

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
КАФЕДРА КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА РАДИОАППАРАТУРЫ

Кривин Николай Николаевич

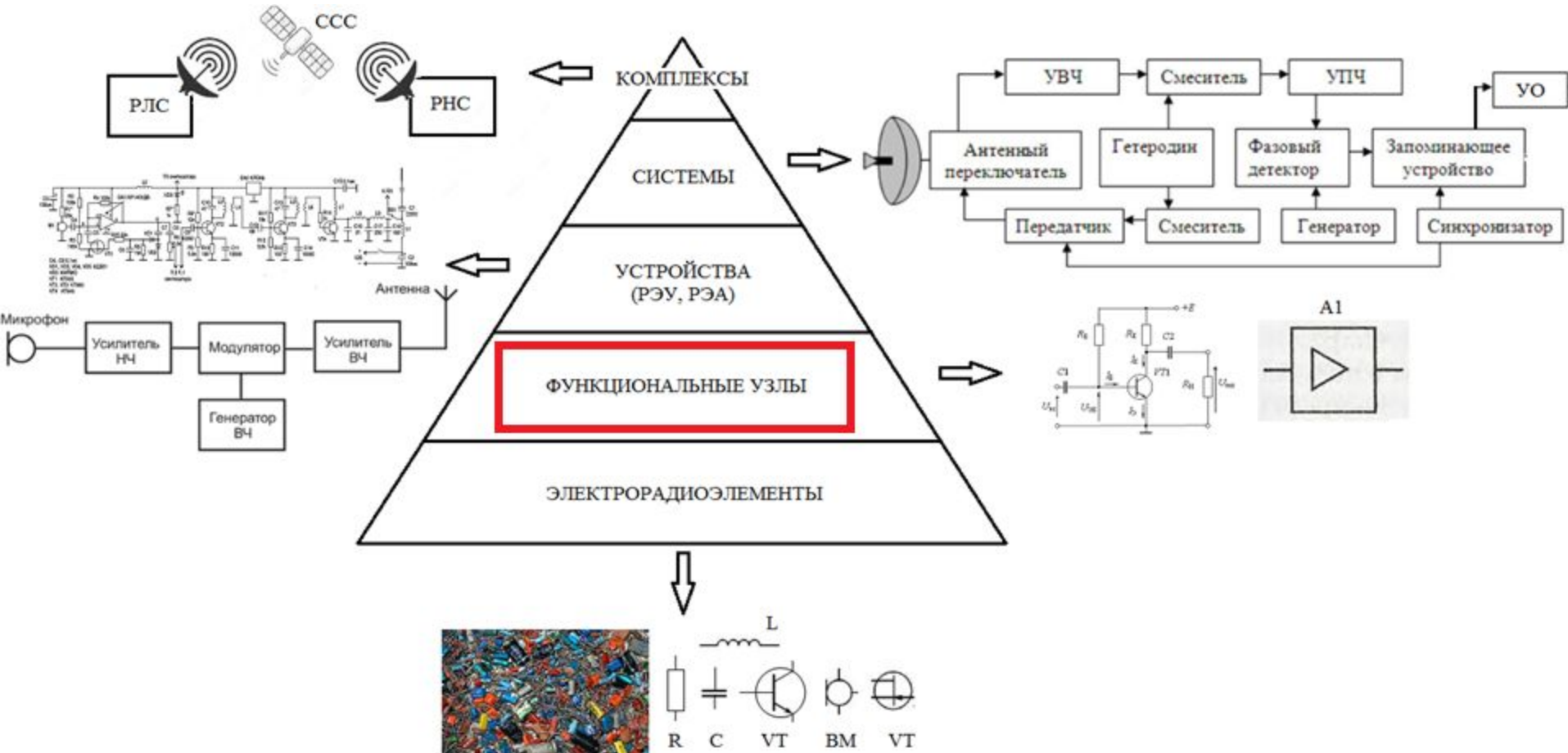
(старший преподаватель КИПР, канд. техн. наук)

# **СХЕМО- И СИСТЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

## ***2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ.***

### ***ФИЛЬТРЫ***

# ИЕРАРХИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ



# АЛГОРИТМ ИЗУЧЕНИЯ НОВОГО ДЛЯ ВАС ФУНКЦИОНАЛЬНОГО УЗЛА



Определение

Классификация

Назначение (функция) и области применения


Основные параметры и технические характеристики

Особенности схемотехнической реализации на разной  
ЭКБ

Достоинства и недостатки ФУ, выполненного на разной  
ЭКБ

УГО и ПО обозначения на структурных схемах

# ИСТОЧНИКИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ФУ



**НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПО  
ЭЛЕКТРОННЫМ ПРИБОРАМ**

**РУКОВОДСТВА ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ОТ ЗАВОДА-ПРОИЗВОДИТЕЛЯ (DATASHEET)**

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПРАВОЧНИКИ И ЭНЦИКЛОПЕДИИ ПО  
СХЕМОТЕХНИКЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

**ОТРАСЛЕВЫЕ ЖУРНАЛЫ**

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПОДПИСНЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ  
ИЗДАНИЯ**

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ

**Электрический фильтр** – линейная стационарная цепь (четырёхполюсник), предназначенная для выделения (пропускания) или подавления (ослабления) сигналов с заданным спектром частот.

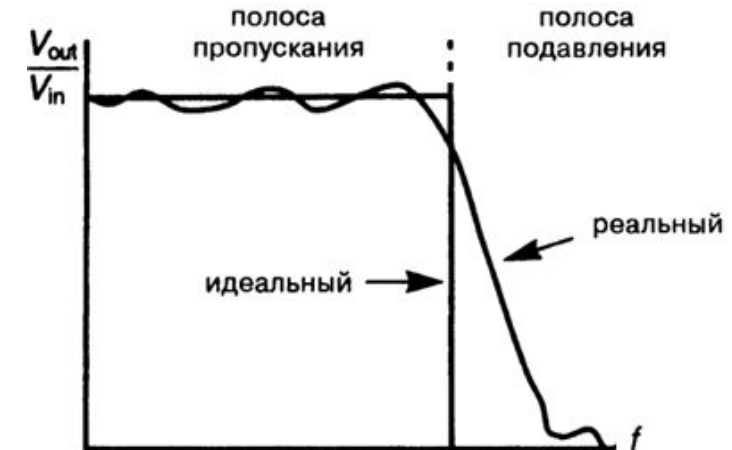
## ОСНОВНОЕ ТРЕБОВАНИЕ К ФИЛЬТРАМ

Требования к фильтрам формируют в процессе анализа исходных данных о спектральном составе полезного сигнала, мешающих сигналов и шумов.

• Фильтр должен обеспечить максимальное подавление помех при минимально допустимых искажениях полезного сигнала.

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1. **Импульсная характеристика** (импульсная переходная функция, весовая функция, ядро фильтра) - выходной сигнал динамической системы как реакция на входной сигнал в виде дельта-функции Дирака.
2. **Передаточная характеристика** (коэффициент передачи сигнала в рабочей полосе частот)
3. **Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)**
4. **Фазо-частотная характеристика (ФЧХ)**
5. **Порядок (количество полюсов и нулей)** – определяет крутизну спада АЧХ в полосе подавления и неравномерность АЧХ в полосе пропускания (подавления)



АЧХ идеального и реального ФНЧ



Рис. 58. Полосы пропускания и подавления фильтров нижних частот (а) и полосопропускающего (б)

## 8.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ФИЛЬТРОВ

По схемотехническому исполнению фильтры можно разделить на пассивные и активные.

*Пассивными фильтрами* называют фильтры, которые содержат только пассивные элементы: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности.

*Активными фильтрами* называют фильтры, которые содержат кроме пассивных элементов также активные элементы: операционные усилители, транзисторы и т. д.

*В зависимости от частотных характеристик фильтры подразделяются:*

- на фильтры нижних частот (ФНЧ);
- фильтры верхних частот (ФВЧ);
- полосовые фильтры (ПФ);
- режекторные фильтры (РФ);
- резонансные (узкополосные) фильтры (УФ).

# КЛАССИФИКАЦИЯ ФИЛЬТРОВ

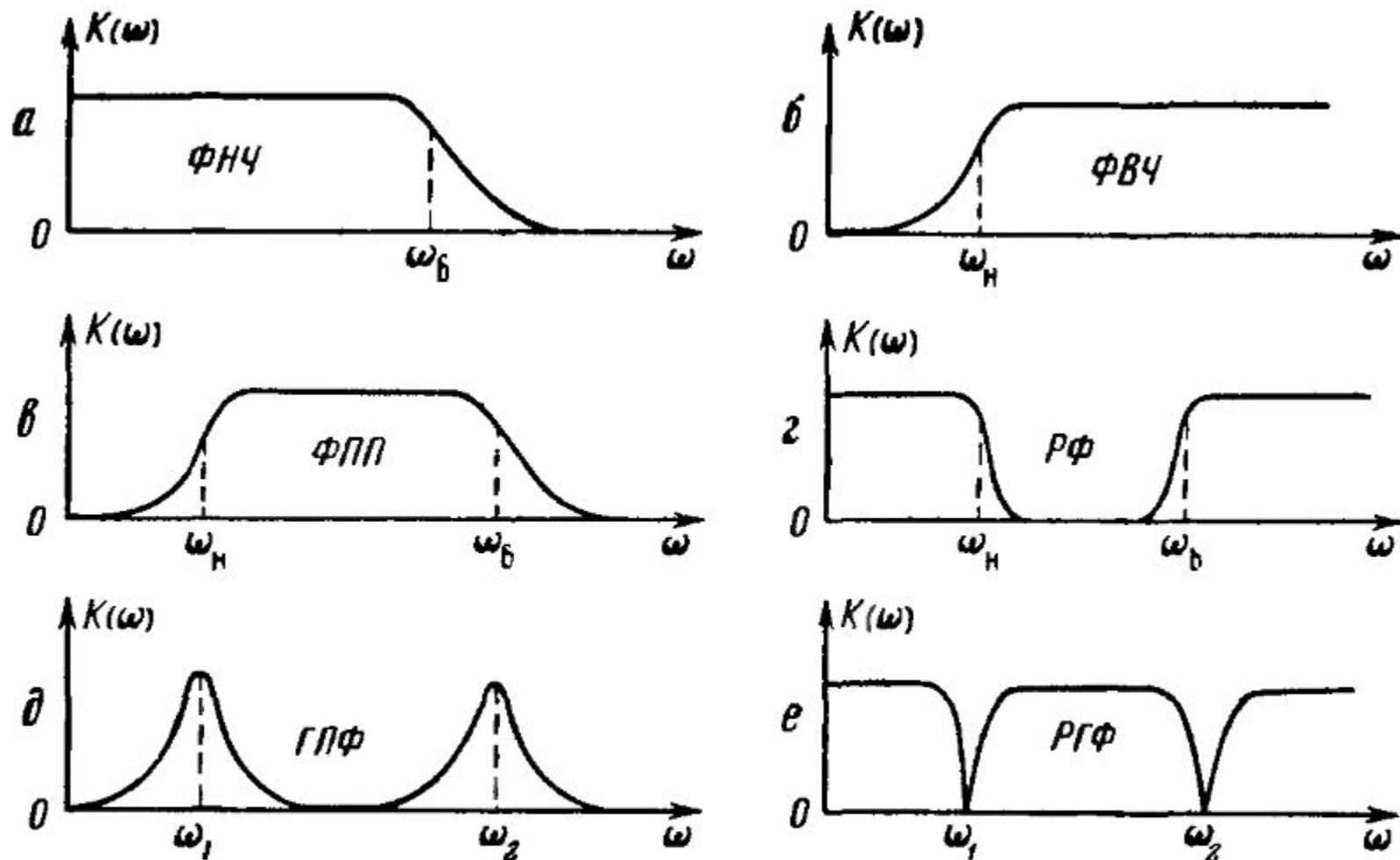
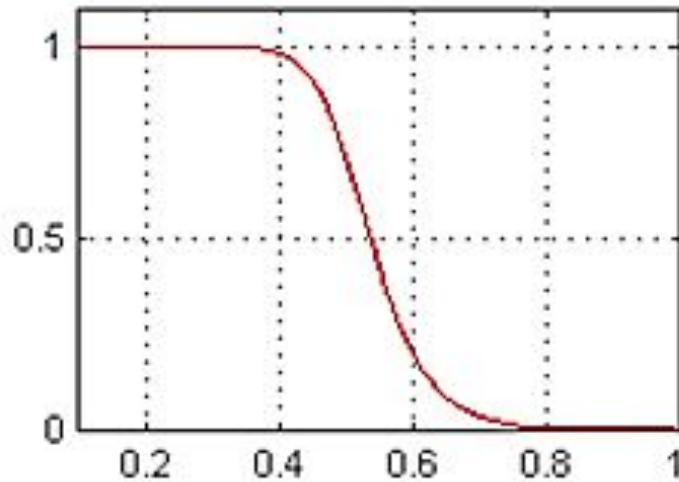


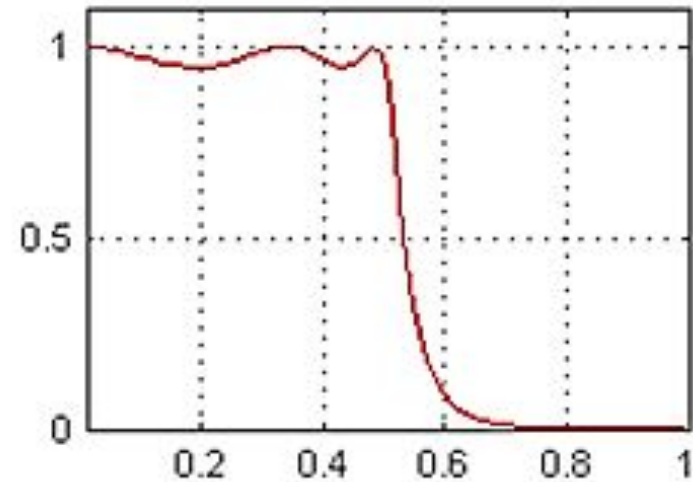
Рис. 57. Амплитудно-частотные характеристики фильтров: нижних частот — ФНЧ (а); верхних частот — ФВЧ (б); полосопропускающих — ФПП (в); режекторных РФ (г); гребенчатых — ГПФ (д); и режекторных гребенчатых — РГФ (е)

# СРАВНЕНИЕ РАЗНЫХ ТИПОВ ФНЧ ПО ОСОБЕННОСТЯМ ИХ АЧХ

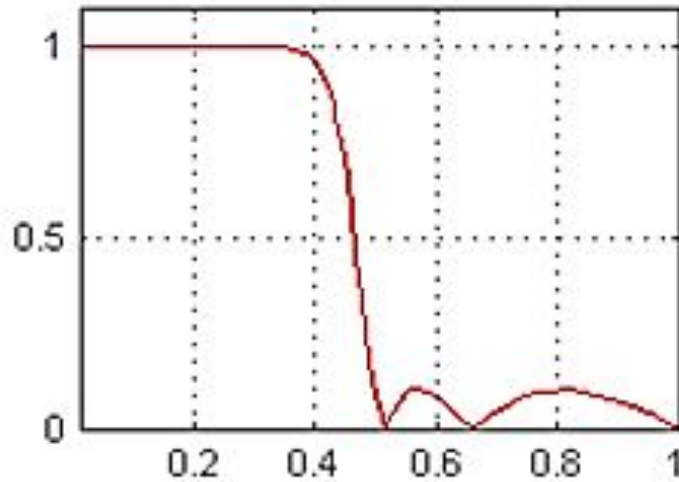
Фильтр Баттерворта



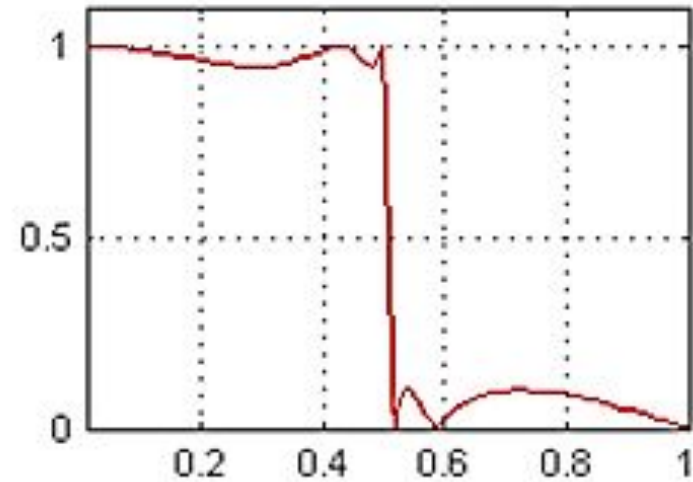
Фильтр Чебышева I рода



Фильтр Чебышева II рода



Эллиптический фильтр

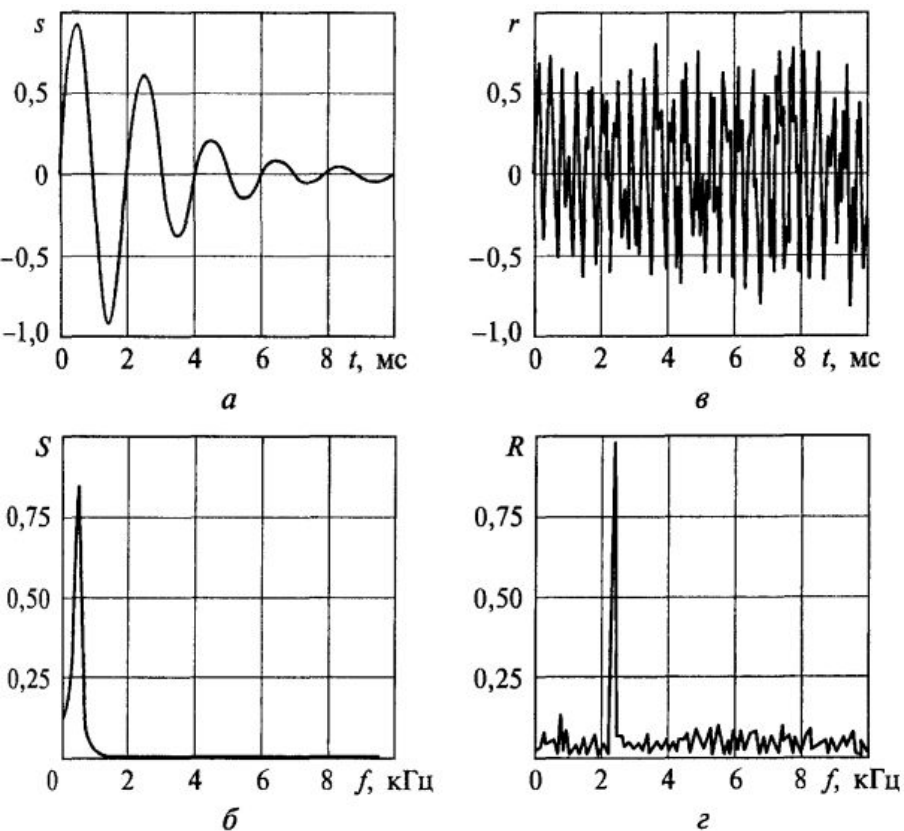




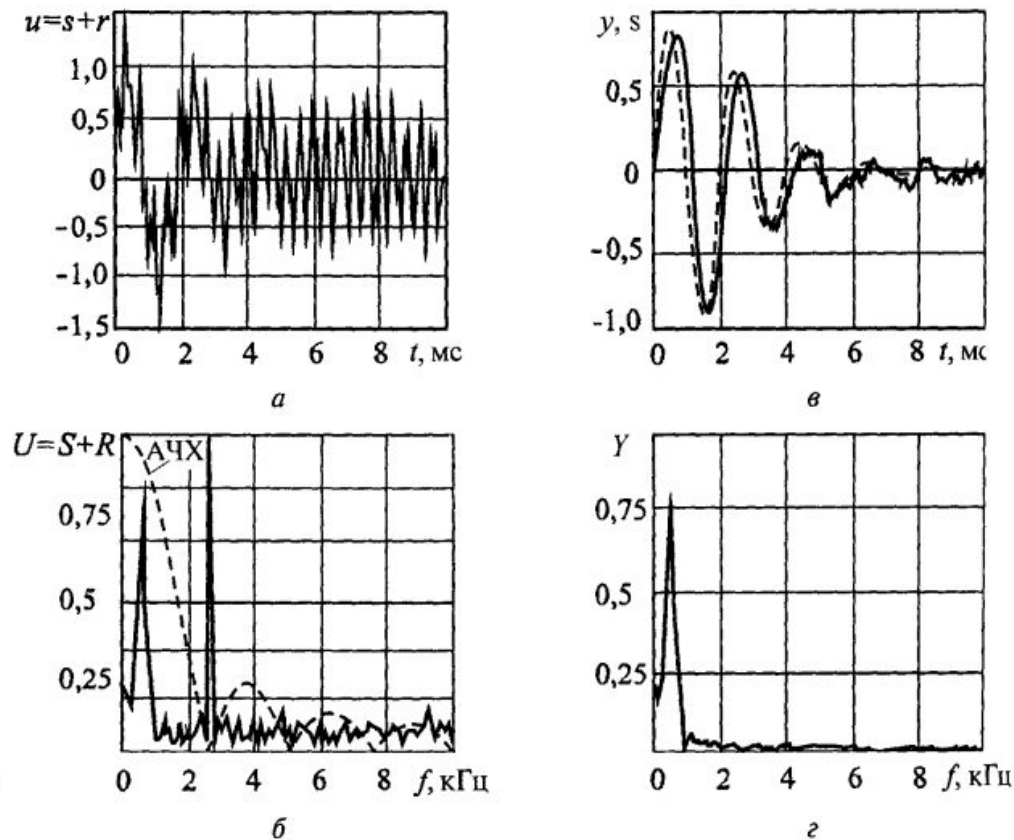
## Основные типы частотных характеристик

Тип частотной характеристики	Особенности
Фильтр Баттеруорта	<p><u>Максимально плоская частотная характеристика в полосе пропускания, равномерное увеличение подавления в полосе затухания, <u>нелинейное изменение фазы от частоты</u> (неравномерная задержка)</u></p>
Фильтр Чебышева	<p>Увеличение коэффициента усиления на предельной частоте, <u>неравномерность в полосе пропускания и в полосе затухания</u></p>
Фильтр Бесселя (или Томпсона)	<p>Самые лучшие импульсные показатели (время нарастания и время отсечки), линейное изменение фазы (равномерная задержка)</p>
Эллиптический фильтр (или Кауэра)	<p>Полюсы находятся в полосе подавления, что обеспечивает <u>выброс на предельной частоте и пульсации в полосе пропускания и в полосе затухания, но <u>самый лучший наклон характеристики</u></u></p>
Параболический фильтр	<p><u>Самый лучший компромисс между частотной характеристикой и временными показателями</u></p>

# К ПОЯСНЕНИЮ НАЗНАЧЕНИЯ ФИЛЬТРОВ

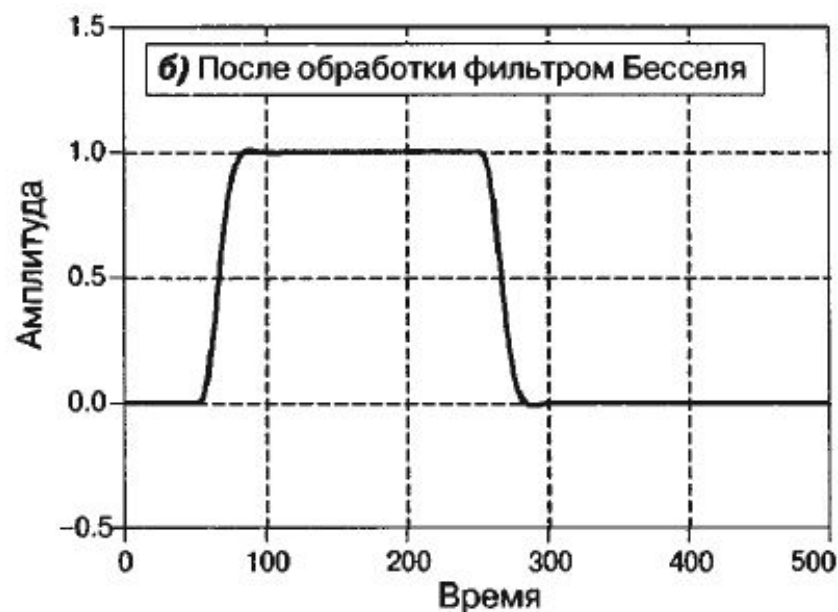
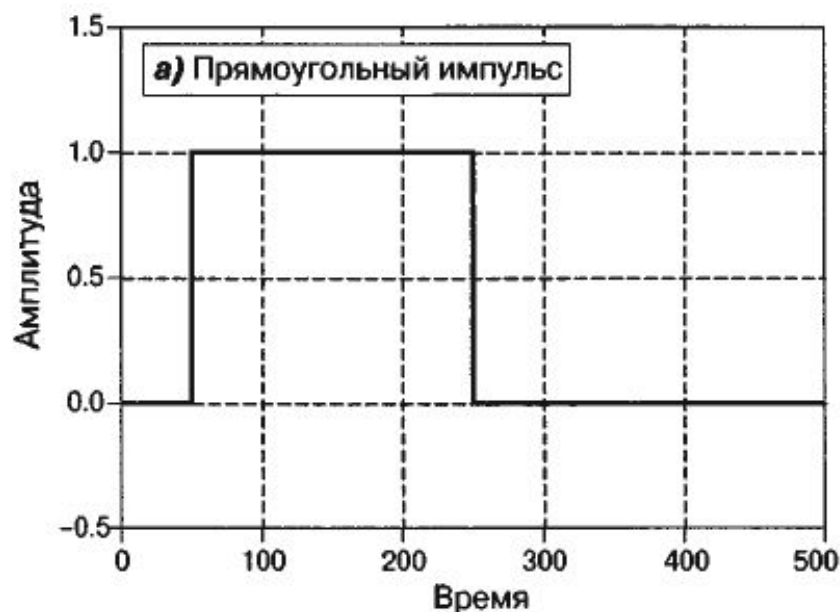


**Рис. 4.46.** Сигнал и помеха на входе канала связи:  
 $a$  — сигнал;  $b$  — спектр сигнала;  $v$  — помеха;  $z$  — спектр помехи

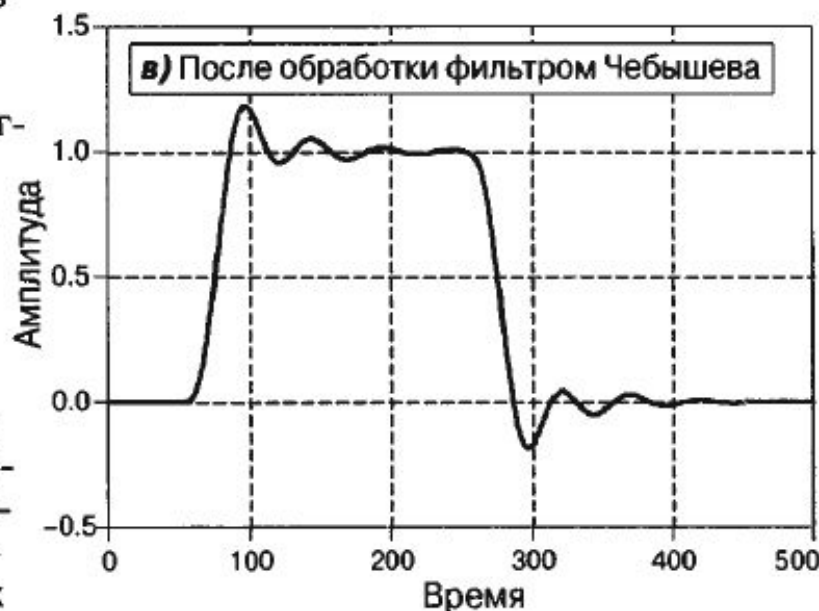


**Рис. 4.47.** Сигнал и помеха на входе и выходе фильтра:  
 $a$  — сигнал в помехах;  $b$  — спектр сигнала в помехах;  
 $v$  — сигнал после фильтрации;  $z$  — спектр профильтрованного сигнала

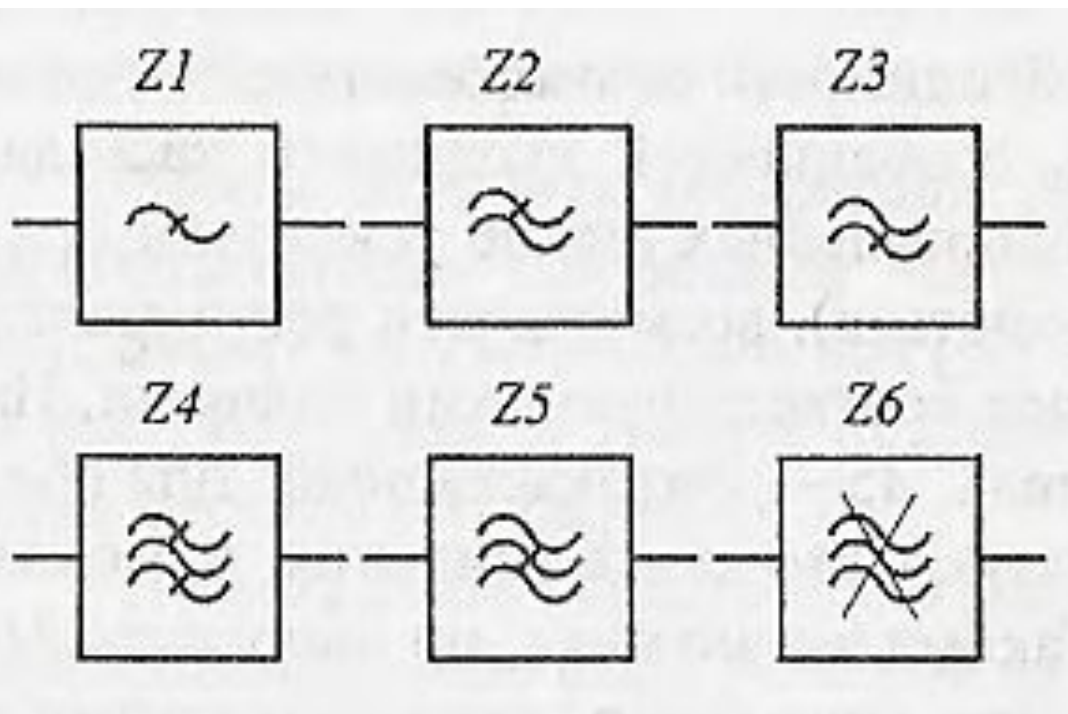
## К ПОЯСНЕНИЮ НАЗНАЧЕНИЯ ФИЛЬТРОВ



**Рис. 3.14.** Импульсная характеристика фильтров Бесселя и Чебышева. Ключевой особенностью фильтра Бесселя является то, что передний и задний фронты импульса на выходе фильтра выглядят одинаково. В терминах ЦОС это называется фильтр с линейной фазовой характеристикой. На (б) проиллюстрирован результат прохождения импульса, показанного на (а), через фильтр Бесселя с 4 полюсами. Оба фронта сглажены одинаково. На (в) изображён результат прохождения прямоугольного импульса через фильтр Чебышева с 4 полюсами. На переднем фронте наблюдается резкое усиление сигнала, а на заднем — ослабление. Такого рода искажения оказываются недопустимыми для многих приложений.



# УГО и ПО фильтров на структурных схемах устройств



- Z1 – общее обозначение фильтра
- Z2 – ФНЧ
- Z3 – ФВЧ
- Z4 – полосовой фильтр
- Z5 – режекторный фильтр
- Z6 – подавитель помех

# СИНТЕЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

Под синтезом линейной цепи (здесь — электрического фильтра) понимают определение структуры и параметров элементов ее схемы, обеспечивающих заданные свойства. Как правило, синтез такой цепи — неоднозначная процедура, поскольку заданным параметрам и характеристикам могут отвечать несколько структур. Желательно, чтобы синтезируемая цепь содержала минимально возможное число элементов и была в некотором смысле оптимальна.

На первом этапе синтеза выбирают идеализированную функцию, достаточно точно описывающую частотный коэффициент передачи по мощности. Обычно фильтр, отвечающий идеализированной частотной характеристике, практически неосуществим (физически нереализуем). Поэтому этот этап включает также аппроксимацию выбранной идеальной частотной характеристики такой функцией, которая может принадлежать физически реализуемому фильтру.

Второй этап синтеза заключается в практической реализации фильтра (разработке принципиальной схемы), обладающего полученной частотной характеристикой.

Основой реализации служит *передаточная функция (операторный коэффициент передачи)* фильтра  $K(p)$ .

$$K(p) = \frac{R(p)}{Q(p)} = K_0 \frac{(p - z_1)(p - z_2) \cdots (p - z_m)}{(p - p_1)(p - p_2) \cdots (p - p_n)},$$

где  $K_0$  — постоянная величина;  $z_1, z_2, \dots, z_m$  — нули функции  $K(p)$ , т. е. корни уравнения числителя  $R(p) = 0$ ;  $p_1, p_2, \dots, p_n$  — полюсы функции  $K(p)$ , т. е. корни уравнения знаменателя  $Q(p) = 0$ ;  $m$  и  $n$  — соответственно порядки полиномов  $R(p)$  и  $Q(p)$ .

## СИНТЕЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

В теории синтеза фильтров рассматривают линейные четырехполюсники, передаточные функции которых имеют ограниченное число нулей и полюсов. Значит, фильтры содержат конечное число сопротивлений, индуктивностей и емкостей. Для упрощения расчетов вводят еще два дополнительных условия: число полюсов передаточной функции должно превышать число нулей; полюсы должны располагаться в левой полуплоскости. Если нули и полюсы передаточной функции заданы, то используют структурный синтез, при котором фильтр реализуют в виде каскадного включения  $N$ -го числа простейших звеньев (цепей) с передаточными функциями  $K_1(p)$ ,  $K_2(p)$ , ...,  $K_M(p)$ , разделенных идеальными усилителями. Передаточная функция фильтра определяется произведением

$$K(p) = K_1(p)K_2(p) \cdots K_M(p).$$

# ФНЧ. СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ

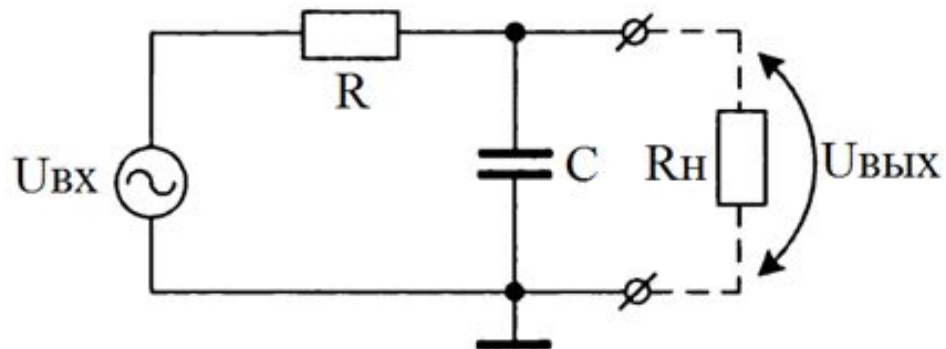
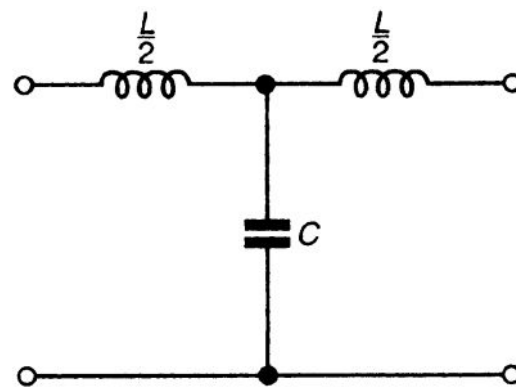
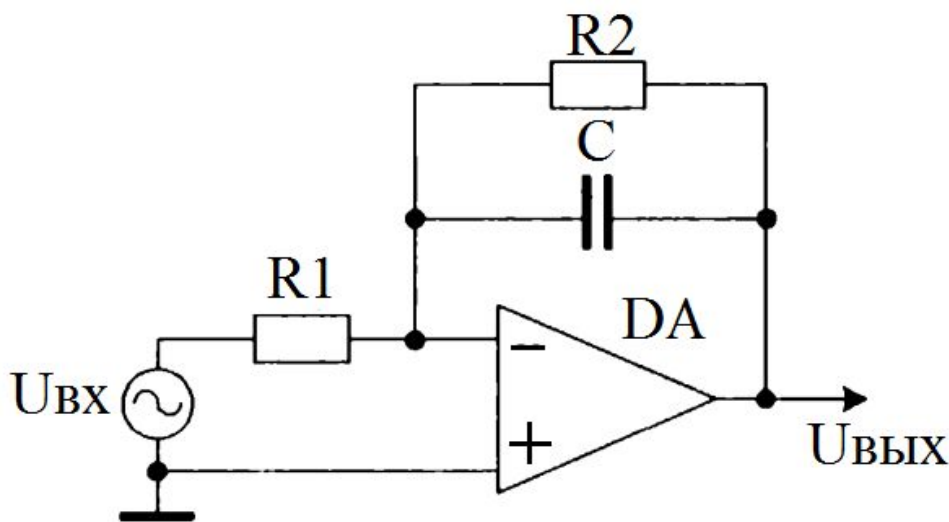


Схема пассивного ФНЧ первого порядка

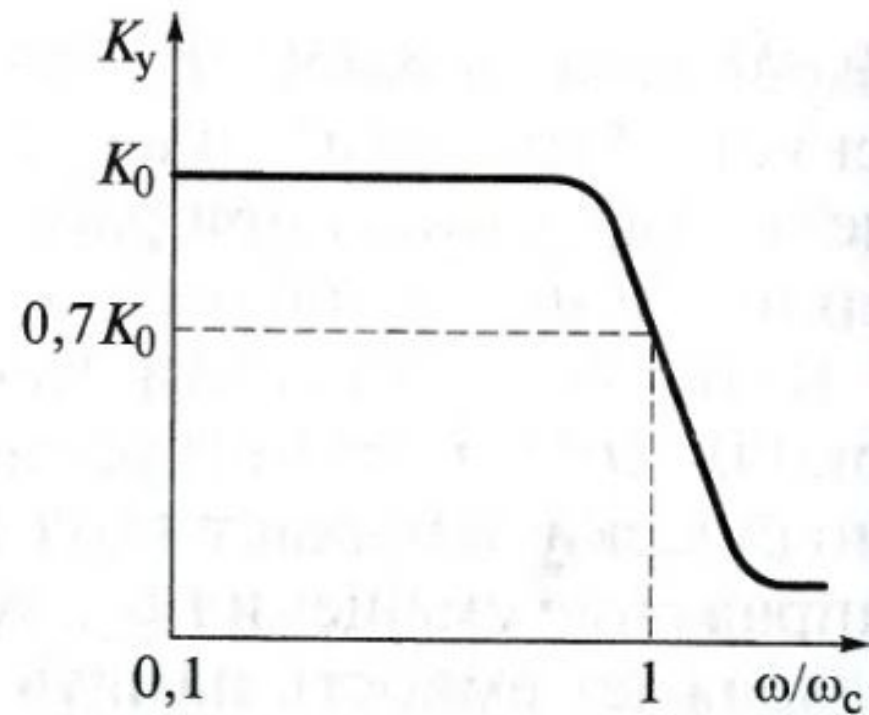
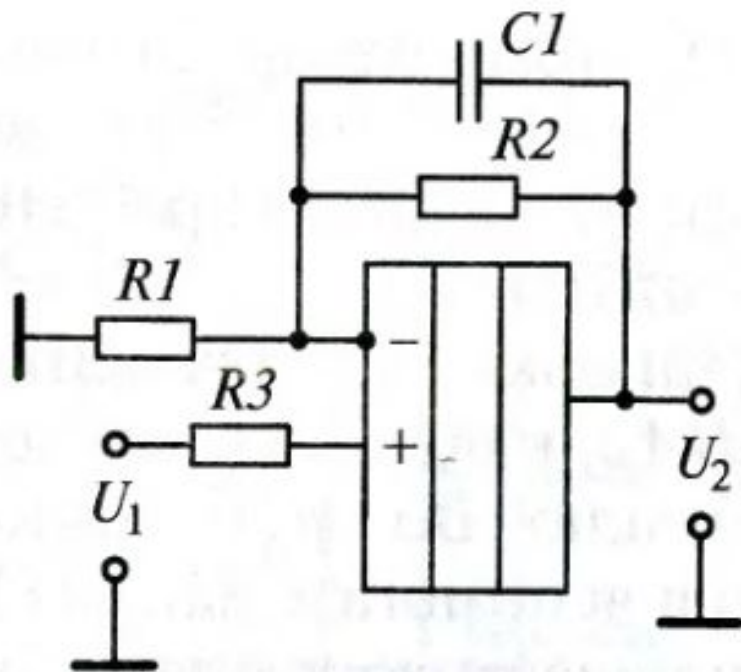


T-образный фильтр низкой частоты



Активный ФНЧ первого порядка на основе инвертирующего ОУ

# ФНЧ. СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ





# ФВЧ. СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ

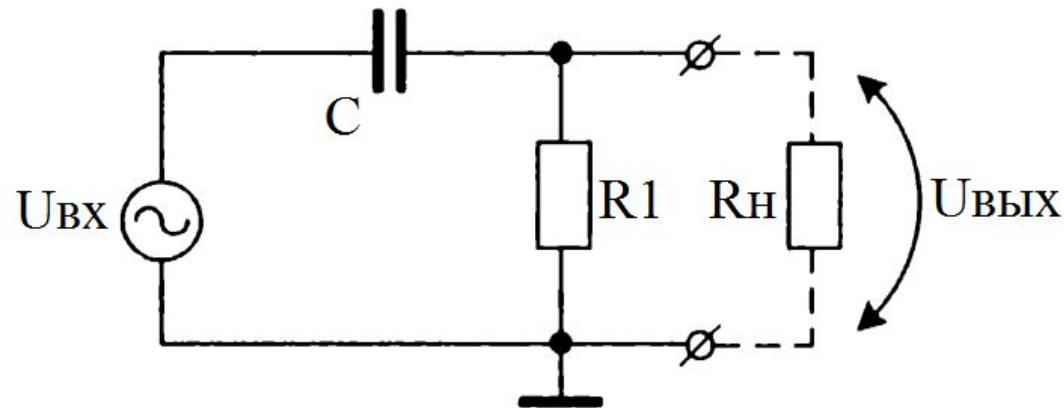
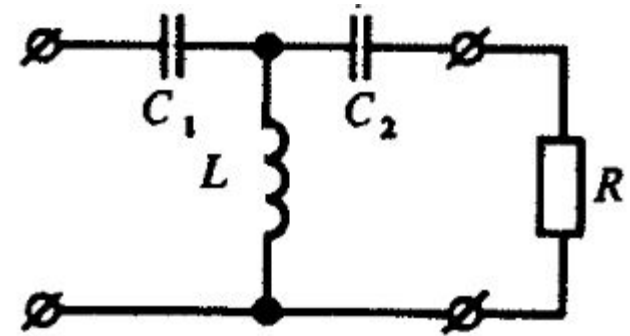
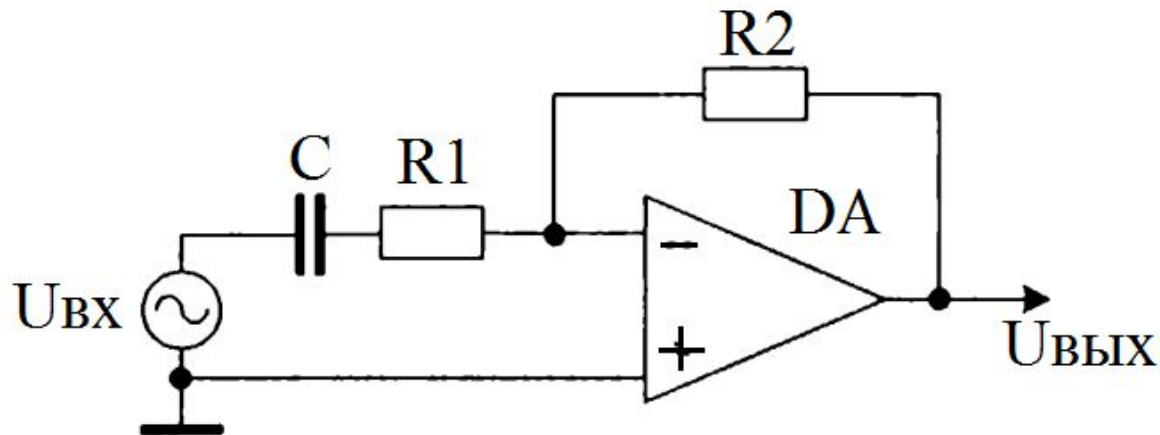


Схема пассивного ФВЧ первого порядка

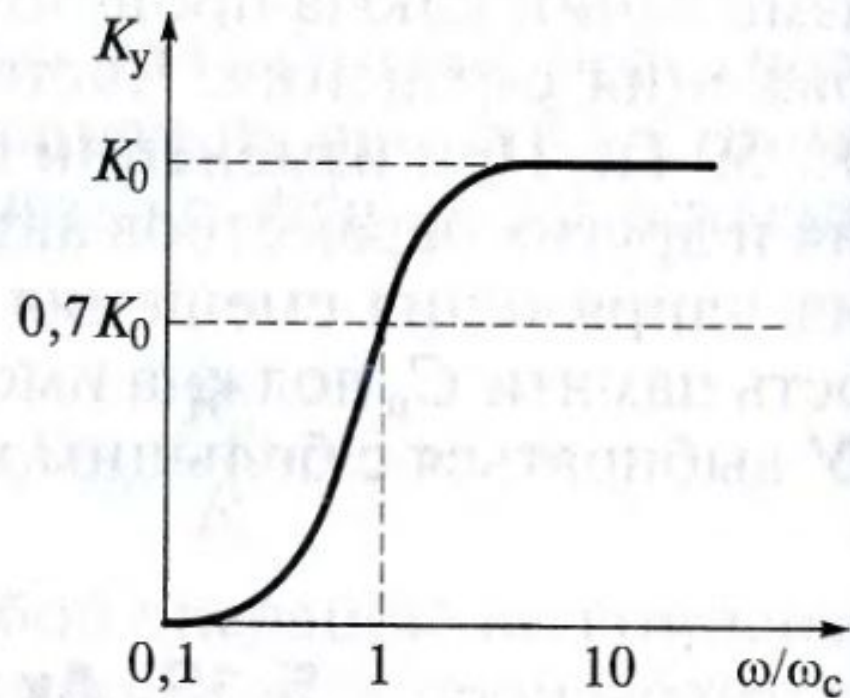
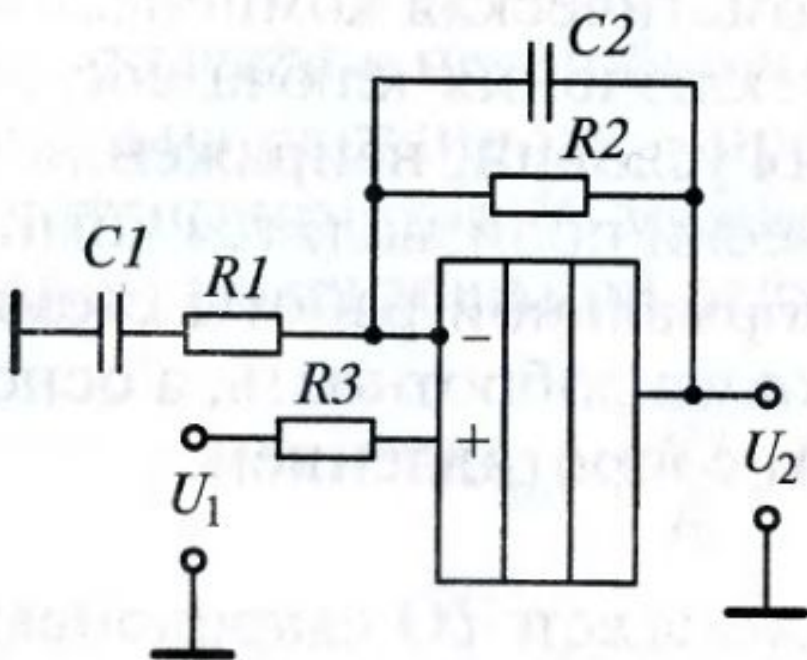


T-образный ФВЧ



Активный ФВЧ первого порядка на основе инвертирующего ОУ

# ФВЧ. СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ



# РЕЖЕКТОРНЫЙ ФИЛЬТР. СХЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ

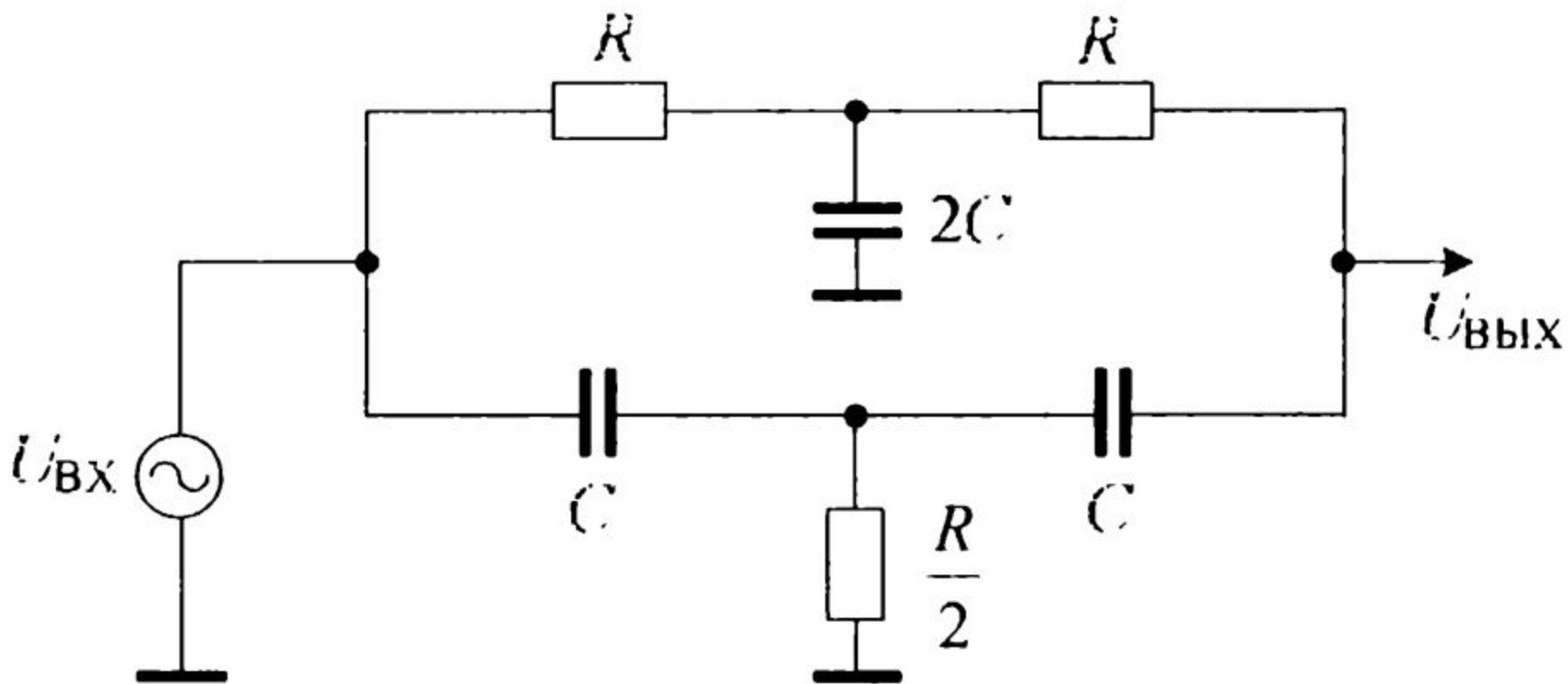
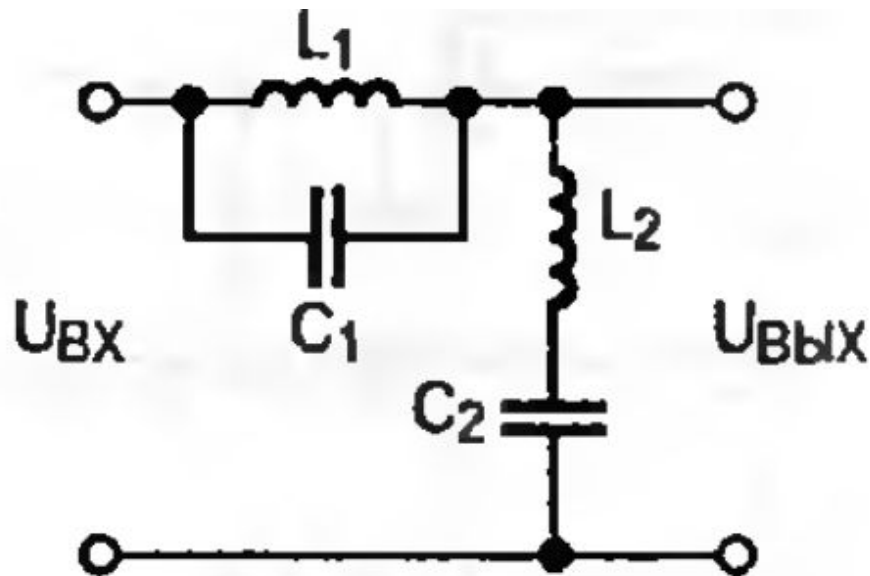
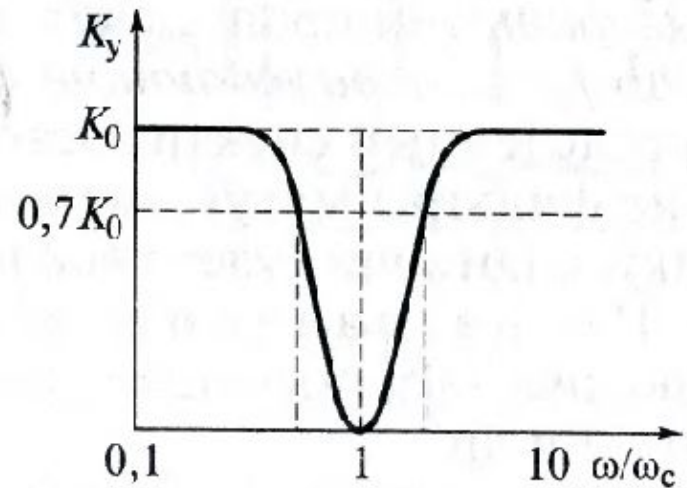
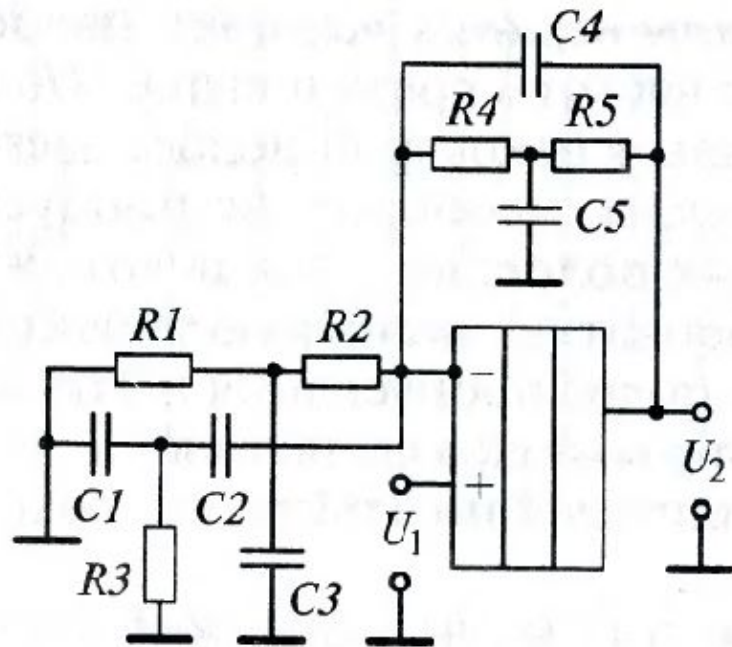
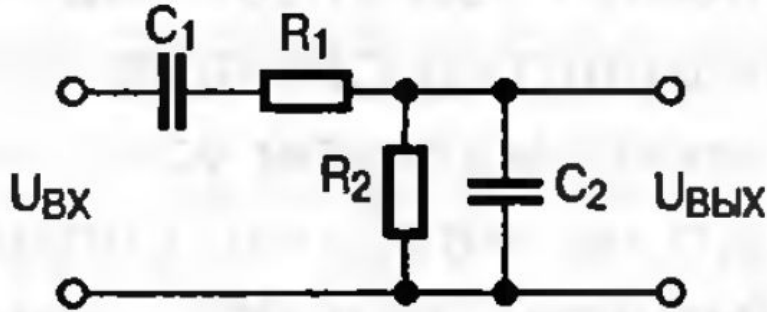
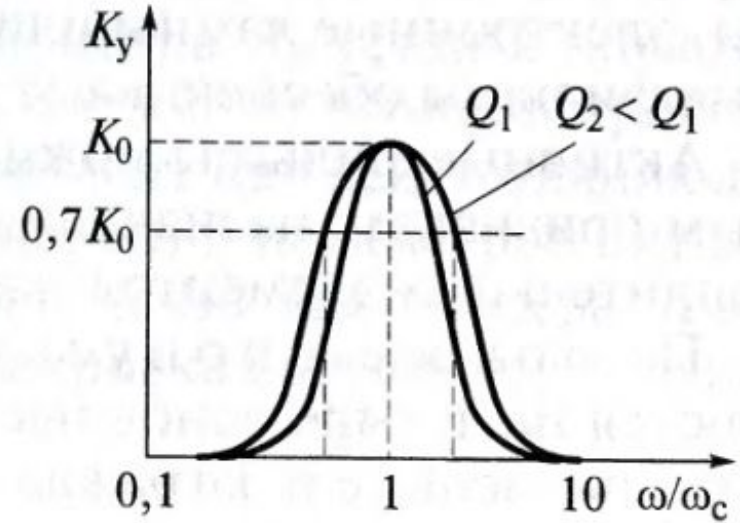
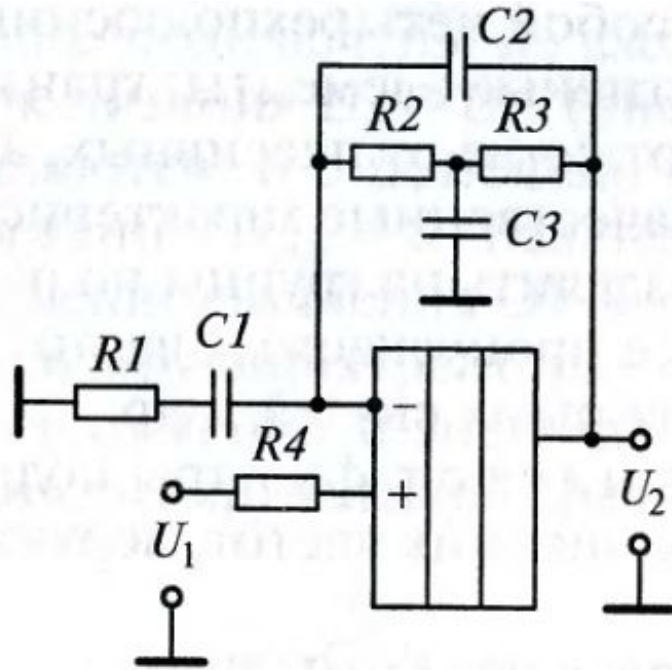


Схема двойного Т-образного режекторного фильтра

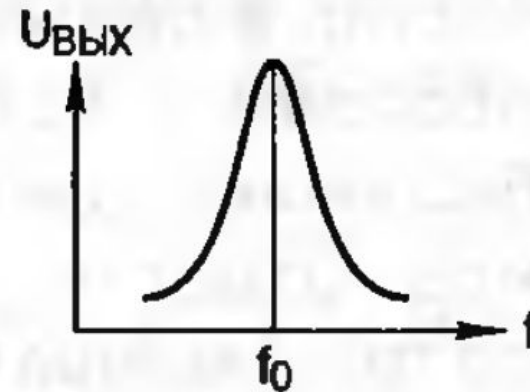
# РЕЖЕКТОРНЫЙ ФИЛЬТР. СХЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРИНЦИПАЛЬНАЯ



# ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР. СХЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ



а)



б)

# Индивидуальное задание на ноябрь-декабрь

*Обзорные рефераты на темы*

► «Современные методы инженерного творчества»

(к 4 декабря)

► «Современные отрасли человеческой деятельности, требующие специалистов со знанием СиСЭС»

(к 11 декабря)

► «Отечественные предприятия – разработчики и производители современной ЭКБ» (к 4 декабря)

# Домашнее задание

*СТАРОЕ (по генераторам) до 22 ноября*

- )Глава 6 на конспект [Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи, 2009]
- )Глава 11 изучить [Опадчий, Глудкин. Аналоговая и цифровая электроника]
- )Параграфы 32 и 33 изучить [Бобровников Л.З. Радиотехника и электроника, 1990]
- )Пункты 14.4 и 14.5 изучить [Баскаков С.И. РТЦ и С, 2000]
- )Параграфы 5.15, 6.1 изучить [Лаврентьев Б.Ф. Схемотехника электронных средств. 2010]
- )Параграфы 11.6, 11.7, 11.8, 11.9, Глава 16 полностью изучить [Игумнов Д.В., Костюнина Г.П. Основы полупроводниковой электроники, 2005]
- )Журнал «Радиоконструктор», номера 1-12 за 2001 год изучить (алгоритм чтения схемы электрической принципиальной: назначение устройства, ТХ, особенности схемы и используемой ЭКБ, назначение элементов, особенности протекающих в схеме сигналов и процессов, алгоритм работы).
- )Circuit Simulator. Изучить процессы, протекающие в схемах генераторов сигналов (вкладки *Circuits: Transistors/Multivibrators, Transistors/Oscillators, MOSFETs/InverterOscillator, OpAmps/Oscillators, 555TimerChip, MiscDevices/TunnelDiodes/LC-oscillator and Relaxation Oscillator*) [<http://www.falstad.com/circuit/>]

# Домашнее задание

*НОВОЕ (по фильтрам) до 6 декабря*

- ) Пункт 4.7 на конспект [Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи, 2009]
- ) Глава 8 изучить [Перепелкин Д.А. Схемотехника усилительных устройств, 2014]
- ) Параграфы 25, 26, 27, 28, 29, 30 на конспект [Бобровников Л.З. Радиотехника и электроника, 1990]
- ) Главы 13 и 15 изучить [Баскаков С.И. РТЦ и С, 2000]
- ) Параграф 5.12 изучить [Лаврентьев Б.Ф. Схемотехника электронных средств. 2010]
- ) Параграфы 11.2, 11.4, 11.5 изучить [Игумнов Д.В., Костюнина Г.П. Основы полупроводниковой электроники, 2005]
- ) Журнал «Радиоконструктор», номера 1-12 за 2002 год изучить (алгоритм чтения схемы электрической принципиальной: назначение устройства, ТХ, особенности схемы и используемой ЭКБ, назначение элементов, особенности протекающих в схеме сигналов и процессов, алгоритм работы).
- ) **Circuit Simulator**. Изучить процессы, протекающие в схемах активных и пассивных фильтров (вкладки *Circuits: Passive Filters, Active Filters*) [<http://www.falstad.com/circuit/>]