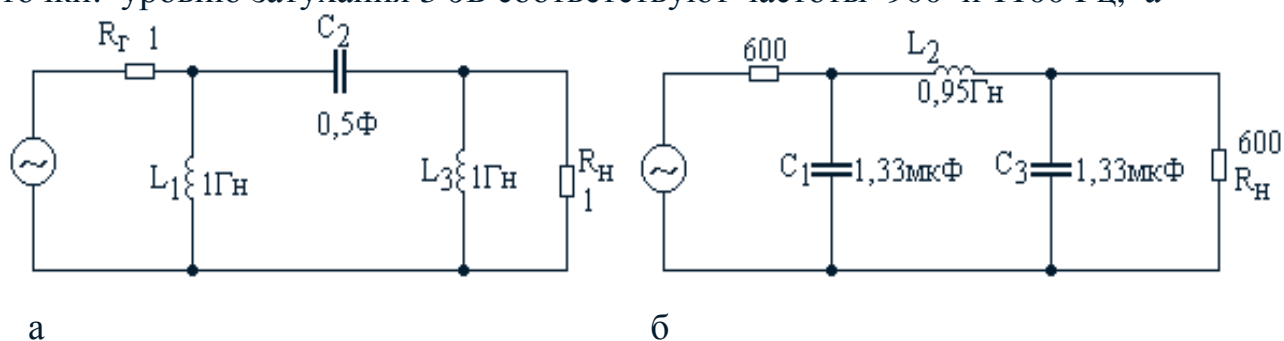
$$C_B = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 995)^2 \cdot 0,95} = 0,0269 \text{ мкФ}.$$

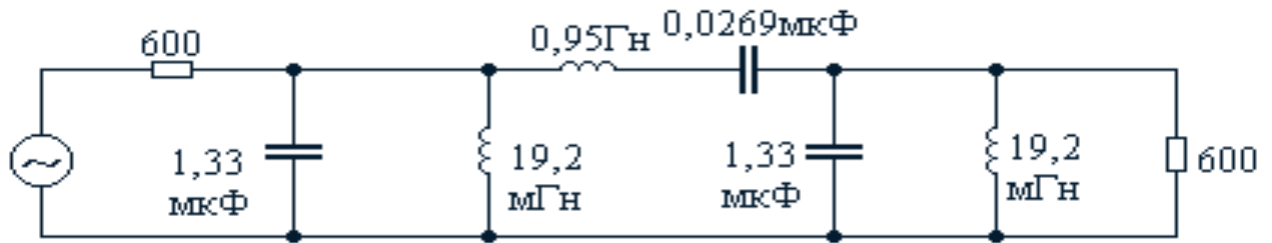
Окончательный вариант схемы приведен на рис. 4.6в.

#### 4.6. Расчет ПФ

Параметры ПФ могут быть получены из рассчитанных схем ФВЧ с частотой среза полосы пропускания, равной ширине полосы требуемого режекторного фильтра.

**Пример 10.** Требуется ПФ, АЧХ которого имеет следующие характерные точки: уровню затухания 3 дБ соответствуют частоты 900 и 1100 Гц, а

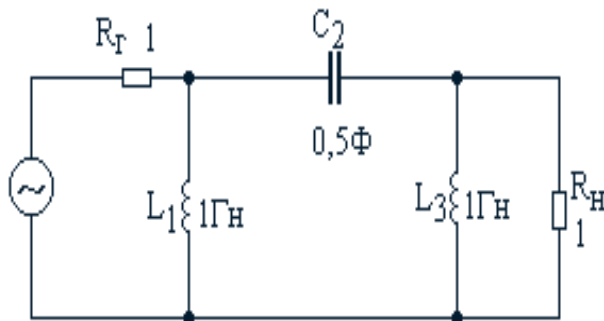




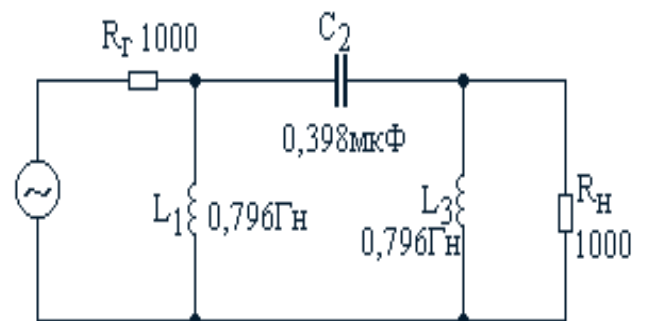
в

**Рис 4.6. Синтез узкополосного ПФ:**

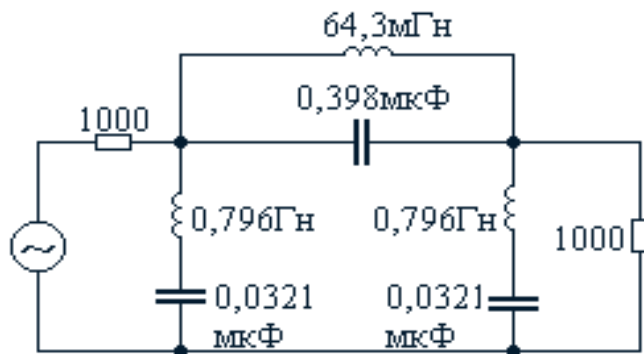
- а) нормированный ФНЧ,
- б) масштабированный ФНЧ,
- в) искомый ПФ



а



б



в

**Рис 4.7. Синтез узкополосного РФ:**

- а) нормированный ФВЧ,
- б) масштабированный ФВЧ,
- в) искомый ПФ

гарантированному затуханию 15 дБ – 950 и 1050 Гц. Полное сопротивление источника сигнала и нагрузки равняется 1000 Ом.

Решение. Алгоритм синтеза состоит в следующем:

1. Выбор нормированного ФНЧ, определение его порядка и параметров схемы;
2. Преобразование схемы ФНЧ в ФВЧ;
3. Масштабирование ФВЧ по частоте и импедансу так, чтобы его частота среза стала равной ширине полосы искомого РФ, а импеданс соответствовал заданному уровню;

4. Схема масштабированного ФВЧ преобразуется в схему искомого РФ путем подключения к каждому конденсатору параллельной катушки индуктивности, а к каждой индуктивности – последовательного конденсатора. При этом должно соблюдаться условие – резонанс в колебательных системах должен наступать на геометрически центральной частоте  $F_0$ ;

Реализовывая последовательно данный алгоритм, получим схему искомого фильтра.

$$F_0 = \sqrt{900 \cdot 1100} = 995 \text{ Гц}$$

Определим для каждой из граничных частот ПЗ геометрически сопряженные частоты:

- первая пара

$$F_{31} = 950 \text{ Гц},$$

$$F_{32\text{сопр.}} = 995^2 / 950 = 1042 \text{ Гц},$$

$$F_{32\text{сопр.}} - F_{31} = 1042 - 950 = 92 \text{ Гц}.$$

- вторая пара

$$F_{32} = 1050 \text{ Гц},$$

$$F_{31\text{сопр.}} = 995^2 / 1050 = 943 \text{ Гц},$$

$$F_{32} - F_{31\text{сопр.}} = 1050 - 943 = 107 \text{ Гц}.$$

$$A_S = 200 / 107 = 1,87$$

Из рис.3.2а видно, что этим требованиям удовлетворяет фильтр Баттерворта 3-го порядка (рис.4.6а).

Заменяя катушку конденсатором  $C_{2\text{ФВЧ}} = 1 / 2 = 0,5 \text{ Ф}$  и конденсаторы – катушками индуктивности  $L_{1\text{ФВЧ}} = L_{2\text{ФВЧ}} = 1 / 1 = 1 \text{ Гн}$ , получим схему ФВЧ (рис.4.7а).

$$K_f = 1257$$

$$L_{1M} = L_{3M} = 1000 / 1257 = 0,796 \text{ Гн}$$

$$C_{2M} = \frac{0,5}{1257 \cdot 1000} = 0,398 \text{ мкФ}$$

Схема масштабированного ФВЧ приведена на рис.4.7б.

$$L_D = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 995)^2 \cdot 0,398 \cdot 10^{-6}} = 64,3 \text{ мГн}$$

$$C_D = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 995)^2 \cdot 0,796} = 0,0321 \text{ мкФ}$$

Схема искомого РФ представлена на рис.4.7в.

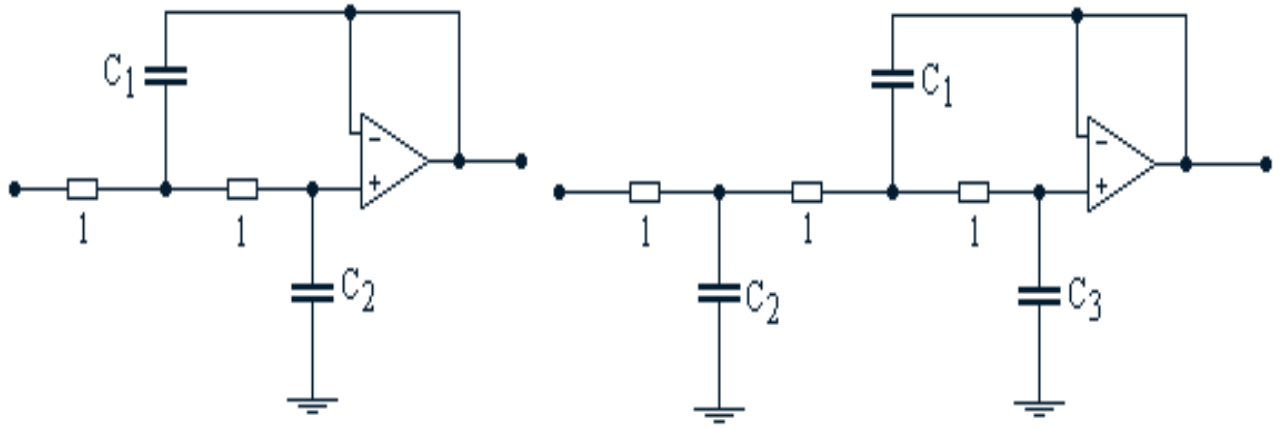
## 5. РАСЧЕТ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

В данном разделе рассматривается расчет активных фильтров (АФ), построенных на операционных усилителях. Поскольку в активных фильтрах полностью исключается использование катушек индуктивности, это позволяет обеспечить уменьшение их стоимости и ограничить размеры, особенно на низких частотах.





<b>ФНЧ Баттерворта</b>							
2	1.4140	0.7071	-	8	1.0200	0.9808	-
3	3.5460	1.3920	0.2024		1.2020	0.8313	-
4	1.0820	0.9241	-		1.8000	0.5557	-
	2.6130	0.3825	-		5.1250	0,1950	-
5	1.7530	1.3540	0.4214	9	1,4550	1,3270	0,5170
	3.2350	0.3090	-		1,3050	0,7661	-
6	1.0350	0.9660	-		2,0000	0,5000	-
	1.4140	0.7071	-		5,7580	0,1736	-
7	3.8630	0.2588	-	10	1,0120	0,9874	-
	1.5310	1.3360	0.4885		1,1220	0,8908	-
	1.6040	0.6235	-		1,4140	0,7071	-
	4.4930	0.2225	-		2,2020	0,4540	-
					6,3900	0,1563	-
<b>ФНЧ Чебышева с уровнем пульсации 0.1 дБ</b>							
2	1,6380	0,6955	-	8	3,2700	2,3230	-
3	6,6530	1,8250	0,1345		3,8570	0,6890	-
4	1,9000	1,2411	-		5,7730	0,2398	-
	4,5920	0,2410	-		16,440	0,0629	-
5	4,4460	2,5200	0,3804	9	6,1940	4,1610	0,7483
	6,8100	0,1580	-		4,6780	0,4655	-
6	2,5530	1,7760	-		7,1700	0,1812	-
	3,4870	0,4917	-		20,640	0,4980	-
	9,5310	0,1110	-	10	4,0110	2,8770	-
7	5,1750	3,3220	0,5693		4,4470	0,8756	-
	4,5460	0,3331	-		5,6030	0,3353	-
	12,730	0,0819	-		8,7270	0,1419	-
					25,320	0,0404	-
<b>ФНЧ Чебышева с уровнем пульсации 0.5 дБ</b>							
2	0,9066	0,6800	-	8	0,5673	0,5540	-
3	1,4230	0,9880	0,2539		0,6090	0,4861	-
4	0,7351	0,6746	-		0,7257	0,3590	-
	1,0120	0,3900	-		1,1160	0,1857	-
5	1,0100	0,8712	0,3095	9	9,5630	5,6800	0,6260
	1,0410	0,3100	-		6,6970	0,3419	-
6	0,6352	0,6100	-		10,260	0,1279	-
	0,7225	0,4835	-		29,540	0,0347	-
	1,0730	0,2561	-	10	5,7600	3,1750	-
7	0,8532	0,7792	0,3027		6,3830	0,6773	-
	0,7250	0,4151	-		8,0420	0,2406	-
	1,1000	0,2164	-		12,530	0,0995	-
					36,360	0,0281	-



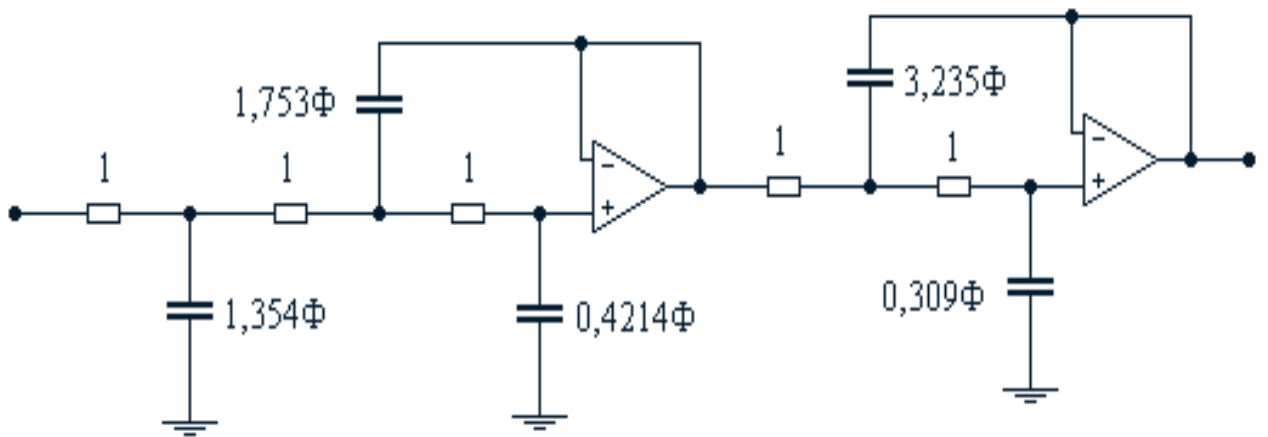
а

б

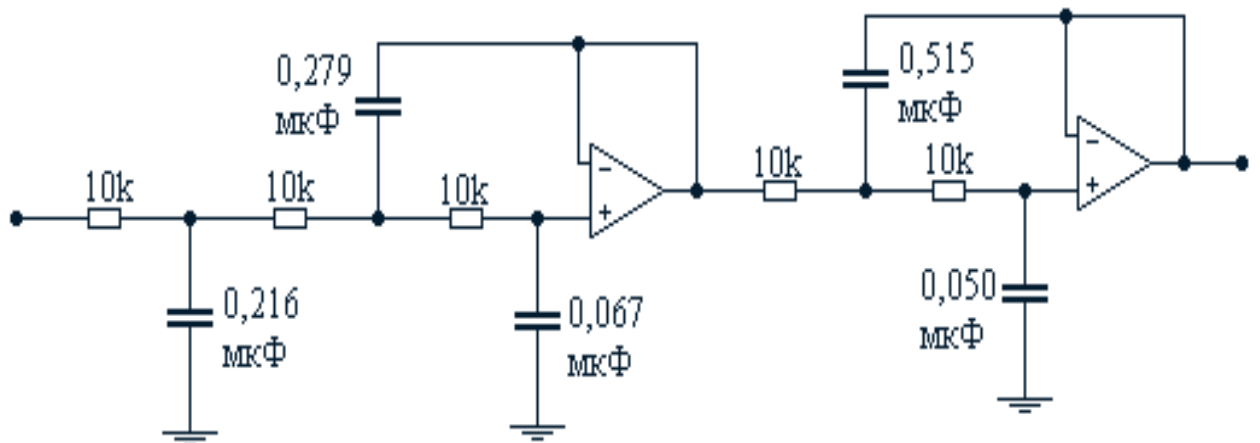
**Рис. 5.1. Схемы активных фильтров:**

а) второго порядка,

б) третьего порядка



а



б

**Рис. 5.2. Синтез активного ФНЧ:**

а) нормированный Баттерворта ( $n = 5$ ),

б) масштабированный по частоте и импедансу

3. Преобразование схемы нормированного ФНЧ в ФВЧ. Для осуществления этого преобразования каждый резистор сопротивлением  $R$  [Ом] заменяется конденсатором емкостью  $1/R$  [Ф], а каждый конденсатор емкостью  $C$  [Ф] - резистором сопротивлением  $1/C$  [Ом];

4. Масштабирование нормированного ФВЧ по частоте и импедансу.

$$A_S = 1000/350 = 2,86$$

Как и в предыдущем примере, можно взять фильтр Баттерворта пятого порядка (рис.5.2а). После преобразования нормированного ФНЧ в нормированный ФВЧ имеем схему, представленную на рис.5.3а.

Пусть  $z = 10^4$ ,  $K_f = 2\pi \cdot 1000 = 6280$ , тогда после пересчета номиналов элементов схемы (рис.5.3а) в соответствии с выражениями (4.2) получим схему искомого фильтра (рис.5.3б).

### 5.3. Расчет ПФ

Как уже отмечалось, ПФ делятся на два класса: широкополосные и узкополосные. Принципы расчета активных ПФ ничем не отличаются от тех, что уже рассматривались при расчете полосовых LC-фильтров.

Активные широкополосные ПФ, как и соответствующие LC-фильтры, можно разделить на две части, соответствующие ФНЧ и ФВЧ. Соответствующие низкочастотная и высокочастотная части (каскады) включаются оследовательно. В отличие от этого, в широкополосных активных РФ каскады включаются параллельно (рис.5.4).

**Пример 13.** Требуется фильтр с частотами среза 1000 и 3000 Гц, обеспечивающий гарантированное затухание не менее 25 дБ на граничных частотах 300 и 900 Гц.

Решение. Поскольку отношение верхней частоты среза к нижней превышает 1,5, ПФ является широкополосным. Разделим АЧХ ПФ на два участка:

ФНЧ.  $F_C = 3000$  Гц; гарантированное затухание 25 дБ на частоте 9000 Гц.  
 $A_S = 9000 / 3000 = 3$ .

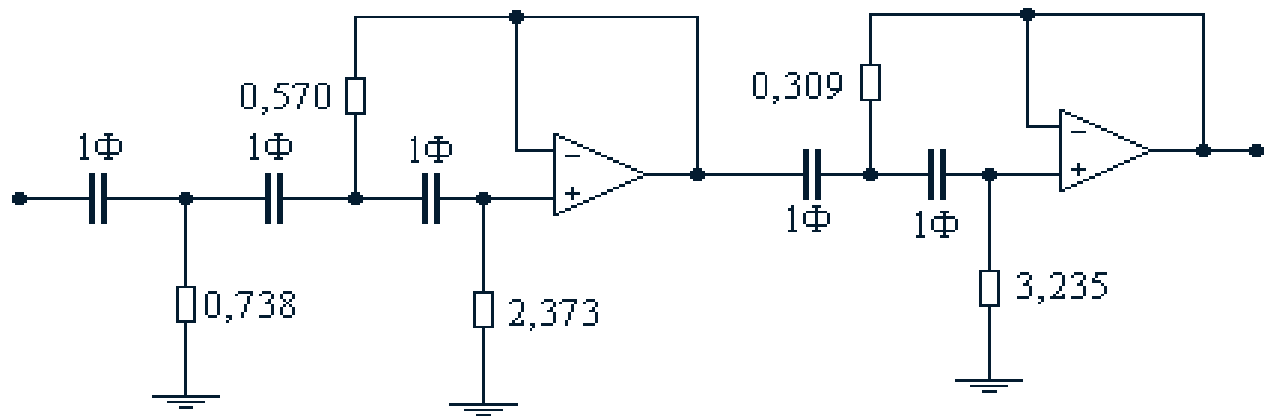
ФВЧ.  $F_C = 1000$  Гц; гарантированное затухание 25 дБ на частоте 300 Гц.  
 $A_S = 1000 / 300 = 3,33$ .

Выбираем тип АЧХ фильтра, удовлетворяющий одновременно требованиям ФНЧ и ФВЧ. Из рис.3.2.а видно, что схема нормированного фильтра Баттерворта третьего порядка обеспечивает затухание более 25 дБ при  $A_S=3$  и  $A_S= 3,33$ . Схема нормированного искомого ПФ приведена на рис.5.5а. Схема нормированного высокочастотного каскада получена из схемы ФНЧ Баттерворта 3-го порядка путем замены резисторов на конденсаторы емкостью  $1/R$ , а конденсаторов - на резисторы сопротивлением  $1/C$  нормированного высокочастотного каскада получена из схемы ФНЧ.

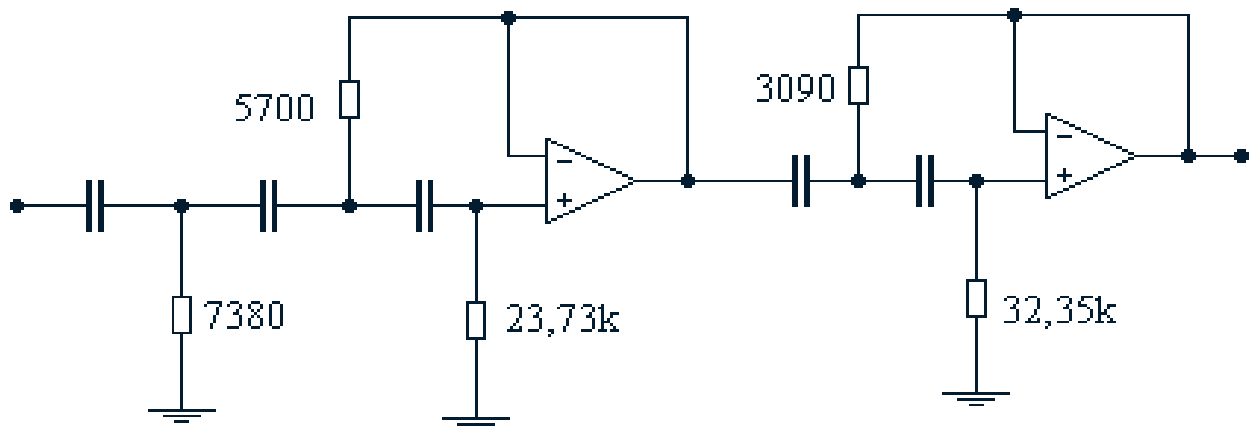
Масштабируем обе части схемы по частоте и импедансу.

ФНЧ:  $K_f = 2\pi \cdot 3000 = 18850$ .

ФВЧ:  $K_f = 2\pi \cdot 1000 = 6280$ .



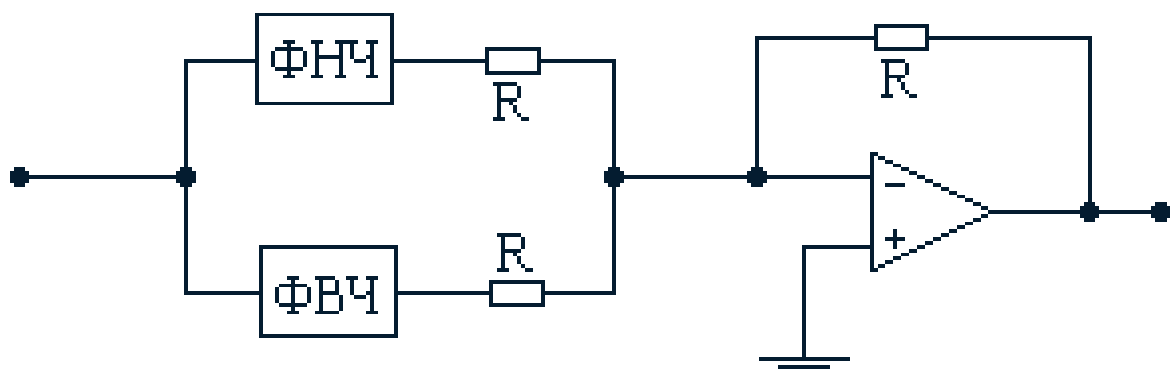
а



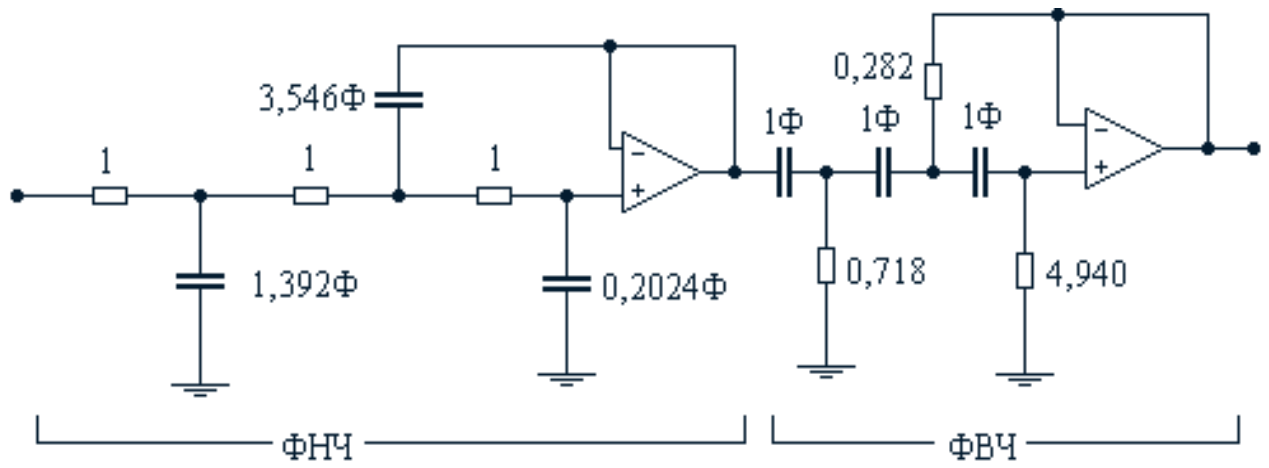
б

**Рис. 5.3. Синтез ФВЧ:**

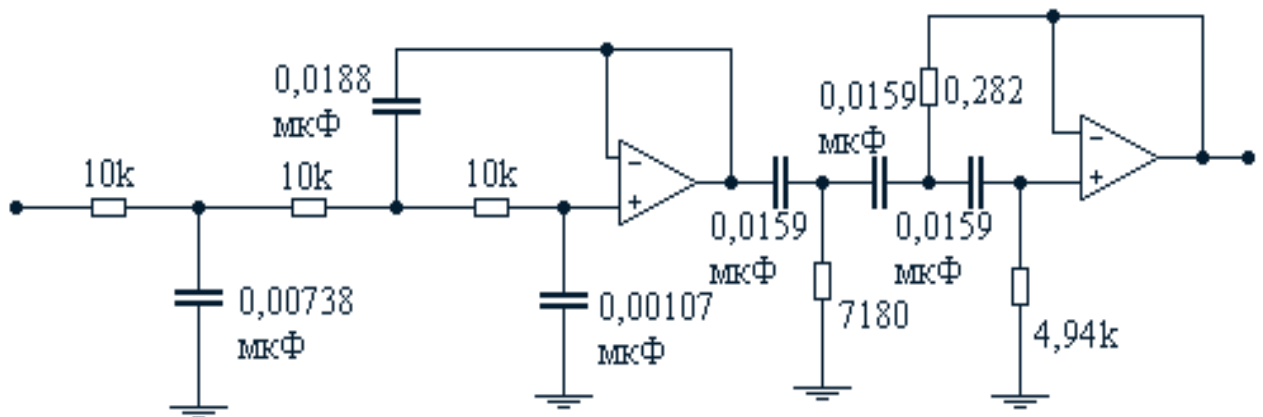
- а) нормированный ФВЧ,
- б) искомый ФВЧ



**Рис. 5.4. Структурная схема широкополосного РФ.**



а

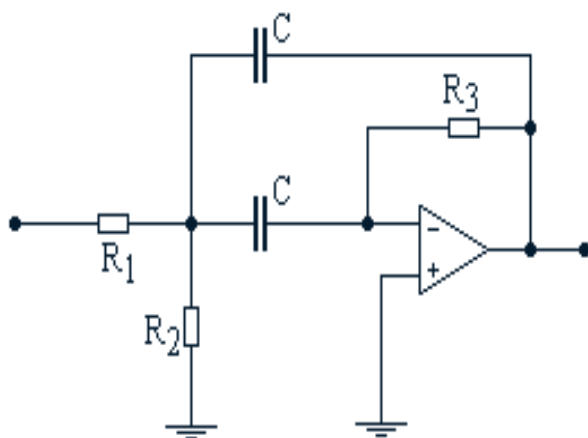


б

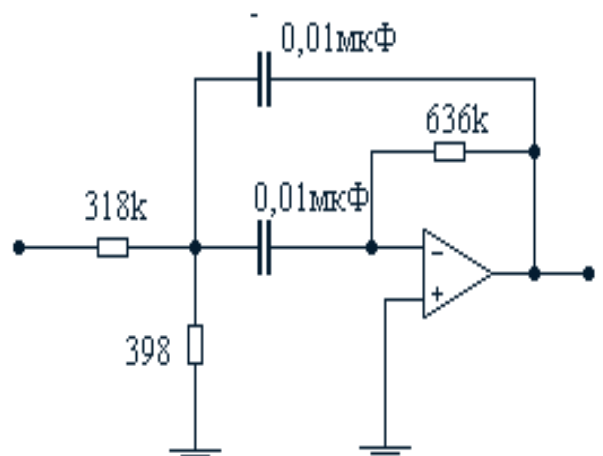
**Рис.5.5. Синтез широкополосного ПФ:**

а) нормированный фильтр,

б) масштабированный фильтр (искомый ПФ)



а



б

**Рис. 5.6. Синтез узкополосного ПФ:**

а) типовая схема,

б) схема искомого фильтра

Приняв  $Z = 10^4$ , умножим сопротивления всех резисторов на  $Z$ , а емкости всех конденсаторов поделим на  $Z$  и  $K_f$ , используя в каждом фильтре соответствующий ему множитель  $K_f$ . Схема искомого фильтра приведена на рис.5.5б.

**Пример 14.** Требуется активный ПФ с центральной частотой 1000 Гц и шириной полосы пропускания 50 Гц. Необходимо также определить, какому уровню затухания соответствует ширина ПП 200 Гц.

Решение. Требуемый ПФ является узкополосным. Реализуются такие фильтры с добротностью  $Q \leq 20$  схемой, приведенной на рис.5.6а. На центральной частоте такой АФ имеет единичное усиление.

Уровень затухания  $X$  [дБ] на границе полосы пропускания при известной ширине ПП  $B_X$  на этом уровне можно вычислить по формуле:

$$X[\text{дБ}] = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \left( \frac{B_X}{B_{3\text{дБ}}} \right)^2 \right], \quad (5.1)$$

где  $B_{3\text{дБ}} = F_0 / Q$  - ширина ПП.

Уравнение (5.1) соответствует АЧХ нормированного фильтра первого порядка (рис.3.2а), если в качестве нормированной частоты взять отношение  $B_X / B_{3\text{дБ}}$ .

Для схемы на рис.5.6а основные соотношения записываются следующим образом:

$$R_1 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot F_0 \cdot C}; \quad R_2 = \frac{R_1}{2 \cdot Q^2 - 1}; \quad R_3 = 2 \cdot R_1. \quad (5.2)$$

Для рассматриваемого случая  $Q = F_0 / B_{3\text{дБ}} = 1000 / 50 = 20$ . Выбираем  $C = 0,01$  мкФ, тогда

$$R_1 = \frac{20}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 0,01 \cdot 10^{-6}} = 318471 \text{ Ом} \approx 318 \text{ кОм};$$

$$R_2 = \frac{318}{2 \cdot 20^2 - 1} = 0,398 \text{ кОм}; R_3 = 2 \cdot 318 = 636 \text{ кОм}.$$

Схема искомого фильтра представлена на рис.5.6б.

$$X = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \left( \frac{200}{50} \right)^2 \right] = 12,3 \text{ дБ}.$$

Ширина полосы пропускания 200 Гц соответствует уровню затухания 12,3 дБ.

#### 5.4. Расчет ПФ

Как и ПФ, РФ, в зависимости от вида их АЧХ, делятся на широкополосные и узкополосные. Широкополосными РФ считаются такие, у которых отношение верхней частоты среза к нижней равно или больше 1,5. Они легко рассчитываются после разделения исходных данных для расчета РФ на 2 части, соответствующие ФНЧ и ФВЧ. При этом в схему РФ вводится дополнительный операционный усилитель (рис.5.4). В отличие от широкополосных, в узкополосных РФ используются схемы типа фильтр – пробка.

**Пример 15.** Требуется РФ, АЧХ которого обеспечивает затухание сигнала 3 дБ на частотах 300 и 3000 Гц, а в диапазоне от 600 до 1500 Гц - более 12 дБ.

Решение. Поскольку отношение верхней и нижней граничных частот на уровне 3 дБ превышает 1,5, данный РФ будем рассчитывать как широкополосный. Разделим исходные данные на две области:

ФНЧ: частота среза ПП 300 Гц; гарантированное затухание 12 дБ на частоте 600 Гц;

$$A_S = 600 / 300 = 2;$$

ФВЧ: частота среза ПП 3000 Гц; гарантированное затухание 12 дБ на частоте 1500 Гц;

$$A_S = 3000 / 1500 = 2.$$

Из рис.3.2а видно, что схема фильтра Баттерворта третьего порядка обеспечивает затухание 12 дБ при  $A_S = 2$ . Таким образом, нормированный фильтр Баттерворта удовлетворяет требованиям как ФНЧ, так и ФВЧ.

Рассчитав ФНЧ и ФВЧ по методикам, описанным выше, а затем объединив их, как показано на рис.5.4, получим схему искомого РФ (рис.5.7).

**Пример 16.** Требуется фильтр, обеспечивающий полное подавление сигнала на частоте 1000 Гц, с шириной полосы на уровне 3 дБ – 50 Гц.

Решение. Как уже отмечалось, в качестве узкополосных РФ используются RC-схемы типа двойного Т-образного мостового фильтра (рис.5.8а). Их основное преимущество заключается в возможности глубокого подавления отдельных частотных компонентов.

Компоненты схемы на рис.5.8а связаны между собой следующими соотношениями:

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot F_0 \cdot C}; \quad K = \frac{4 \cdot Q - 1}{4 \cdot Q},$$

где величины R и C можно выбрать произвольно.

Для представленных исходных данных получим:

$$Q = F_0 / B_{3дБ} = 1000 / 50 = 20. \text{ Пусть } R = 10 \text{ кОм}, C = 0,01 \text{ мкФ}.$$

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 0,01 \cdot 10^{-6}} = 15,9 \text{ кОм}; \quad K = \frac{4 \cdot 20 - 1}{4 \cdot 20} = 0,9875.$$

Схема искомого фильтра представлена на рис.5.8б.



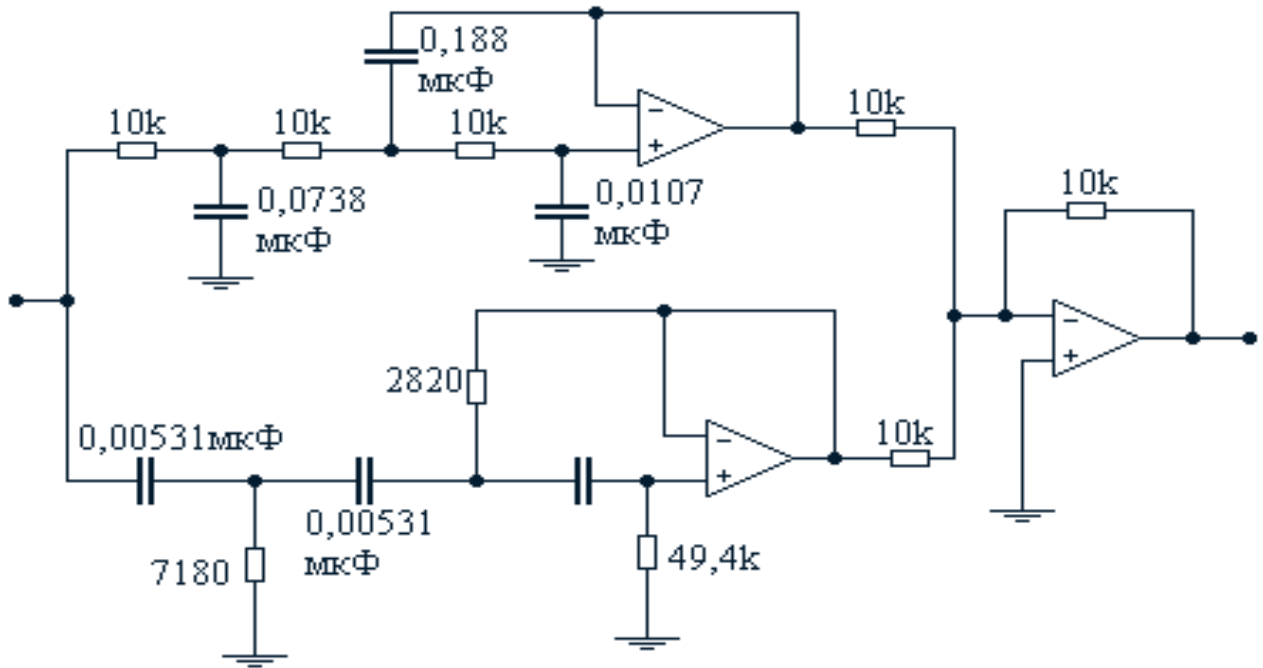


Рис. 5.7. Схема широкополосного активного РФ

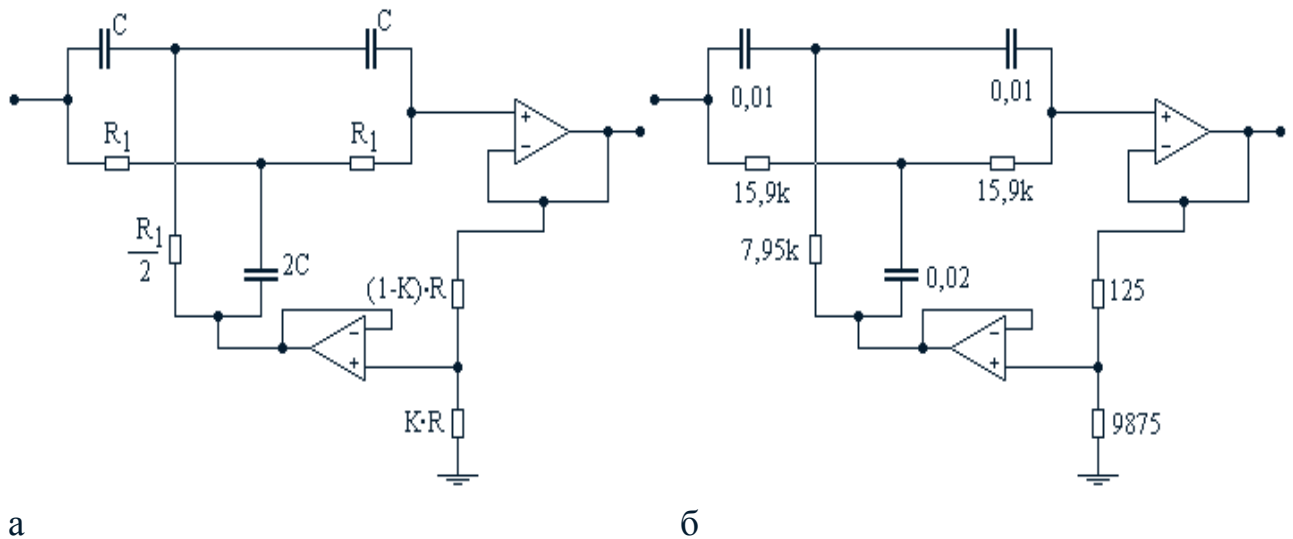


Рис. 5.8. Синтез узкополосного РФ:

- а) типовая схема фильтра,
- б) схема искомого фильтра

### Список литературы

1. Каудман М., Сидман А.Г. Практическое руководство по расчетам схем в электронике: Справ. в 2 т. Т.2:Пер. с англ./Под ред. Ф.Н. Покровского. - М.:Энергоатомиздат, 1993. - 288 с.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 3 т. Т.1: Пер. с англ.- 4-е изд., перераб. и доп. - М.:Мир, 1993. - 413 с.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. - М.:Мир, 1983. - 512 с.