



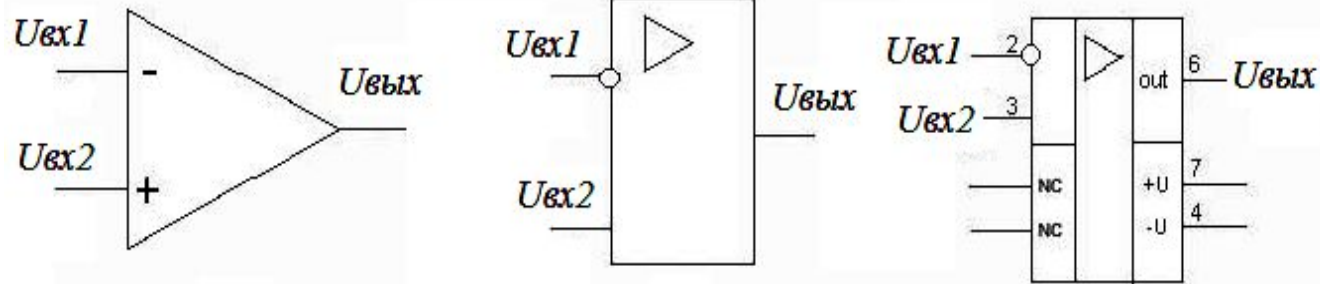
Схемотехника аналоговых электронных устройств

Практика 8. Операционные усилители и устройства на их основе

Введение

- ОУ и устройства на их основе имеют значительные преимущества по сравнению с транзисторами и устройствами на их основе, поэтому этой теме нужно уделить значительное внимание.
- В следующем семестре нам предстоит выполнить курсовой проект по «Схемотехнике», в процессе выполнения которого нужно спроектировать различные аналоговые устройства, выполнить расчет, проверить результаты расчета моделированием, а также оформить пояснительную записку к КП в соответствии с правилами оформления технической документации.
- Ввиду значительного упрощения расчета схем и характеристик устройства, в качестве активных элементов рекомендуется применение ОУ.
- Большая часть КП выполняется на тему активных фильтров, это тема последней контрольной работы, которую сегодня рассмотрим.

Операционные усилители



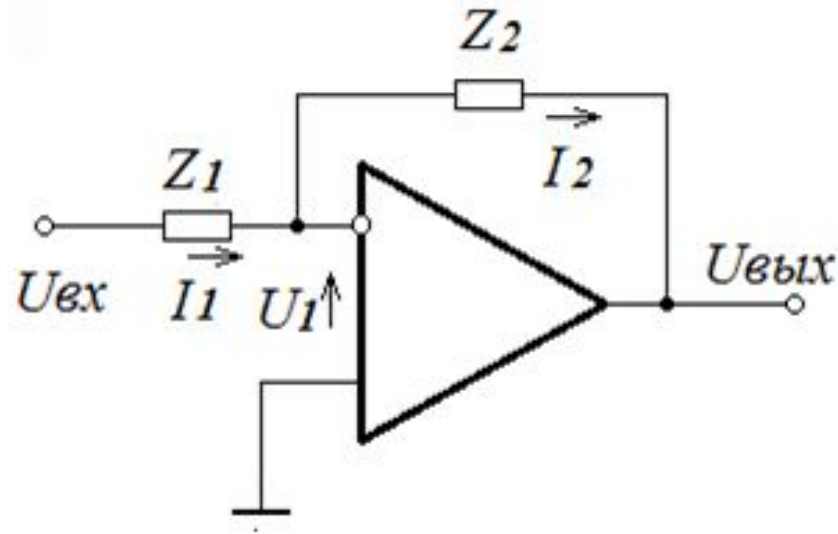
Характеристики близки к идеальному усилителю:

- полоса пропускания от 0 до ∞ ,
- коэффициент усиления $\rightarrow \infty$,
- $R_{вх} \rightarrow \infty$
- $R_{вых} \rightarrow 0$.

В схемах ОУ применяются типовые узлы на транзисторах и диодах, рассмотренные в лекциях: источники тока, токовые зеркала, дифференциальные каскады, схемы снижения потенциалов, буферные каскады, двухтактные каскады и пр.

Обратные связи в ОУ

- Цепь обратной связи образуется посредством включения двухполюсника обратной связи Z_2 между инвертирующим входом и выходом операционного усилителя.
- Коэффициент передачи ОУ, прямо пропорционален сопротивлению двухполюсника Z_2 , включенного между выходом и инвертирующим входом операционного усилителя и обратно пропорционален сопротивлению двухполюсника Z_1 , включенного между входом и источником сигнала.



- При $R_{вх} \rightarrow \infty$, $I_1 = I_2$.

$$I_1 = \frac{U_{ВХ} - U_1}{Z_1} \quad I_2 = \frac{U_1 - U_{ВЫХ}}{Z_2}$$

При условии $K_u \rightarrow \infty$,

$$K_{o.c} = U_{вых}/U_{вх} = - Z_2/Z_1$$

АКТИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Устройства на основе частотно-зависимых ОС

Типы: фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ), полосовые фильтры (ПФ), заграждающие (режекторные) фильтры (РФ), избирательные (селективные) фильтры (СФ).

Передаточная функция ФНЧ:

$$W_{\text{ФНЧ}}(P) = K_0 / (1 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n)$$

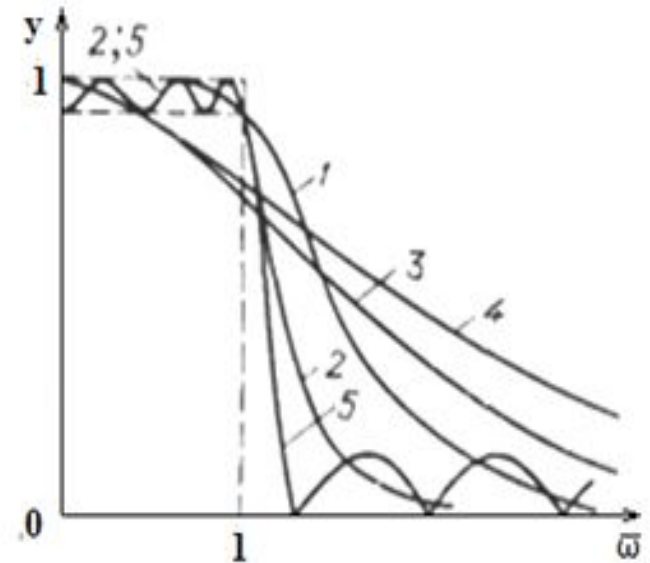
Полиномы 1. Батерворта,

2. Чебышева, 3. Бесселя,

4. RC фильтр,

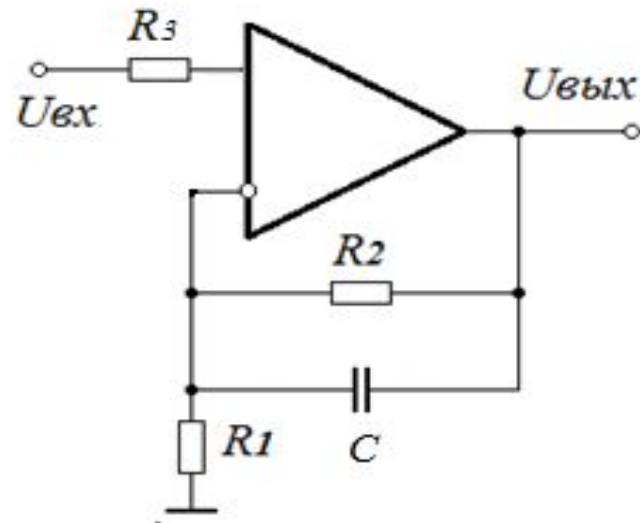
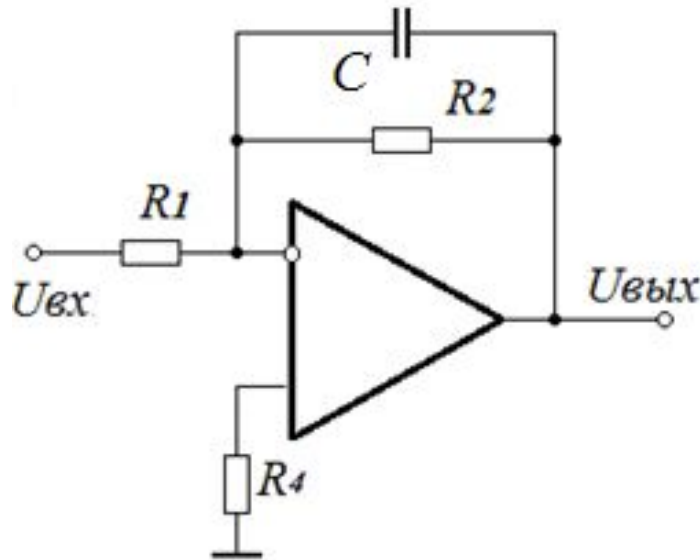
5. Эллиптический фильтр (имеет нули ПФ)

- Прототипы всех фильтров — ФНЧ.



Фильтры отличаются в крутизне спада АЧХ за полосой пропускания при одинаковом порядке и одинаковой схеме фильтра.

Активные фильтры нижних частот

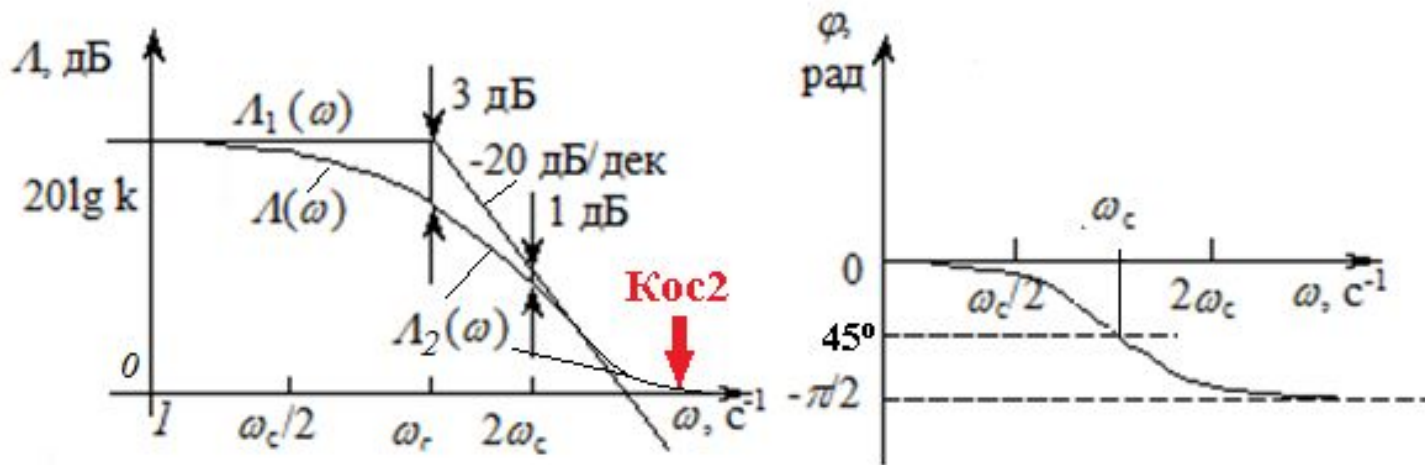


ОС включается между выходом и инвертирующем входом!

- Коэффициент усиления с учетом обратной связи и изменения полярности: $K_{OC1} = -R_2/R_1$, $K_{OC2} = 1 + R_2/R_1$
- Постоянная времени цепи ОС $\tau = R_2 C$,

$$K(j\omega) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R_2 C} \quad |K(j\omega)| = K_{OC} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

ЛАЧХ фильтров нижних частот

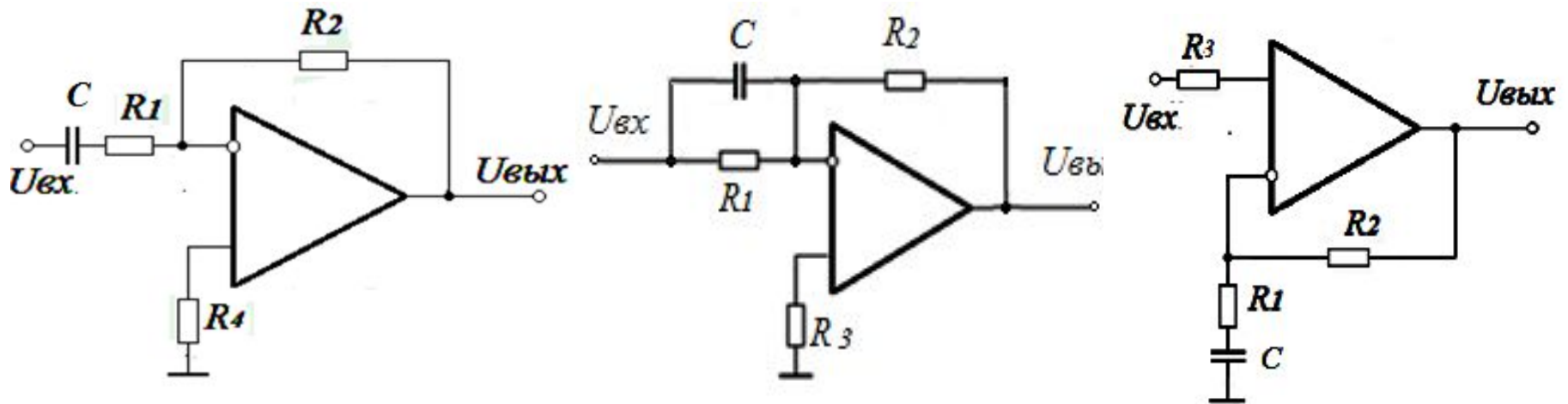


В ЛАЧХ по горизонтальной оси откладываются частоты в логарифмическом масштабе, по вертикальной оси – коэффициент передачи в децибелах (дБ), $\Lambda = 20\lg|K(\omega)|$.
 Максимальная разница между АЧХ и ЛАЧХ составит 3 дБ на частоте сопряжения, совпадающей с верхней частотой $\omega_{\text{в}} = 2\pi f_{\text{в}}$.

$$\Lambda_1(\omega) = \frac{20\lg|K|}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \omega T$$

Активные фильтры верхних частот

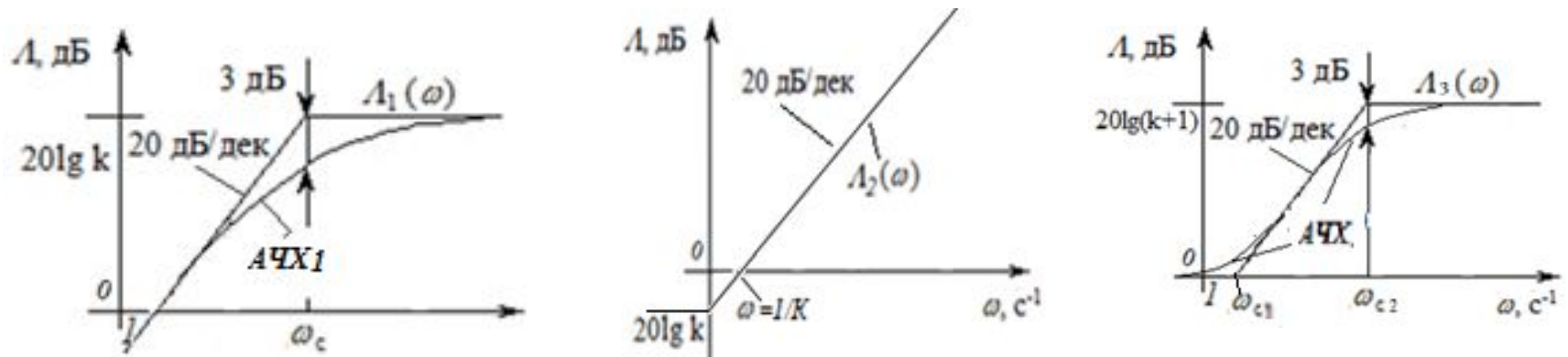


- $K_{OC1,2} = -R_2/R_1$, $K_{OC3} = 1 + R_2/R_1$ коэффициент усиления с учетом обратной связи и изменения полярности, $\tau = R_1 C$ – постоянная времени цепи ОС.

$$|K(j\omega)| = K_{OC} \cdot \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}}$$

ФВЧ 1 можно рассматривать как последовательное соединение дифференцирующего устройства, см. лекции, с $K_{диф} = \omega\tau$ и ФНЧ, с частотой сопряжения $\omega_c = 1/\tau$. Действие ФНЧ компенсирует подъем ЛАЧХ с частоты сопряжения и получается горизонтальная линия.

ЛАЧХ разных фильтров верхних частот



ФВЧ 1 - последовательное соединение дифференцирующего устройства с $K_{диф} = \omega T$ и ФНЧ, с частотой сопряжения $\omega_c = 1/T$, компенсирует подъем ЛАЧХ с частоты ω_c

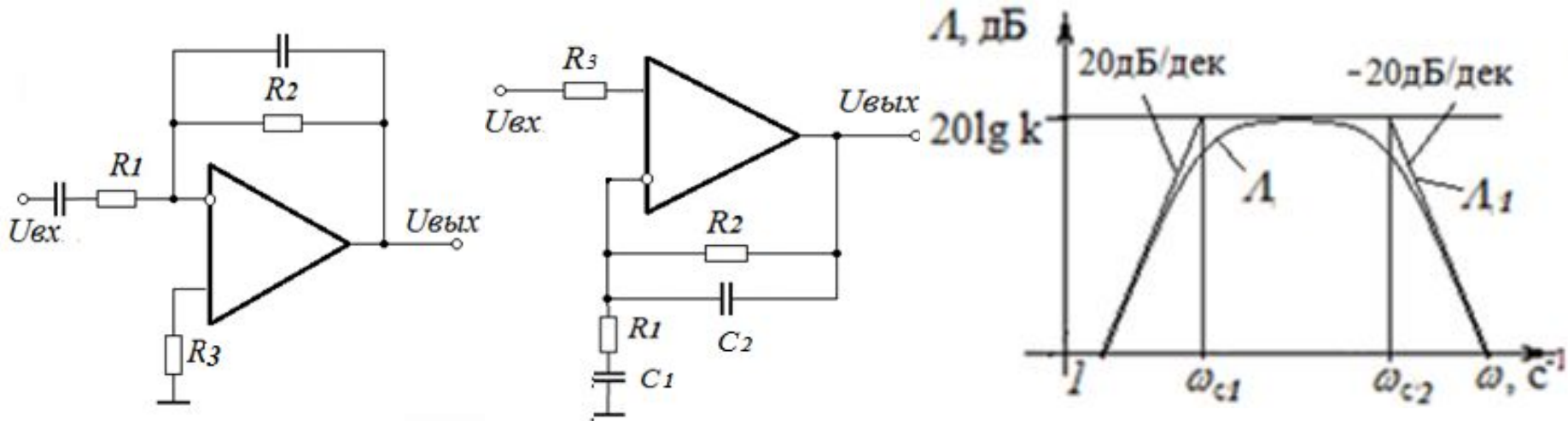
ФВЧ 2 - дифференцирующее устройство, **ограничение $K = R_2/R_1$**

ФВЧ 3 – неинвертирующий, отличается от ФВЧ 1

коэффициентом передачи на НЧ, равным 1 и **наличием двух частот сопряжения**, $\omega_{c1} = 1/kT$ и $\omega_{c2} = 1/T$.

$$\Lambda_1(\omega) = \frac{20\lg|K| \cdot \omega T}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \quad \Lambda_2(\omega) = 20\lg|K| \cdot (1 + \omega T) \quad \Lambda_3(\omega) = 1 + \frac{20\lg|K| \cdot \omega T}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}$$

Полосовые фильтры



Объединение цепей ОС фильтров низких и высоких частот

Постоянные времени для верхних и нижних частот

существенно отличаются, **расчет АЧХ независимый**,

$$R_1 C_1 = \tau_n = 1/2\pi f_n, \quad R_2 C_2 = \tau_v = 1/2\pi f_v.$$

Коэффициенты усиления $K_{OC1} = -R_2/R_1$, для
неинвертирующего – $K_{OC2} = 1 + R_2/R_1$.

Режекторные фильтры

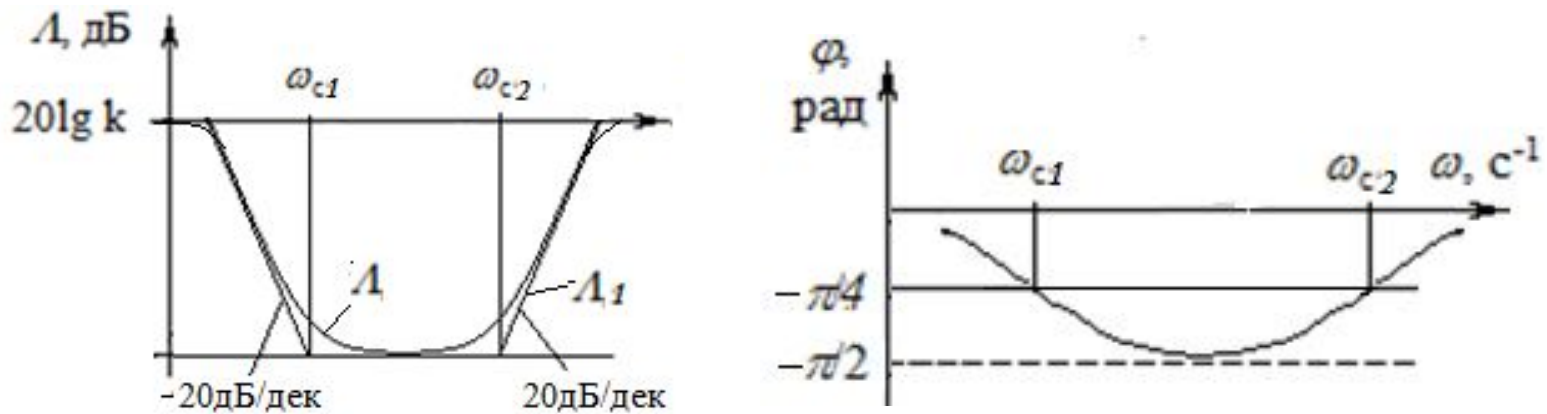
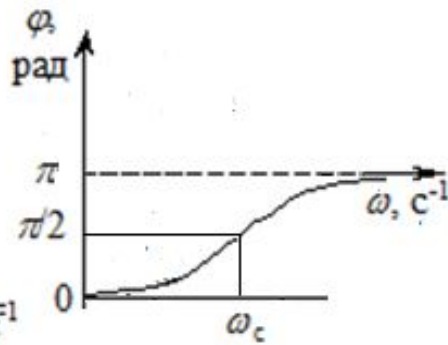
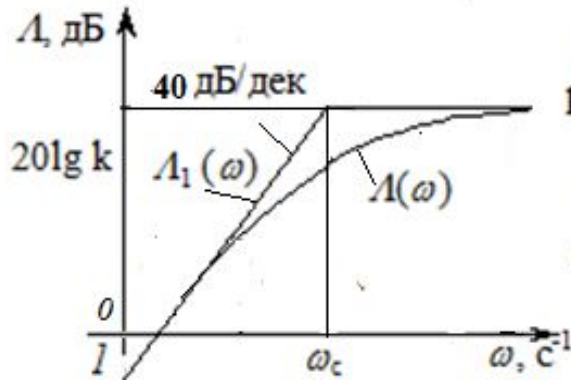
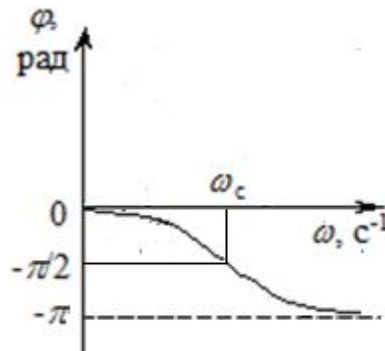
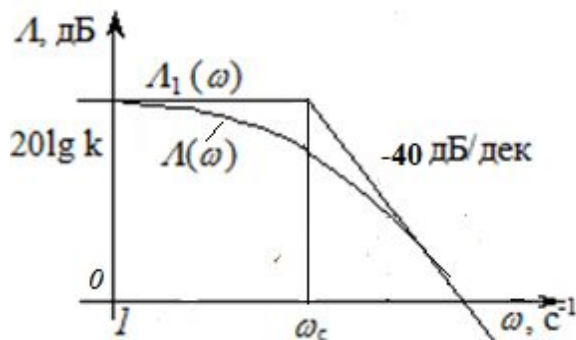
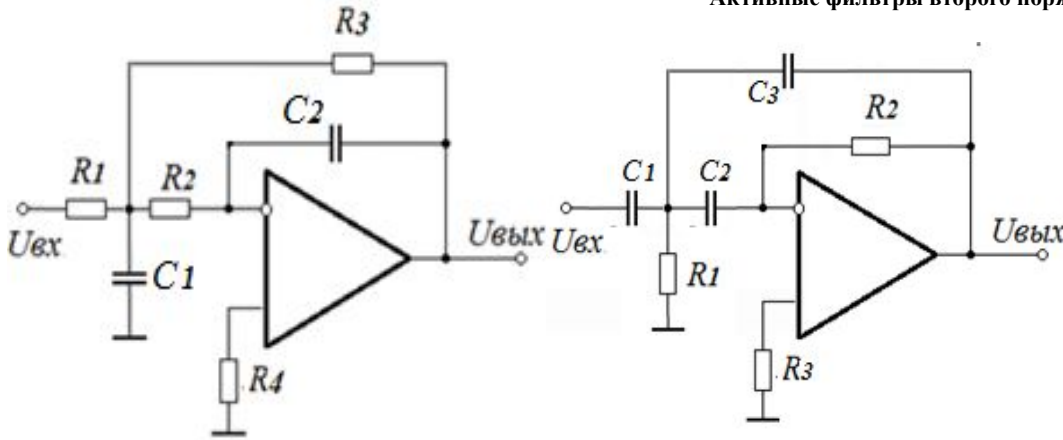


Схема как у полосовых фильтров, отличие частотной характеристики режекторного фильтра в том, что действие ФНЧ проявляется на нижних частотах, а ФВЧ – на верхних частотах, что обеспечивается соответствующим выбором постоянных времени фильтров.

Активные фильтры второго порядка



- Для улучшения избирательности **повышается порядок передаточных функций.**

При условии $R_1 = R_2$ частота сопряжения для ФНЧ

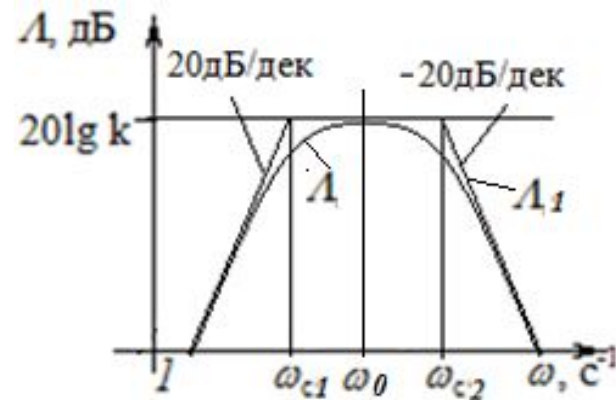
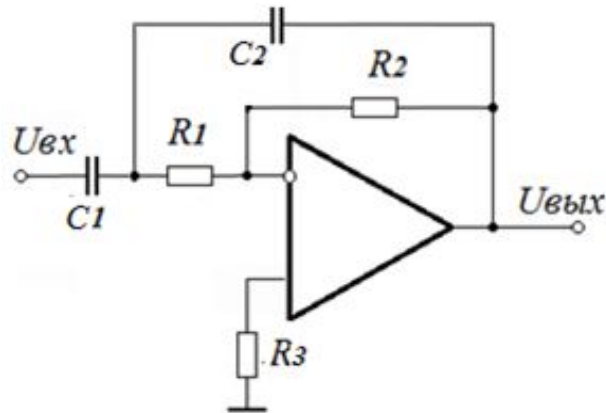
$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}}$$

При условии $C_1 = C_2$ для ФВЧ частота сопряжения:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_2 C_3}}$$

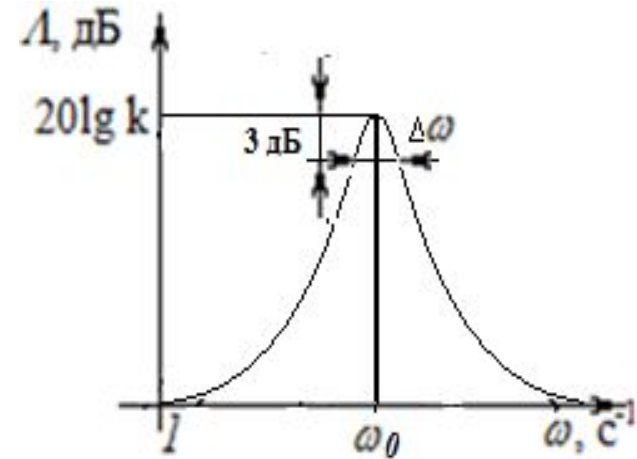
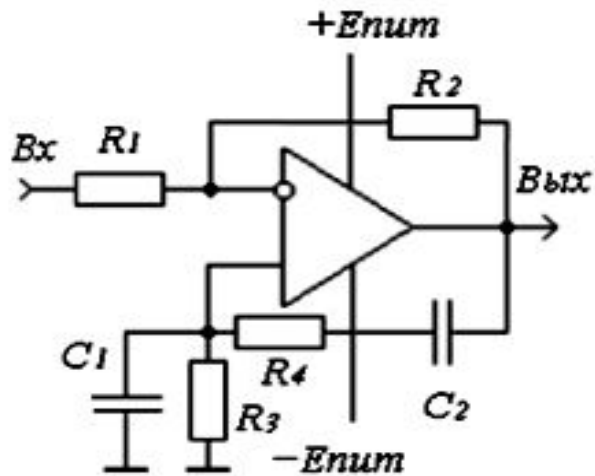
Выражения означают равенство на частоте сопряжения постоянных времени $\tau_1 = \tau_2$ в цепи ОС.

Селективные фильтры



- Выделяют сигналы в узкой полосе рабочих частот. В полосовых фильтрах элементы ФВЧ и ФНЧ действовали независимо на своих частотах. При сближении f_n и f_v элементы фильтров начинают влиять друг на друга, что необходимо учитывать при расчетах: коэффициент передачи определяется отношением постоянных времени
- Основные расчетные соотношения: коэффициент усиления, полоса пропускания, центральная частота

$$K_0 = -\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1} \quad \frac{\Delta \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_{c2} - \omega_{c1}}{\omega_0} = \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$



Мост Вина, использование одновременно положительной и отрицательной обратных связей, **на частоте резонанса происходит компенсации действия отрицательной ОС действием положительной ОС**. Отрицательная частотно-независимая ОС - делитель $R_1 - R_2$, положительная ОС - частотно-зависимая, по схеме является полосовым фильтром. При полной компенсации действия ООС - отсутствие ОС на частоте резонанса: $Ko > 10^5 - 10^6$ (коэффициент усиления ОУ на частоте резонанса), добротность $Q \rightarrow \infty$.

Из требований стабильности $Ko \leq 60 - 80$ дБ, $Q \leq 100 - 200$.

- Максимальная глубина ПОС и резонанс возникает при равенстве постоянных времени $R_3 C_1 = R_4 C_2$.
- При $R_3 = R_4 = R$ и $C_1 = C_2 = C$ частота резонанса $f_o = 1/2\pi RC$,

Коэффициент передачи частотно-независимой отрицательной ОС

$$\beta_{оос} = R_1 / (R_1 + R_2),$$

коэффициент передачи положительной ОС на частоте резонанса,

$$\beta_{пос} = 1/3.$$

На частоте резонанса, $\beta_{пос} = \beta_{оос}$ откуда получаем выражение для расчета резисторов ООС, соответствующих границе устойчивости : $(R_1 + R_2) / R_1 \leq 3$.

Для получения высокой добротности необходимо выполнить соотношения между активными и реактивными составляющими на частоте резонанса, **ограничивающие величину резисторов ПОС:**

$$R \geq Q/\omega_0 C, \text{ при } R \gg \omega_0 C \gg R = R_3 = R_4.$$

Мост Вина, расчетные соотношения

На добротность также влияет сопротивление цепи ООС, поэтому необходимо выбирать величину резистора, чтобы выполнить условие:

$$R_{вх\ оу} > R_2.$$

Величина резистора R_2 определяется необходимой добротностью:

$$R_2 = 2R_1 - R_1/Q$$

При $R_2 > 2R_1$ не выполняется условие устойчивости, и **схема превращается в автогенератор на мосте Вина.**

Максимальный коэффициент усиления (при резонансе) при указанных ограничениях $K_{рез} \approx 3Q$.

На частотах $\omega \rightarrow \infty$ и $\omega \rightarrow 0$, глубина ПОС $\rightarrow 0$ из-за наличия конденсаторов в параллельной и последовательных цепях, поэтому коэффициент усиления определяется глубиной ООС.

$$K_0 = K_\infty = -R_2/R_1.$$

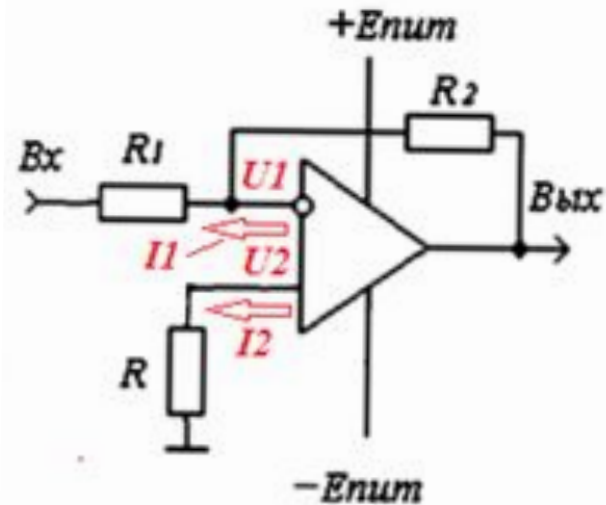
Температурная стабилизация параметров ОУ.

Зависимость напряжения смещения $U_{см}$ от температуры описывается температурной чувствительностью ОУ $dU_{см}/dT$. Смещение вызвано разностью напряжений эмиттерных переходов из-за несимметрии транзисторов. Изменение тока смещения описывает выражение:

$$\Delta I_{э} = I_{э01} - I_{э02} = I_{э01} / H_{211} - I_{э02} / H_{212}$$

Величина смещения определяется отношением токов эмиттеров входных транзисторов в диапазоне температур:

$$U_{см} = \phi_T \ln(I_{э01} / I_{э02})$$

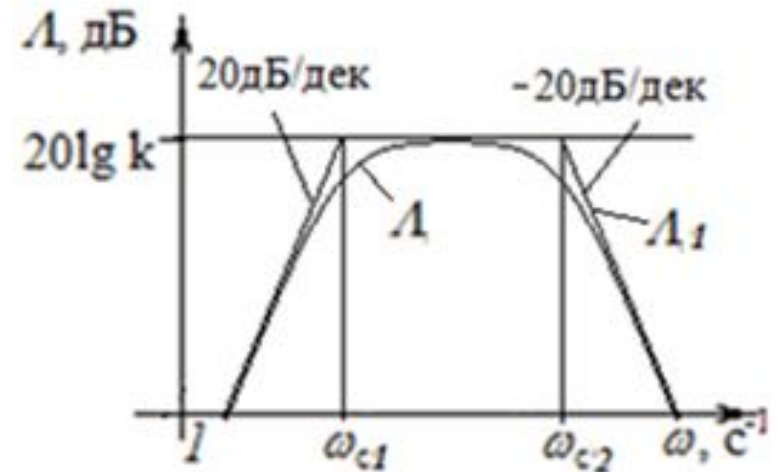
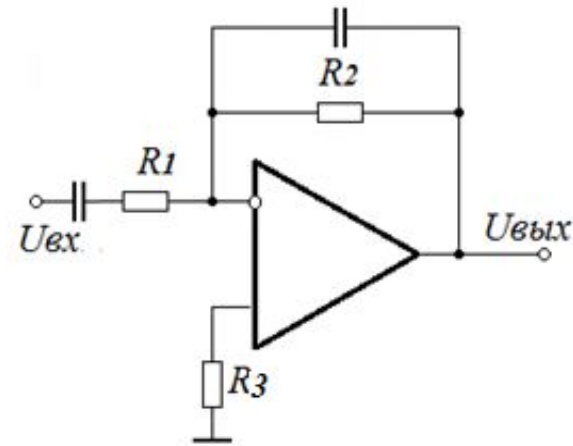


Для выполнения условия $U1 = U2 = I1 * R1 || R2 = I2 * R$, необходимо выполнить **условие компенсации** $R = R1 || R2$.

Пример расчета. Полосовой фильтр

- Задание. Рассчитать ПФ со следующими характеристиками:
- Верхняя частота 1 МГц;
- Нижняя частота 10кГц;
- Коэффициент усиления $K_0=20$ дБ.
- Характеристики ОУ считать идеальными.
- 1. Принимаем величину резистора $R_2 \ll R_{вхОУ}$, $R_2=10$ кОм.
- 2. Определяем величину резистора R_1 , обеспечивающего нужный коэффициент усиления $K_0=10$ раз
- $R_1=R_2/K_0=1$ кОм
- Из условия термостабилизации определяем величину $R_3=R_2$, так как R_1 включен последовательно с емкостью и постоянный ток через него отсутствует

• Схема ПФ



Продолжение расчета ПФ

- 1. Постоянную времени цепи ОС, ограничивающую АЧХ на верхних частотах, определим из выражения

$$|K(j\omega)| = K_{oc} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

- Откуда из условия $Y_B = K(j\omega)/K_0 = 1/\sqrt{2}$ определяем $\tau_B = 1/2\pi f_B = 1/6,28 * 1 \text{ МГц} = 0,16 \text{ мкс}$
- Из выражения $\tau_B = R_2 * C_2$, находим $C_2 = 0,16 \text{ мкс} / 10 \text{ кОм} = 0,16 * 10^{-8} \text{ Ф} = 1,6 \text{ нФ}$

- 2. Постоянную времени цепи ОС, определяющую нижнюю частоту, определим из выражения

- Из условия $Y_H = 1/\sqrt{2}$ находим

- $\tau_H = 1/2\pi f_H = 1/6,28 * 10 \text{ кГц} = 0,16 * 10^{-4} = 1,6 \text{ мс}$

- Из выражения $\tau_H = R_1 * C_1$, находим

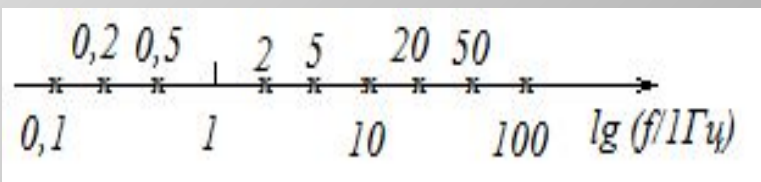
$$C_1 = 0,16 \text{ мс} / 1 \text{ кОм} = 0,16 * 10^{-6} \text{ Ф} = 0,16 \text{ мкФ}$$

$$Y_H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_H^2}}}$$

Построение АЧХ каскада в логарифмическом масштабе

В логарифмической шкале длина отрезка частоты от начальной, 1 Гц, пропорциональна логарифму отношения величин, $f/1\text{Гц}$.

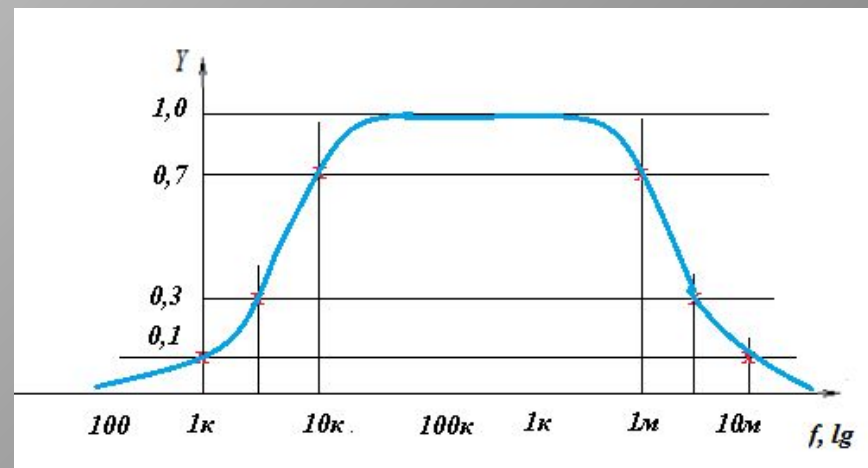
$\lg 0,1 = -1$; $\lg 1 = 0$; $\lg 10 = 1$;
 $\lg 100 = 2$, $\lg 2 \approx 0,3$, $\lg 3 = 0,5$ и
 $\lg 5 \approx 0,7$



Логарифмическая шкала должна с запасом перекрывать весь диапазон рабочих частот, 10 кГц-1 МГц

График удобно строить, определяя значения Y на частотах $f = 10f_v = 10\text{МГц}$, $f = 3f_v = 3\text{МГц}$, $f = f_v = 1\text{МГц}$, $f = f_n$, $f = 0,3f_n = 3\text{кГц}$, $f = 0,1f_n = 1\text{кГц}$

Соответственно, значение ЛАЧХ на этих частотах $Y = 0,7$; $Y = 0,316$; $Y = 0,1$



Пример расчета. Резонансный фильтр

Задание. Рассчитать фильтр на частоту резонанса $f_0=5\text{кГц}$, с добротностью $Q=50$. Использовать ОУ с $R_{вх}>1\text{МОм}$, $K_0=10^5$, $f_1=100\text{МГц}$

Решение: **Цепь ПОС**

1. $R_3=R_4=R=R_{вх}/100=1\text{МОм}/100=10\text{кОм}$

2. $C_1=C_2=C=\tau/R$, $\tau=RC=1/2\pi f_0$

$C=1/2\pi f_0 R=1/6,28*5*10^3*10^4=0,3*10^6=300\text{нФ}$

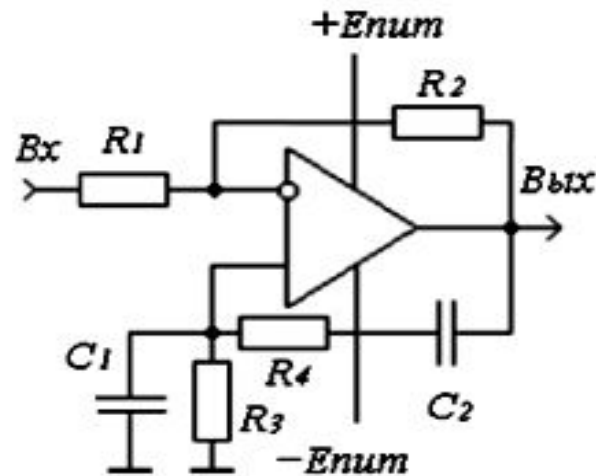
Цепь ООС

1. $R_1=R_{вх}/10=1\text{МОм}/10=100\text{кОм}$

2. $R_2=2R_1-R_1/Q=200-100/50=196\text{кОм}$

Итог: $Q=100/(200-196)=50$. $\Delta f=f_0/Q=5/50=100\text{Гц}$

$K_0=3Q=3*50=150$ $K(0)=K(\infty)=R_2/R_1=200/196\approx 2$



$$Q = \frac{R_1}{2R_1 - R_2}$$

