

Тема 3.3. Операционные усилители

Структура, параметры и характеристики операционного усилителя (ОУ). Примеры использования ОУ (интегратор, дифференциатор, сумматор, умножитель и т.д.).

Тема.3.4. Избирательные усилители. Активные фильтры
Резонансный усилитель с LC-контуром.

Активные фильтры на операционных усилителях с различными RC-звеньями в обратной связи.

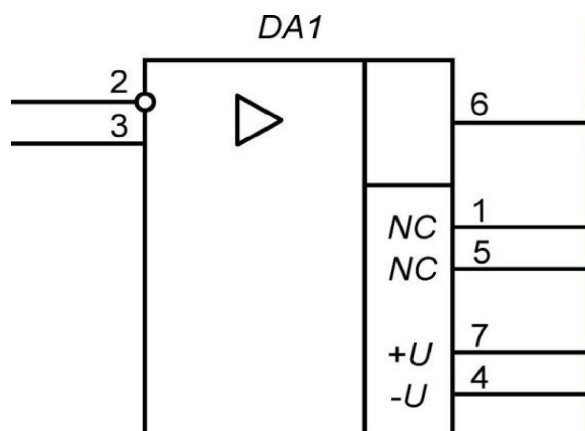
Использование 2Т-моста в обратной связи для низкочастотных избирательных усилителей.

Литература:

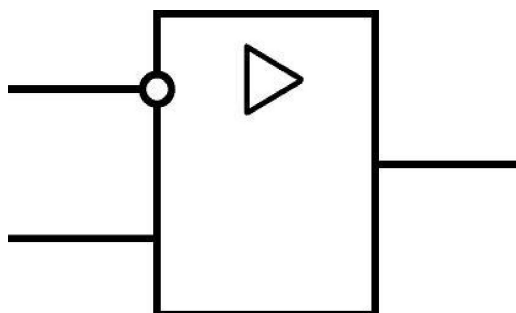
1. Ю.Ф. Опадчий и др. Аналоговая и цифровая электроника с.183-271.
2. Бобровников Л.З. Учебник для вузов. 5-е изд., перераб. И доп. – СПб.: Питер, 2004.- 560с. (стр.208-242).

Операционный усилитель – многокаскадный усилитель с дифференциальным входом, предназначенный для выполнения математических операций с аналоговыми сигналами.

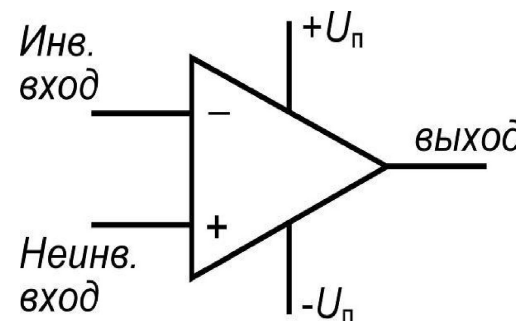
В иностранной литературе имеет сокращение **OpAmp** от английского **Operational Amplifier**.



Обозначение ОУ согласно ГОСТ 2.759-82 на примере К140УД6

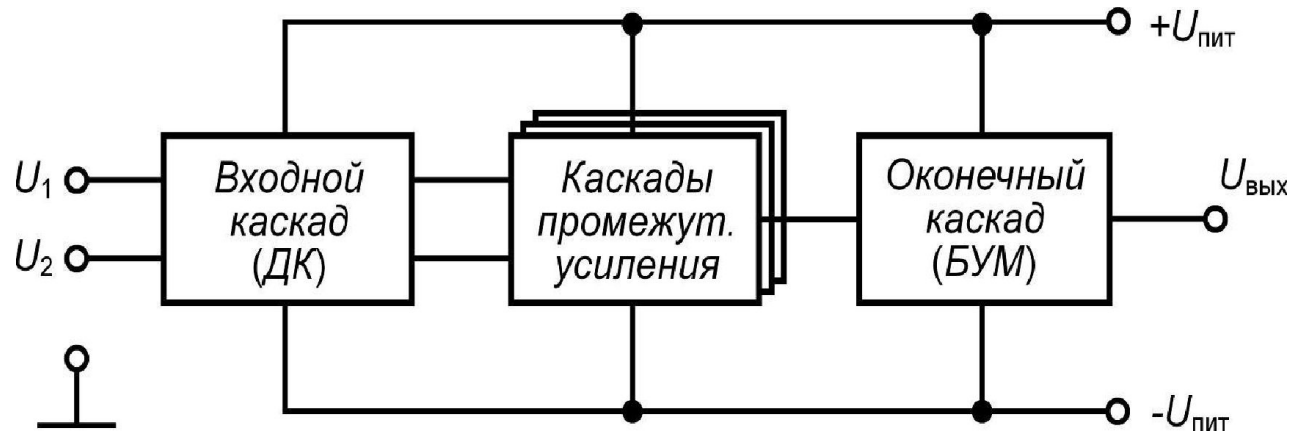


Упрощенное обозначение ОУ



Устаревшее обозначение ОУ (зарубежное обозначение)

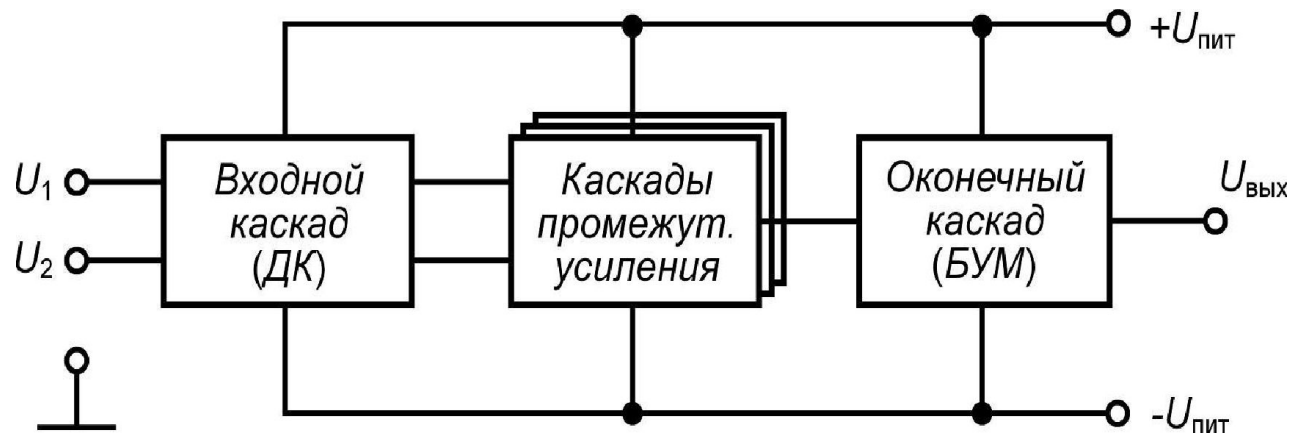
Функциональная схема (трехкаскадного) ОУ



Входной каскад (на дифференциальном усилителе):

- максимально уменьшить величину дрейфа усилителя;
- получить достаточно высокое усиление;
- обеспечить получение максимально высокого входного сопротивления;
- максимально подавить действующие на входе синфазные составляющие, обусловленные изменением температуры окружающей среды, изменением напряжения питания, старением элементов и т.п.

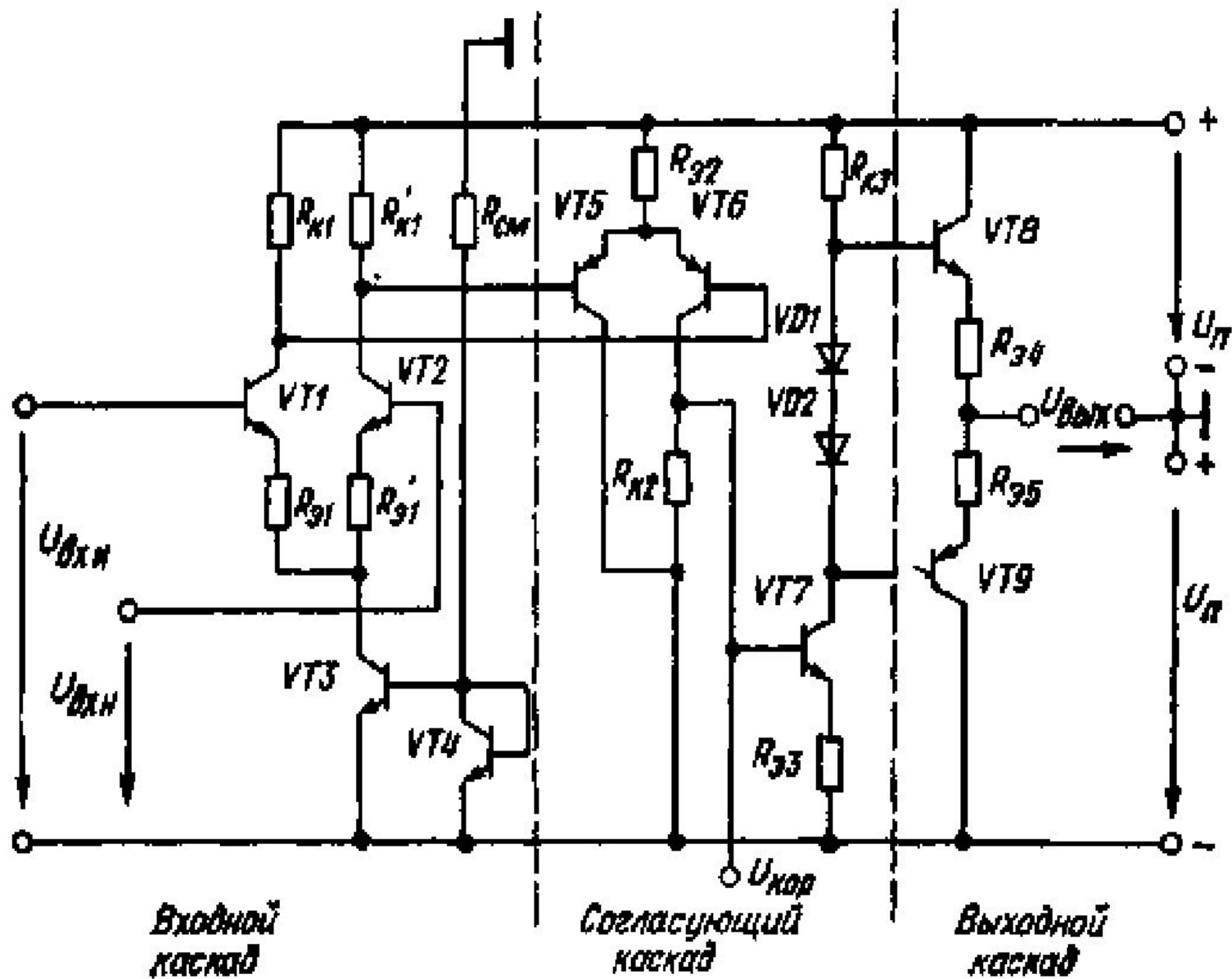
Функциональная схема (трехкаскадного) ОУ



Каскады промежуточного усиления обеспечивают необходимое усиление сигнала по току и напряжению, согласование выходного сигнала дифференциального усилителя входного каскада с выходным каскадом ОУ, согласование фаз сигналов.

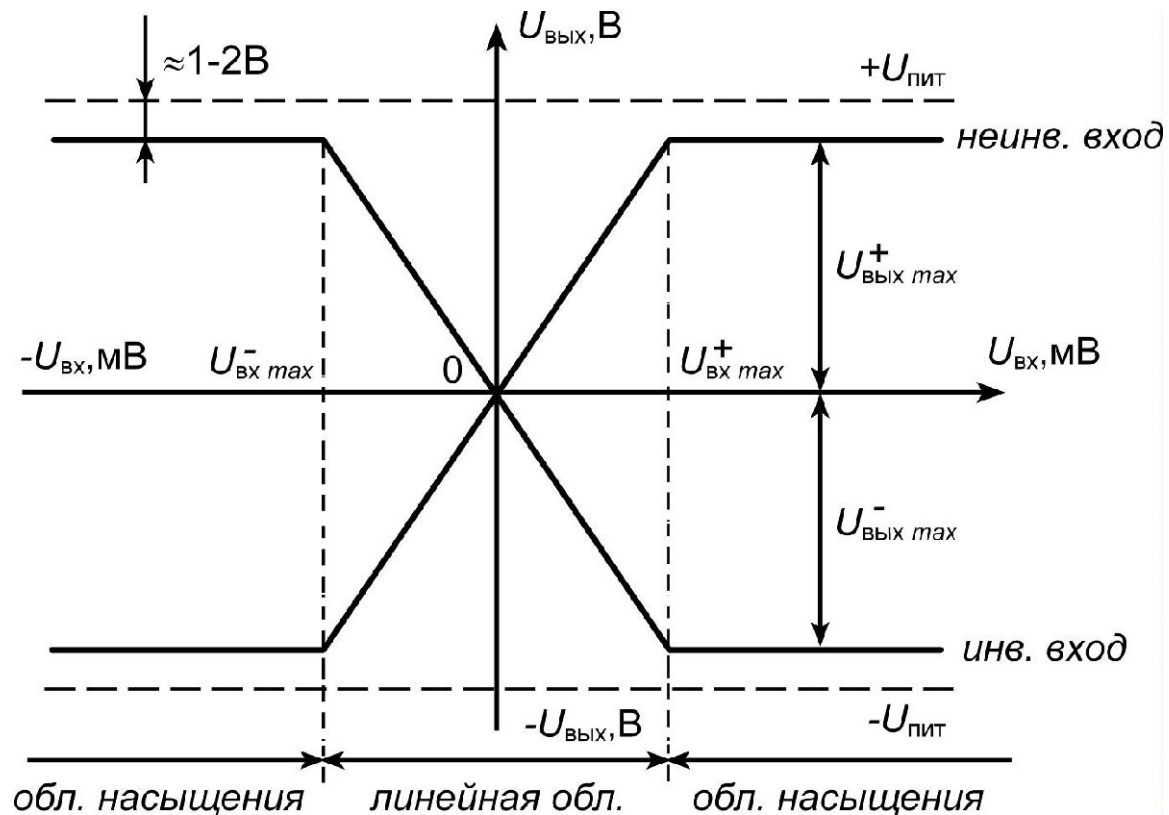
Оконечный (выходной) каскад обеспечивает требуемое усиление сигнала по мощности и выполняется, как правило, по двухтактной схеме. Обычно ОУ обладают невысокой выходной мощностью и не допускают подключение нагрузки менее 1-2 кОм.

Упрощенная схема трехкаскадного ОУ



Основные характеристики ОУ

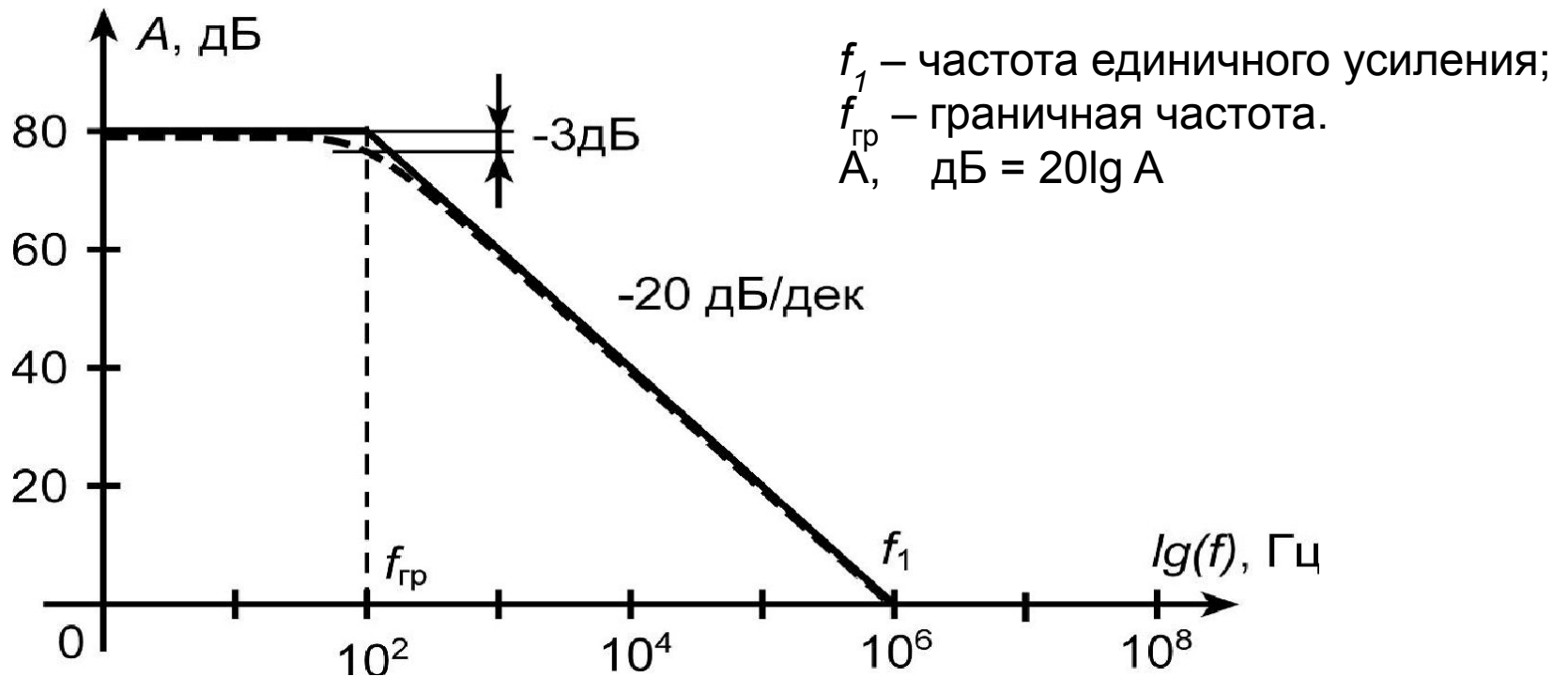
1. Амплитудная характеристика $U_{\text{ВЫХ}} = F(U_{\text{ВХ}})$ при $f = \text{const}$.



Коэффициент усиления $\mathbf{A} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ.}}}{\Delta U_{\text{ВХ.}}}$

Основные характеристики ОУ

2. Амплитудно-частотная характеристика $A = F(f)$ при $U_m = \text{const}$



A	1	10	100	1 000	10 000	100000
$A, \text{ дБ}$	0	20	40	60	80	100

Основные характеристики ОУ

3. Коэффициент усиления без ОС (A) – коэффициент усиления разностного сигнала ОУ в отсутствии ООС и соответствует максимальному значению на АЧХ.

$$A = \frac{U_{\text{ВЫХ.}}}{U_2 - U_1} \quad A_{\text{тип.}} = 10^5.$$

4. Коэффициент ослабления синфазного сигнала ($K_{\text{осс}}$) – характеризует способность дифференциального усилителя подавлять синфазный сигнал.

$$K_{\text{осс}} = \frac{K_{\text{синф.}}}{A}$$

Основные характеристики ОУ

5. **Входное сопротивление ($R_{вх}$)** – величина, равная отношению, измеренная со стороны одного из входов ОУ при заземленном другом:

$$R_{вх.} = \frac{\Delta U_{вх.}}{\Delta I_{вх.}}$$

$$R_{вх} = 10^6 \div 10^{12} \text{ Ом} \quad (R_{вх} \text{ тип} = 10 \text{ МОм})$$

6. **Выходное сопротивление ($R_{вых}$)** – отношение изменения выходного напряжения ОУ к соответствующему изменению в

$$R_{вых.} = \frac{\Delta U_{вых.}}{\Delta I_{вых.}} \text{ ока:}$$

$$R_{вых} = 150 \div 300 \text{ Ом} \quad (R_{вых} \text{ тип импорт} = 75 \text{ Ом}).$$

Эксплуатационные параметры ОУ

1. Напряжение питания ($\pm U_{\text{ПИТ}}$, В).

Обычно $U_{\text{ПИТ}}$ = от $\pm 5\text{В}$ до $\pm 18\text{В}$.

2. Средний потребляемый ток ($I_{\text{ПОТ}}$, мА).

3. Потребляемая мощность ($P_{\text{ПОТ}}$, мВт).

4. Диапазон рабочих температур (от t_{min} до t_{max} , $^{\circ}\text{C}$).

5. Максимальные выходное и входное напряжения в линейном режиме.

Например, при $U_{\text{ПИТ}} = \pm 15\text{В}$ имеем $U_{m\text{ ВХ}} = U_{m\text{ ВЫХ}} = \pm 10\text{В}$.

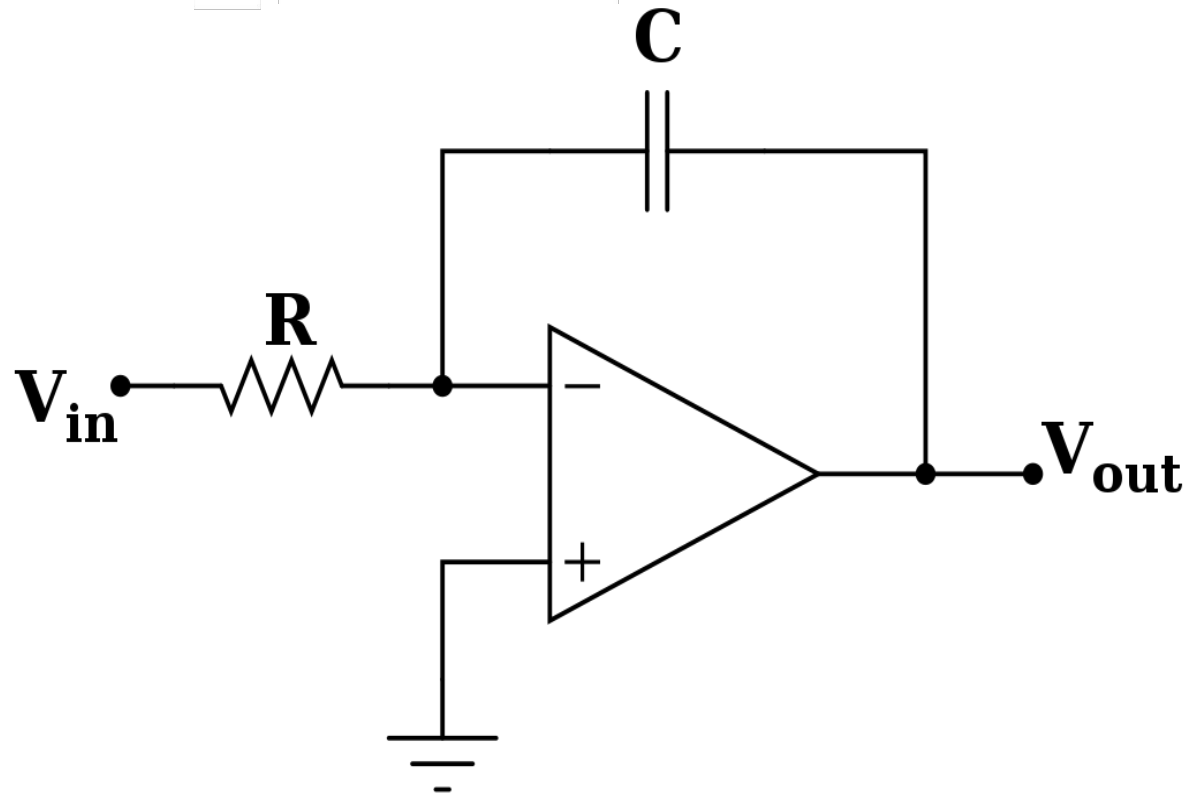
6. Напряжение насыщения ОУ ($U_{\text{НАС}}$, В) зависит от $U_{\text{ПИТ}}$; величина меньше на 1-2В; технология Rail-to-rail: ($V_{\text{СС}} - 40\text{mV}$).

7. Максимальный выходной ток ($I_{\text{ПОТ}}$, мА) Часто задается минимальным сопротивлением нагрузки

$R_{\text{Н}}$.

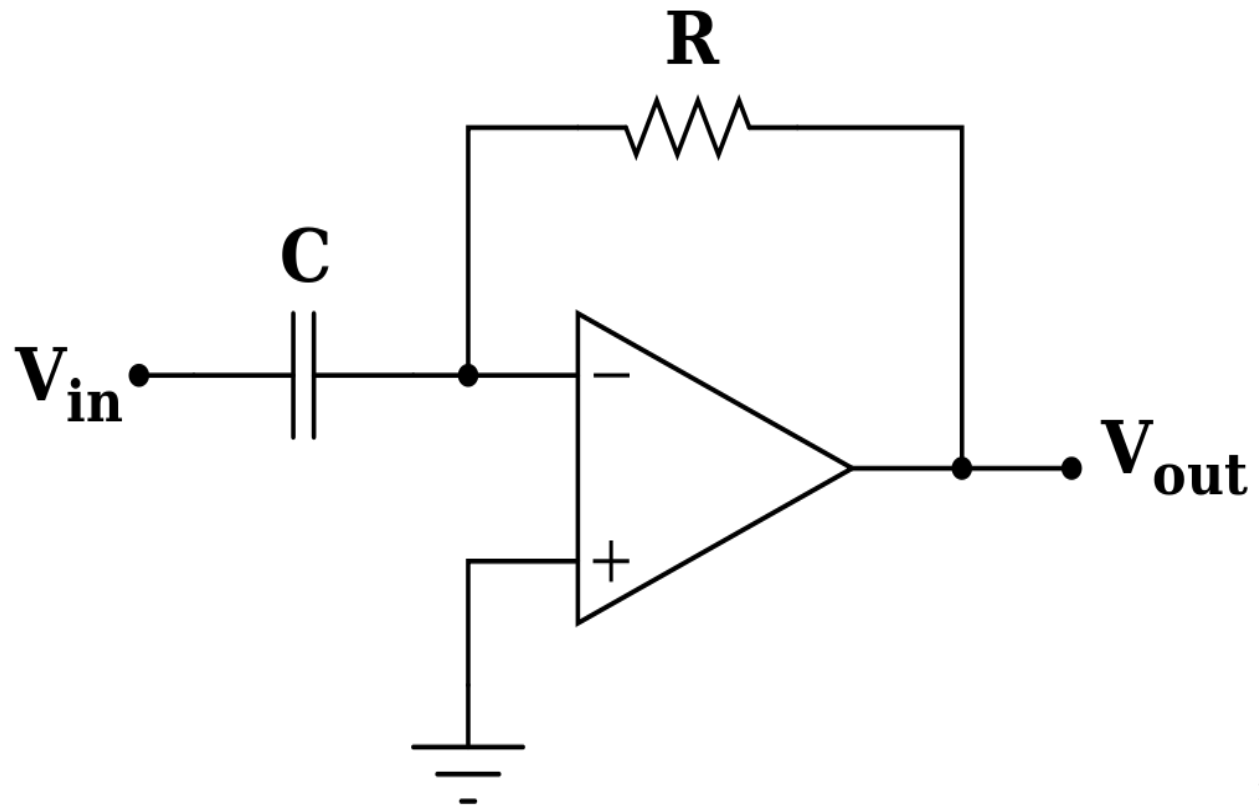
Интегратор – устройство или схема, сигнал на выходе которого в любой момент времени прямо пропорционален интегралу от входного сигнала.

$$V_{\text{out}}(t) = U_c(0) - \frac{1}{RC} \int_0^t V_{\text{in}}(t) dt$$



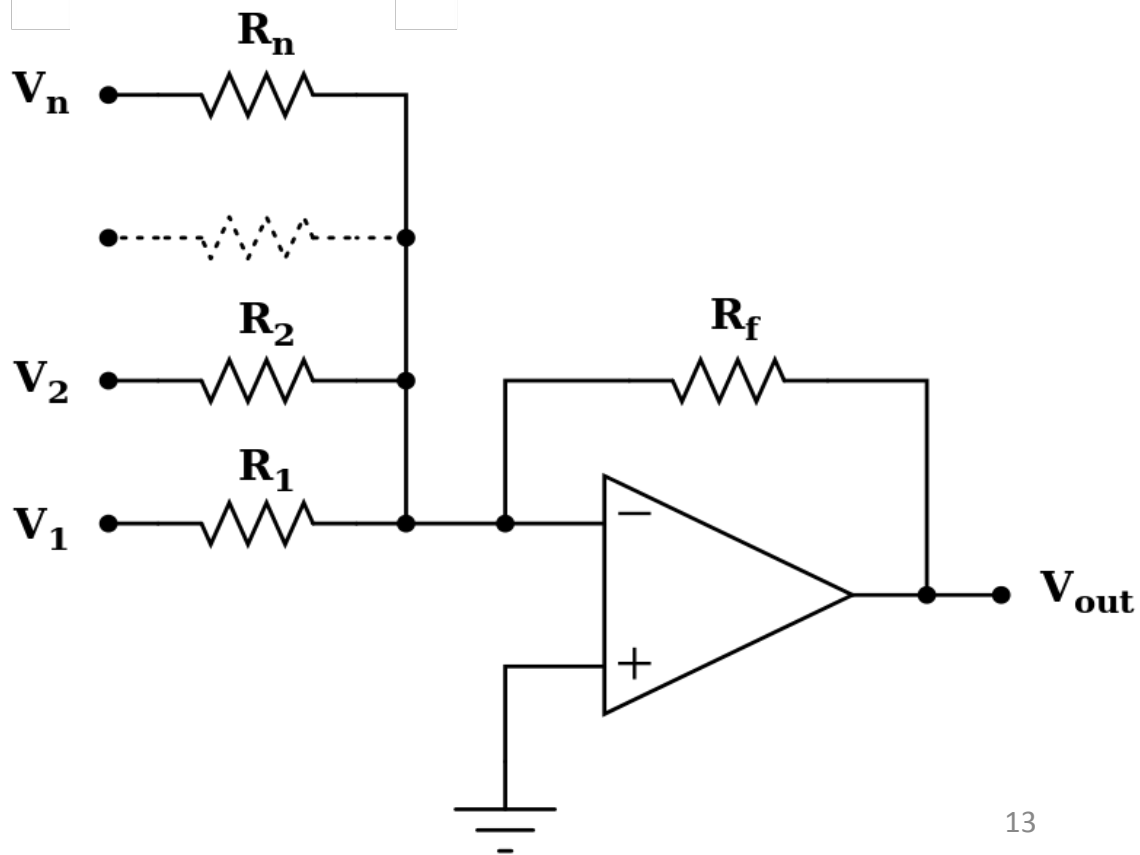
Дифференциатор - устройство или схема, сигнал на выходе которого в любой момент времени прямо пропорционален производной от входного сигнала.

$$V_{out}(t) = -RC \frac{dV_{in}(t)}{dt}$$



Сумматор (инвертирующий) получается из схемы инвертирующего усилителя, подключением дополнительных входов. Данная схема осуществляет суммирование сигналов, поданных на

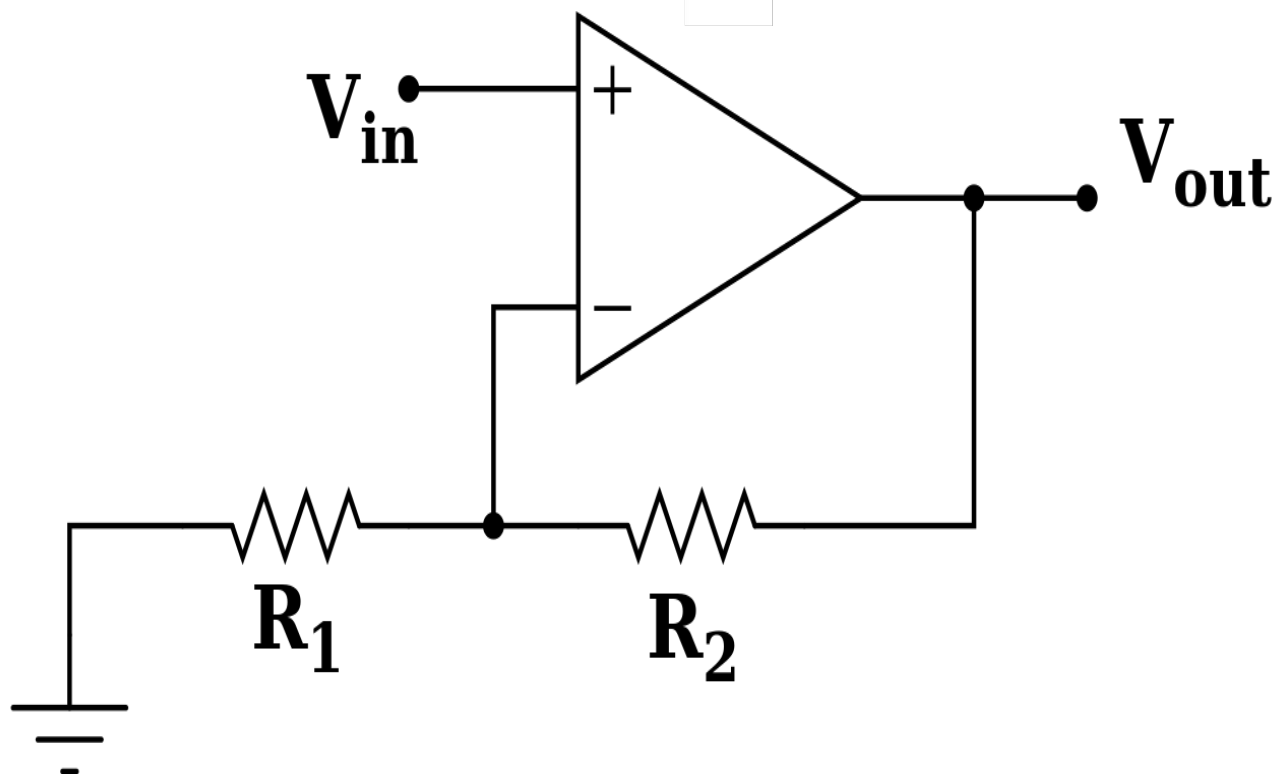
$$V_{\text{out}} \equiv - R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$$



Умножитель.

Усиливает напряжение (умножает напряжение на константу, большую единицы)

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$



Тема.3.4. Избирательные усилители. Активные фильтры

Резонансный усилитель с LC-контуром.

Активные фильтры на операционных усилителях с различными RC-звеньями в обратной связи.

Использование 2Т-моста в обратной связи для низкочастотных избирательных усилителей.

Литература:

Бобровников Л.З. Учебник для вузов. 5-е изд., перераб. И доп. – СПб.: Питер, 2004.- 560с. (стр.208-242).

РЕЗОНАНСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Резонансным (избирательным) усилителем называется усилитель, в котором нагрузкой усилительного элемента является избирательная система

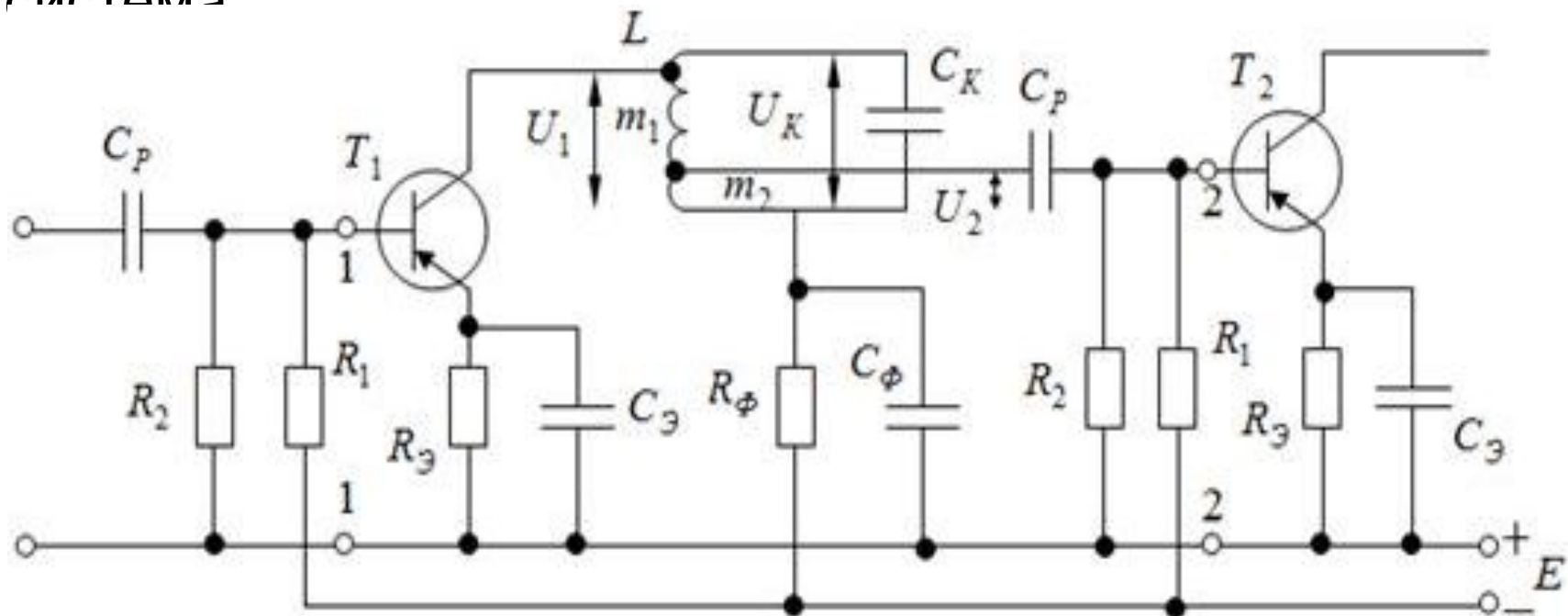
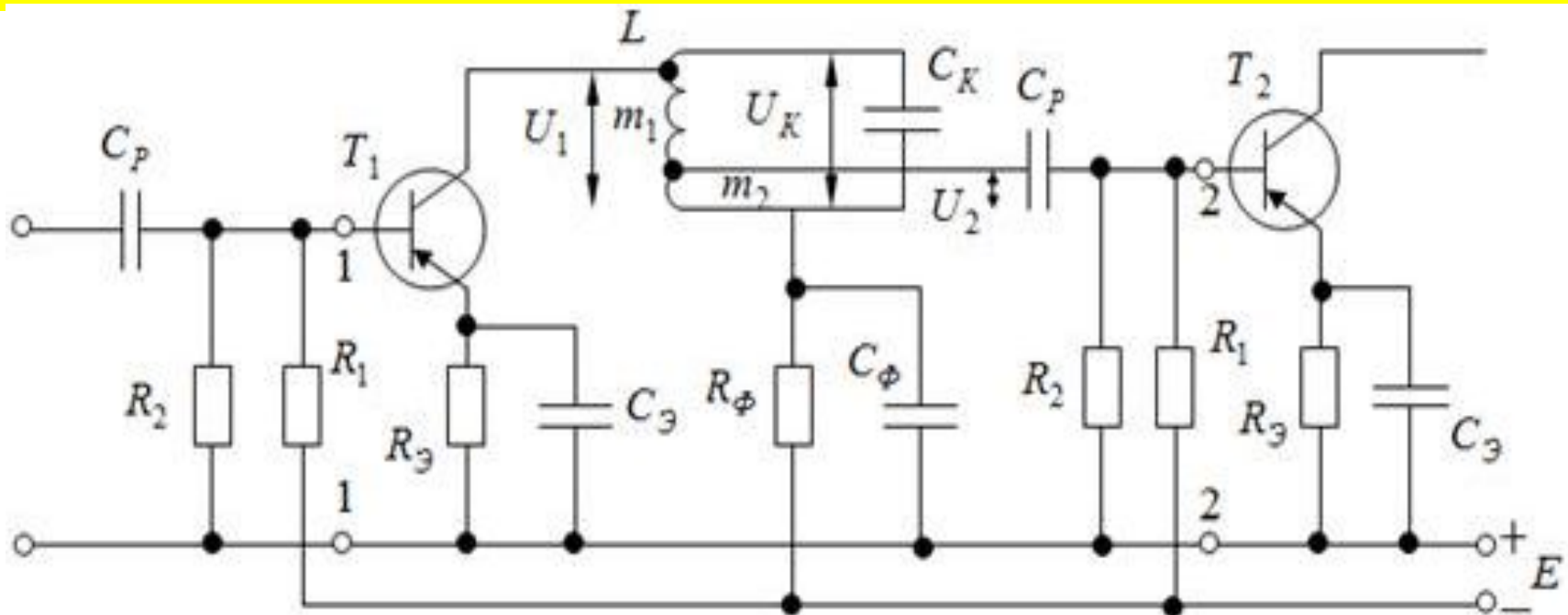


Схема резонансного усилителя на биполярном транзисторе с
одиначным
LC-контуром

РЕЗОНАНСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Перед избирательным усилителем, в отличие от апериодического, **не ставится задача одинакового усиления в как можно более широкой полосе частот. Наоборот, он должен усиливать только спектр сигнала, попадающий в полосу пропускания избирательной системы усилителя.** За пределами полосы пропускания коэффициент усиления такого



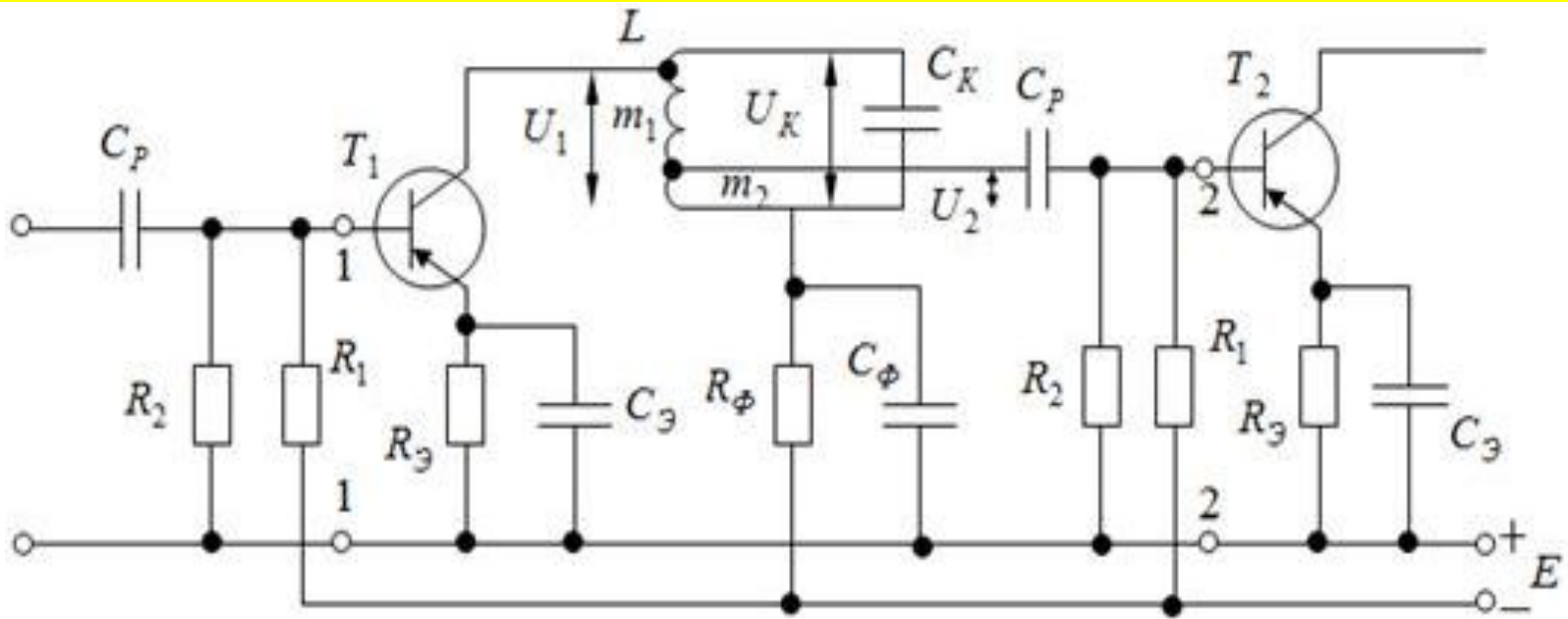
Усилители, в которых нагрузкой усилительного элемента являются полосовые фильтры, называются **полосовыми** усилителями.

Если в процессе работы избирательную систему усилителя можно перестраивать **с одной частоты на другую**, то такой усилитель называется **перестраиваемым**. Например, перестраиваемым избирательным усилителем, как правило, является усилитель радиочастоты (УРЧ) радиоприемника.

Если в процессе работы **частоту настройки усилителя изменить нельзя**, то это будет **неперестраиваемый** усилитель (имеет фиксированную настройку). Например, усилителями с фиксированной настройкой, как правило, являются усилители промежуточной частоты (УПЧ) радиоприемника.

В резонансных (избирательных) усилителях применяются следующие виды **избирательных систем**:

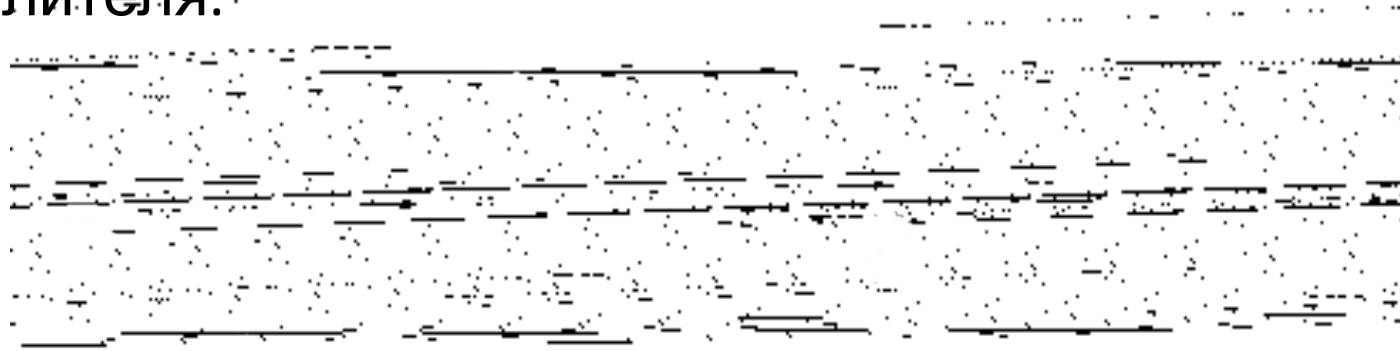
- одиночный колебательный контур,
- полосовой фильтр:
- двухконтурный фильтр,
- многосвязный LC-фильтр,
- кварцевый фильтр,
- электро-механический фильтр и др.



Колебательный

контур

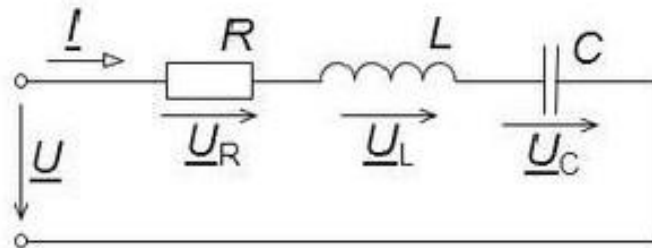
Простейшим видом избирательной системы является **колебательный контур**, на использовании свойств которого и основан принцип действия резонансного усилителя.



а) последовательный
(резонанс
напряжений)

б)
параллельный
(резонанс
токов)

Условие резонанса в колебательном контуре



Согласно второму закону Кирхгофа для данного контура

$$\begin{aligned}\underline{U} &= \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = R\underline{I} + jX_L\underline{I} - jX_C\underline{I} = R\underline{I} + j\omega L\underline{I} - j\frac{1}{\omega C}\underline{I} = \\ &= (R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C})\underline{I} = \underline{Z}\underline{I}\end{aligned}$$

$$\underline{Z} = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = R + jX$$

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

При $X = 0$ наступает резонанс напряжений (последовательный резонанс)

$$X_{L_0} = X_{C_0} \quad \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$$

Активные фильтры на операционных

усилителях

Электрическим фильтром называется устройство, служащее для выделения (или подавления) электрических напряжений или токов заданной частоты. Фильтры могут быть **пассивными**, состоящими только из пассивных L , C , R элементов, и **активными**, если в их схеме имеются **усилительные элементы**.

В зависимости от диапазона частот и требуемых характеристик фильтры могут быть выполнены как: **пассивные** LC-фильтры и RC-фильтры, составленные из резисторов, индуктивных катушек и конденсаторов;

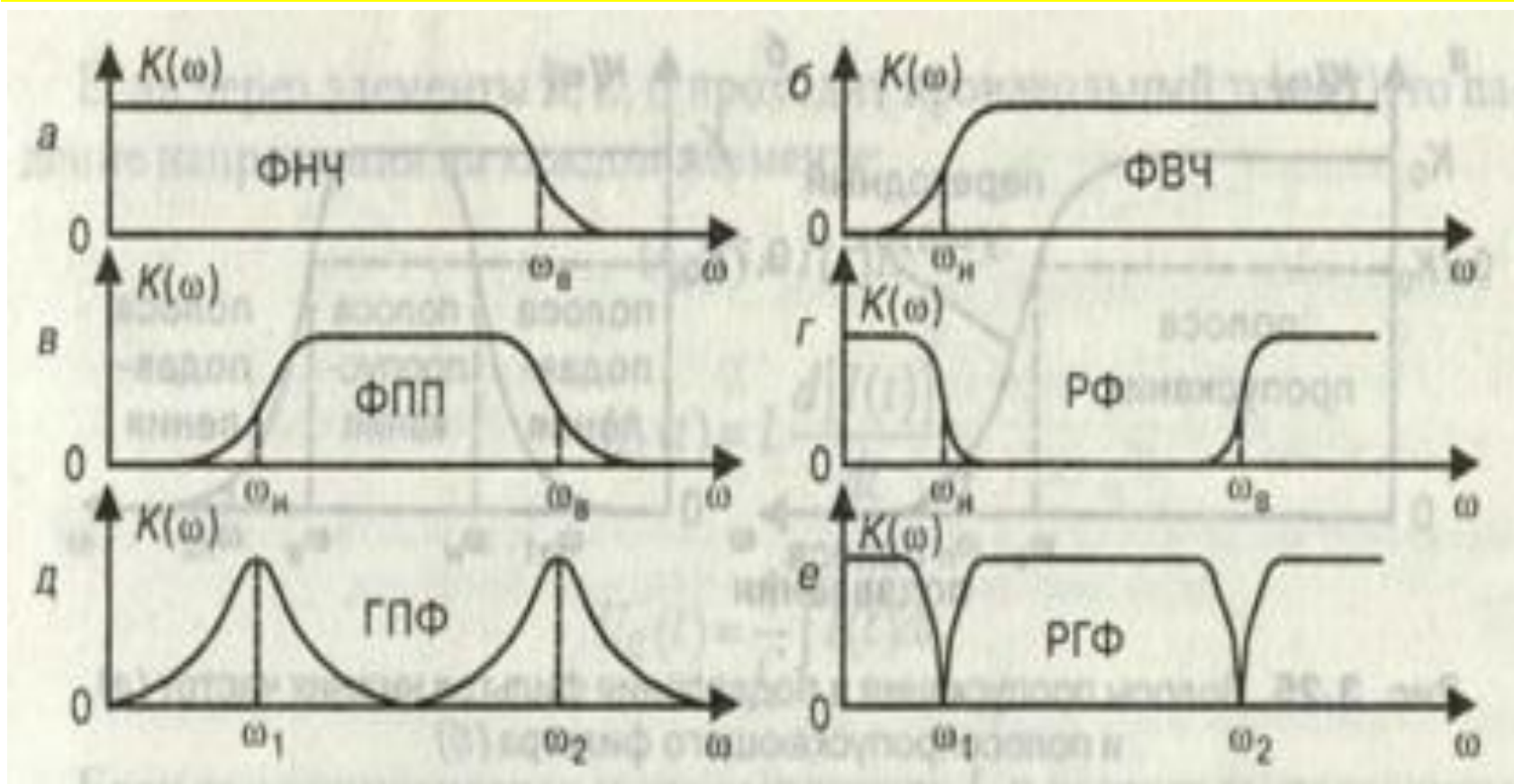
активные LC- и RC-фильтры, которые обычно применяются на ультразвуковых, звуковых и инфразвуковых частотах.

Основные характеристики фильтра – ширина полосы пропускания и избирательность

Классификация

фильтров

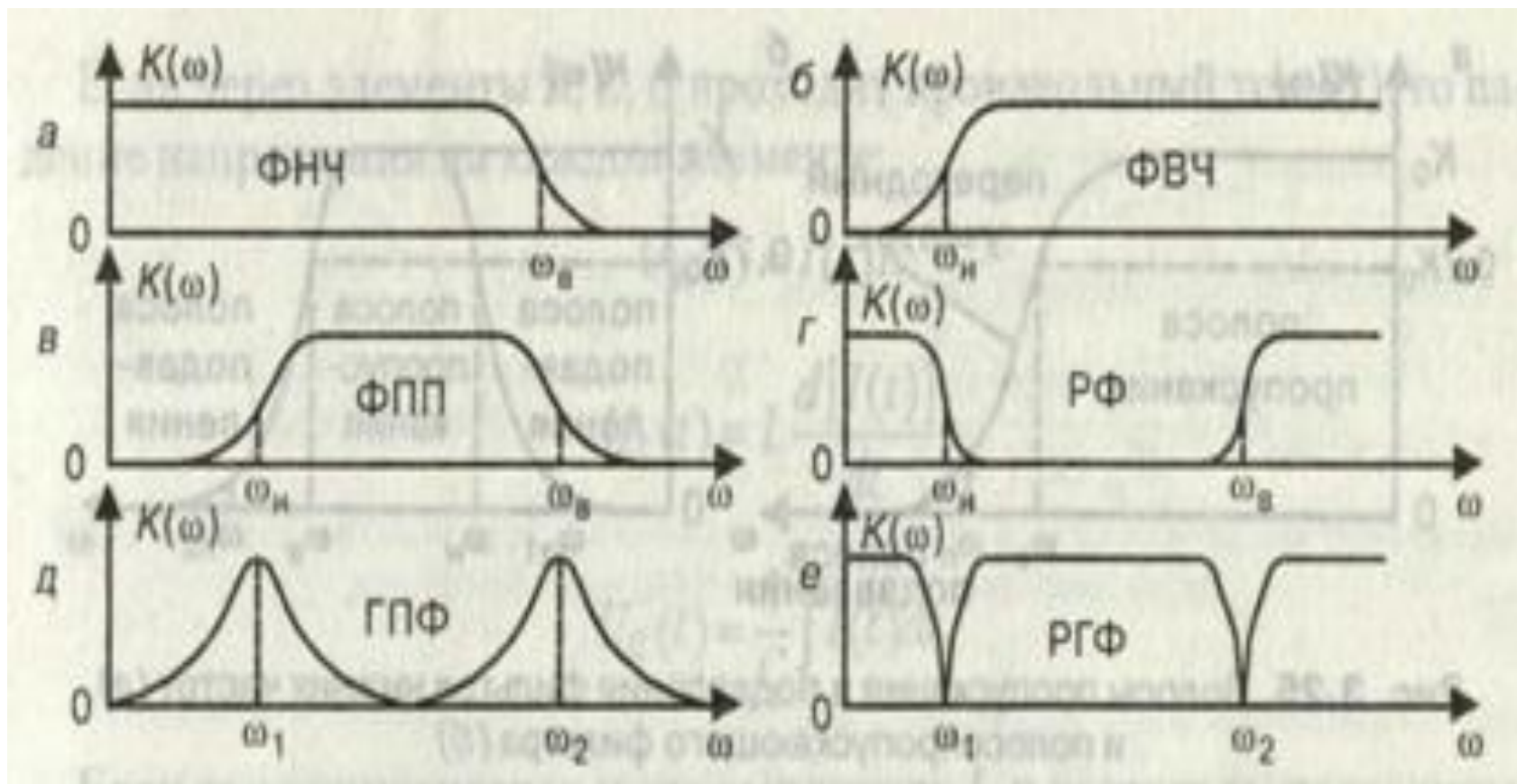
1. Фильтры нижних частот (ФНЧ), пропускающие колебания всех частот, начиная от постоянного тока и кончая некоторой верхней граничной частотой ω_B .



Классификация

фильтров

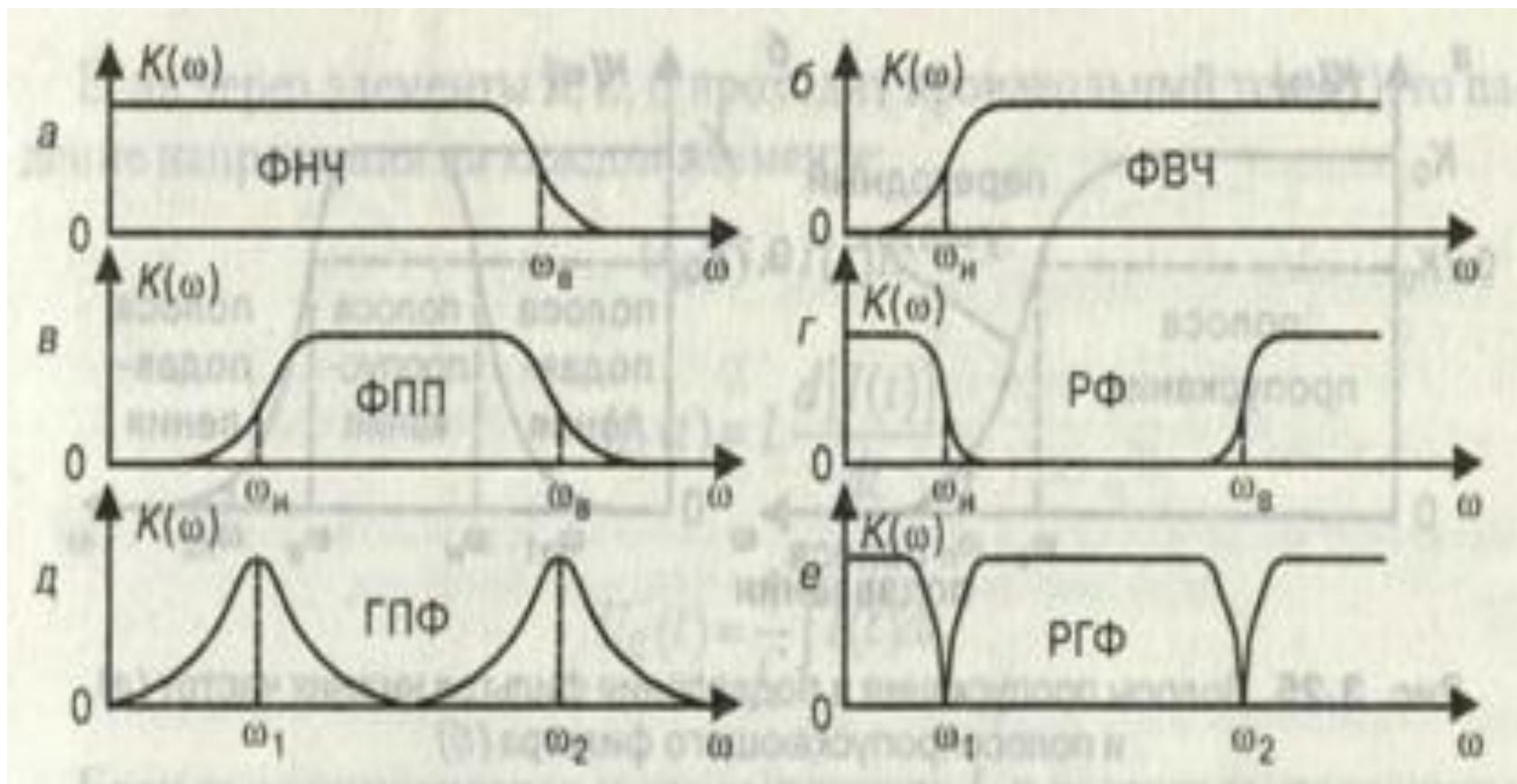
2. Фильтры верхних частот (ФВЧ), пропускающие колебания, начиная с некоторой нижней граничной частоты ω_n и кончая бесконечно высокой; (б)



Классификация

фильтров

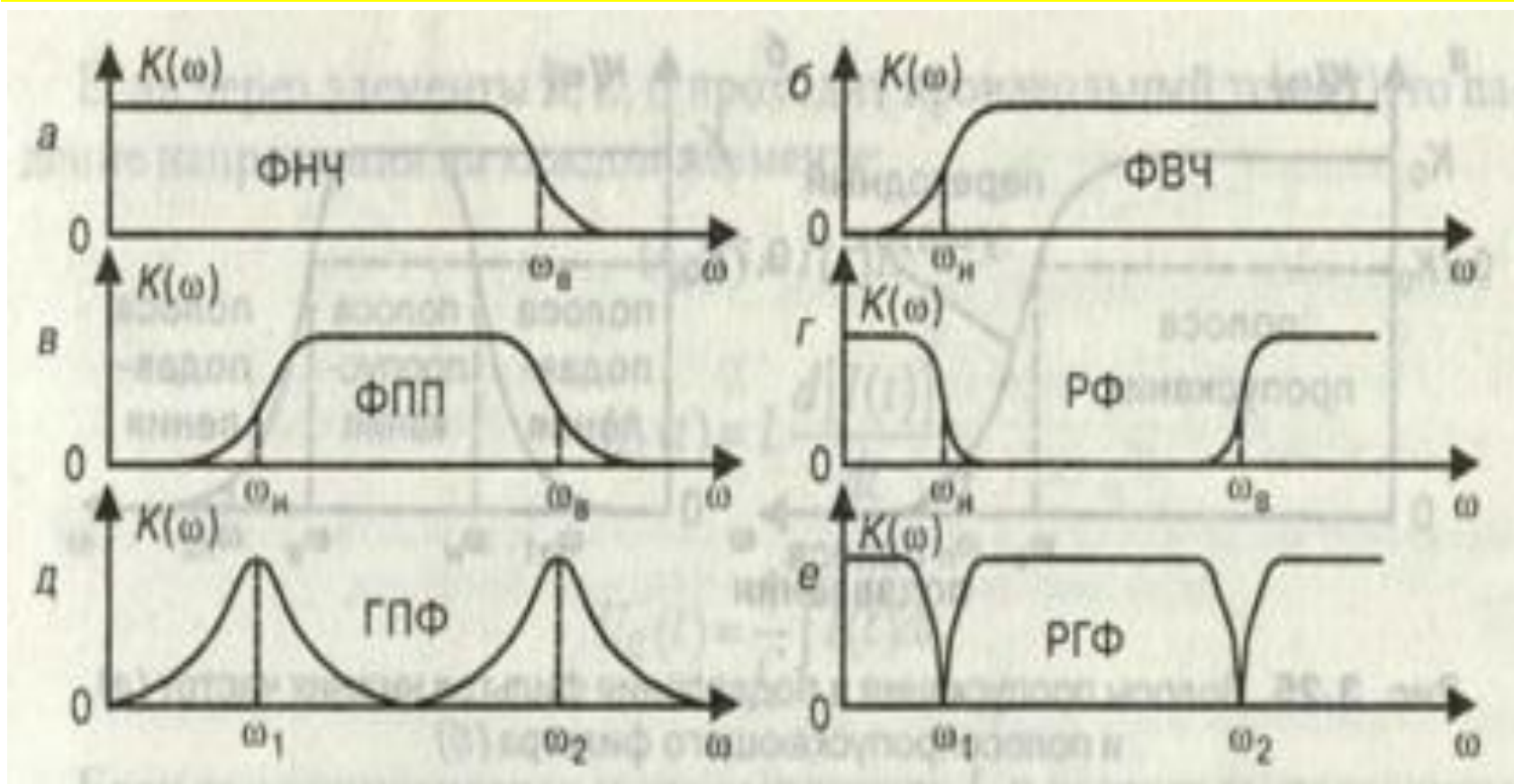
3. Полосовые фильтры (ПП), пропускающие колебания частот выше некоторой нижней частоты ω_H ; (в)



Классификация

фильтров

4. Режекторные (заграждающие) фильтры (РФ), не пропускающие колебаний некоторой частоты или полосы частот от ω_H до ω_B ; (г)

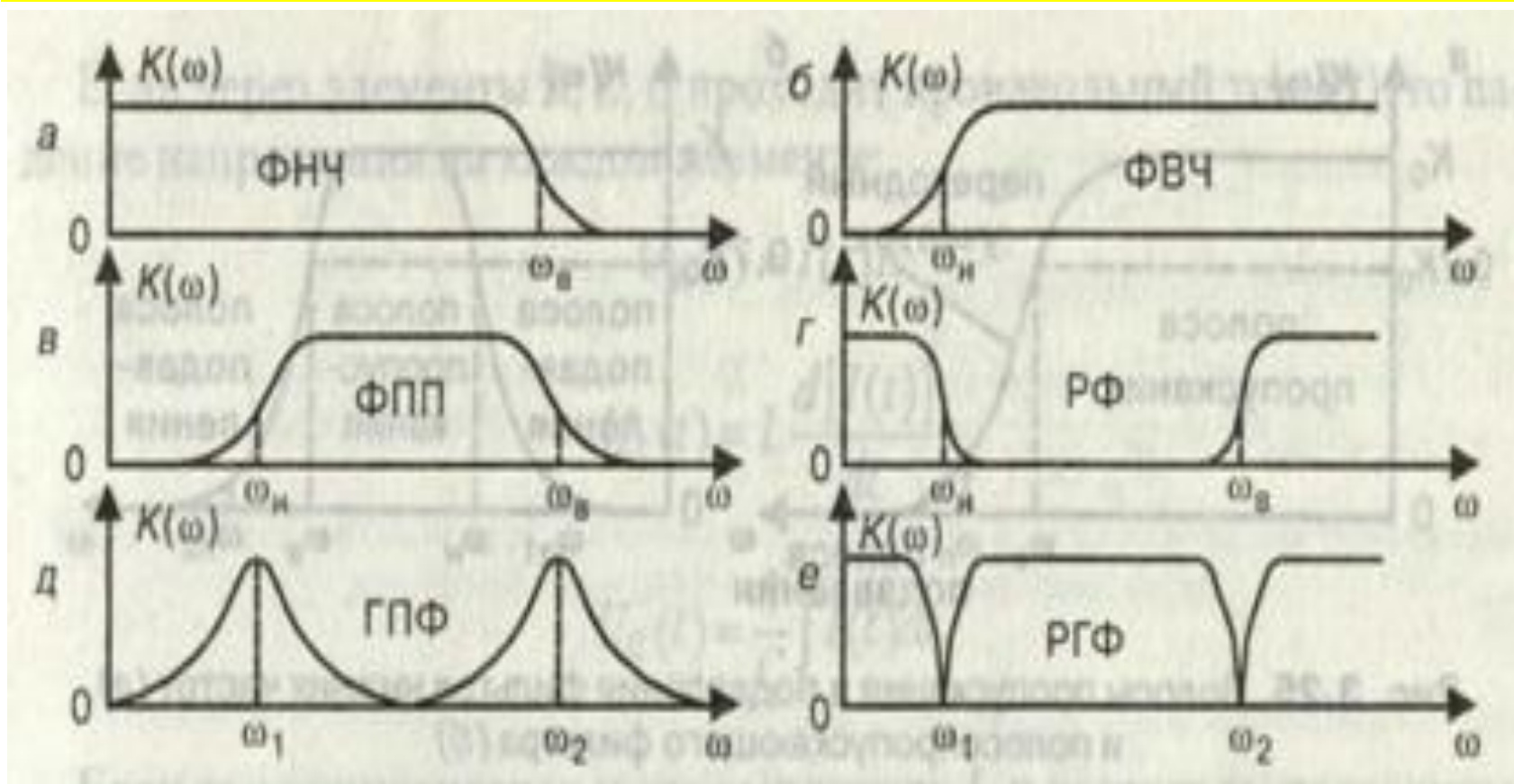


Классификация

фильтров

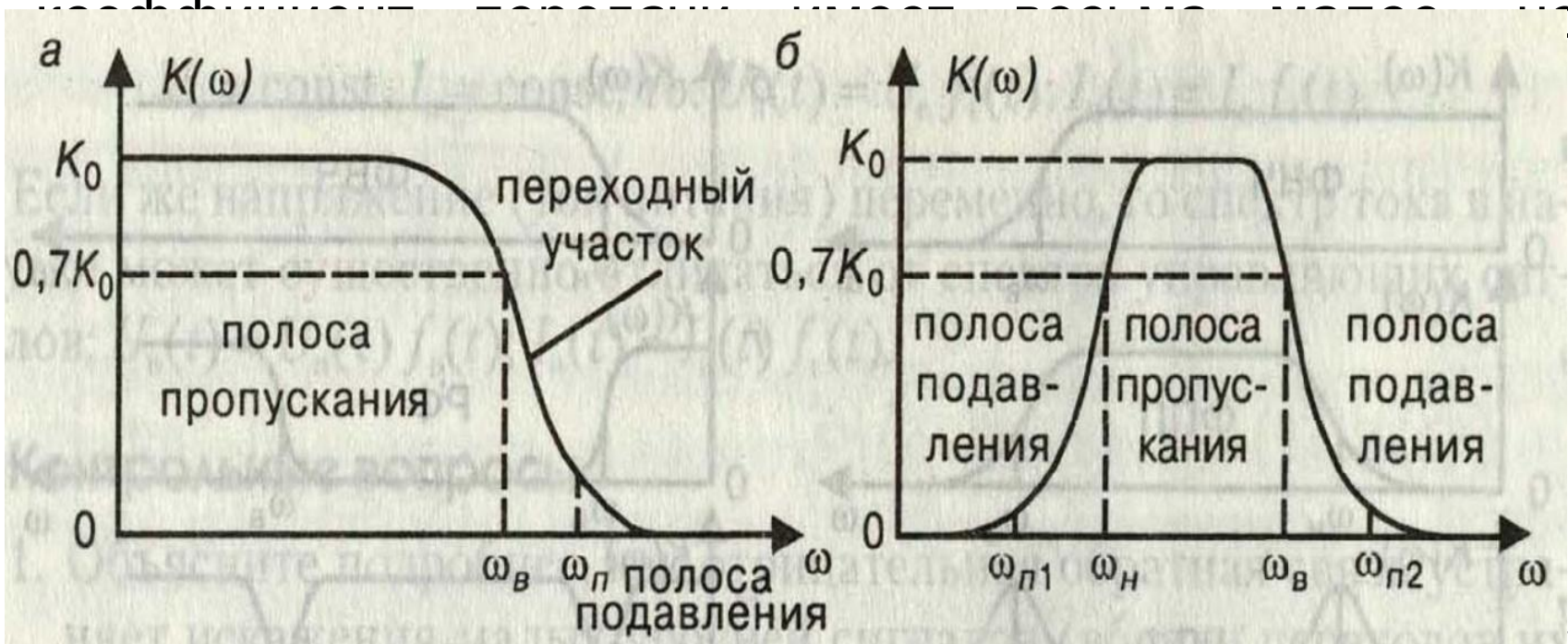
5. Гребенчатые фильтры (ГПФ), имеющие несколько полос пропускания (д);

6. Режекторные гребенчатые фильтры (РГФ) (е).



Под **полосой пропускания** в случае фильтра нижних частот понимается диапазон частот от нуля до некоторой граничной частоты ω_B , на которой коэффициент передачи фильтра по напряжению составляет 0,707 от коэффициента передачи K_0 на нулевой частоте (т.е. оказывается меньше K_0 на 3 дБ).

Полоса подавления, участок АЧХ, в которой

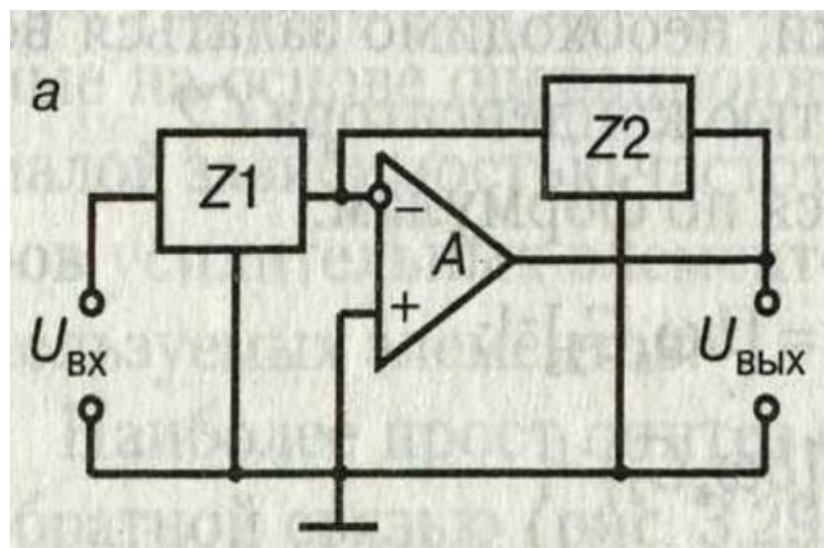


Активный фильтр с однопетлевой обратной

Под ^{связью} активным фильтром понимается устройство, состоящее из пассивных RLC-элементов и усилительных (активных) элементов, включенных таким образом, что образуется функциональный узел, охваченный частотно-зависимыми и частотно-независимыми положительными и отрицательными обратными связями.

Наибольшее применение нашли фильтры, выполняемые на основе **операционных усилителей**.

Эти фильтры отличаются малой зависимостью частотных характеристик от изменения параметров усилительных элементов и сравнительно небольшим числом используемых элементов.

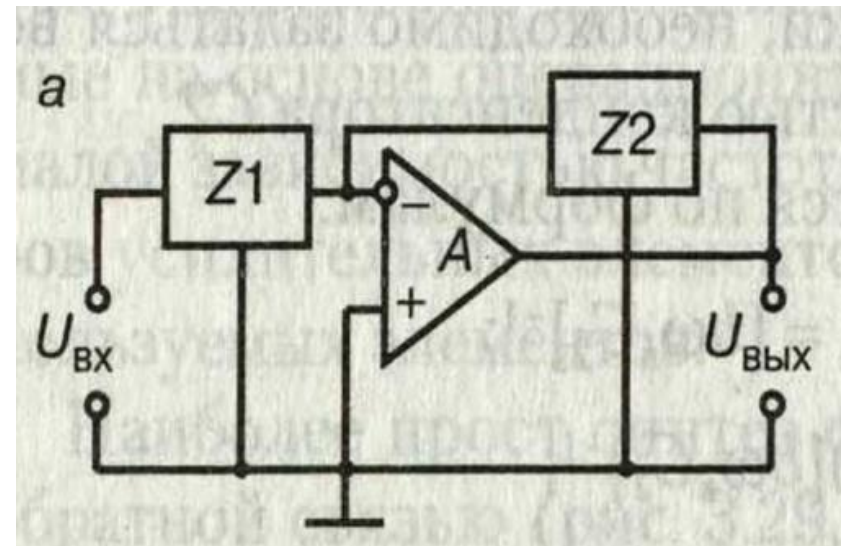


Комплексная передаточная функция

$$K(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ.}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ.}}(j\omega)} = - \frac{Z_2(j\omega)}{Z_1(j\omega)},$$

где $Z_1(j\omega)$, $Z_2(j\omega)$ - комплексные передаточные сопротивления пассивных RC-цепей на входе усилителя и в цепи обратной связи.

Располагая RC-цепями и операционными усилителями с достаточно большим коэффициентом усиления $K_0 \geq 10^4$, можно получить разнообразные активные фильтры.



Активный RC-фильтр нижних частот

На входе операционного усилителя Т-образный фильтр нижних частот с передаточным сопротивлением

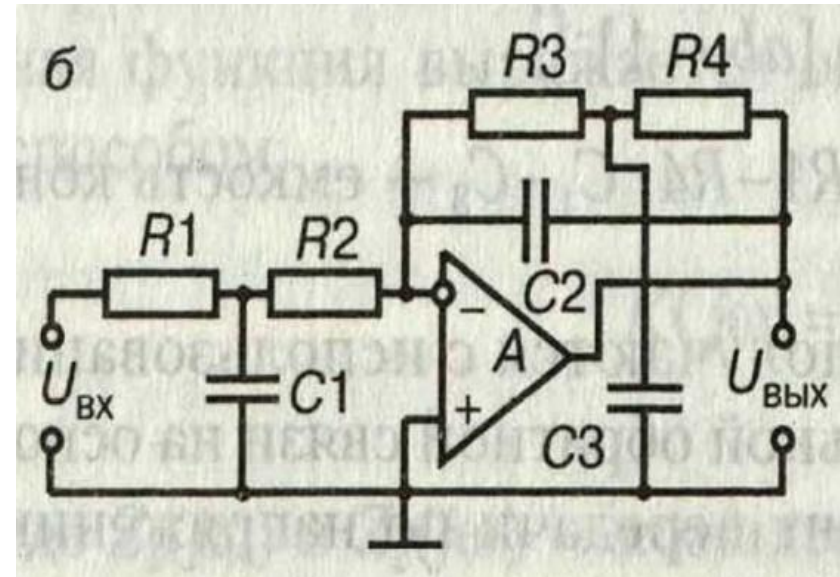
$$Z_1(p) = -\frac{p+a_1}{kp^2},$$

(где $p = j\omega$, a и k - постоянные)

В цепи отрицательной обратной связи Т-образный мост с передаточным сопротивлением

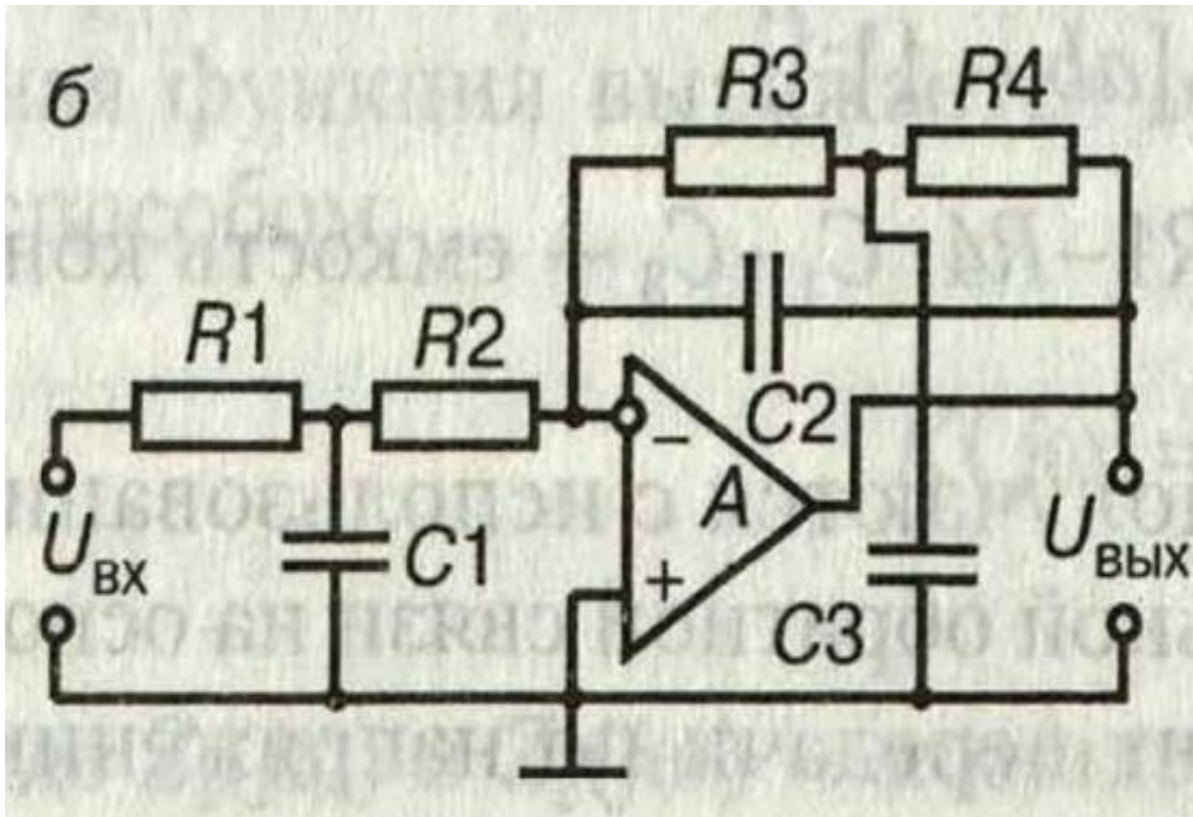
$$Z_2(p) = \frac{p+a_2}{p^2+a_2p+1},$$

где a_2 - постоянная, то получим активный RC-фильтр нижних частот.



Активный RC-фильтр нижних частот (передаточная функция)

$$K(p) = - \frac{Z_2(p)}{Z_1(p)} = \frac{kp^2(p+a_2)}{(p^2+a_2p+1)(p+a_1)}$$



Примеры простейших активных фильтров

