ТУСУР | TUSUR UNIVERSITY | РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И СИСТЕМ СВЯЗИ

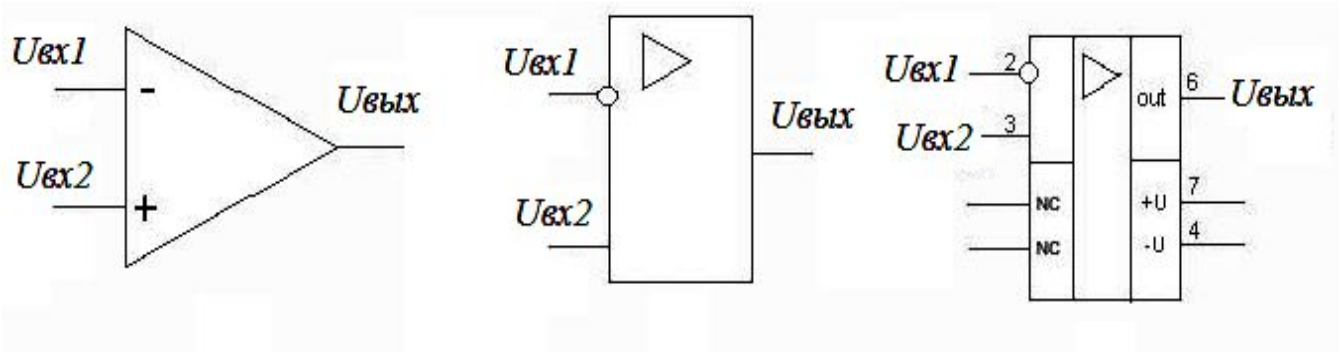
Схемотехника аналоговых электронных устройств

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 устройства6 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



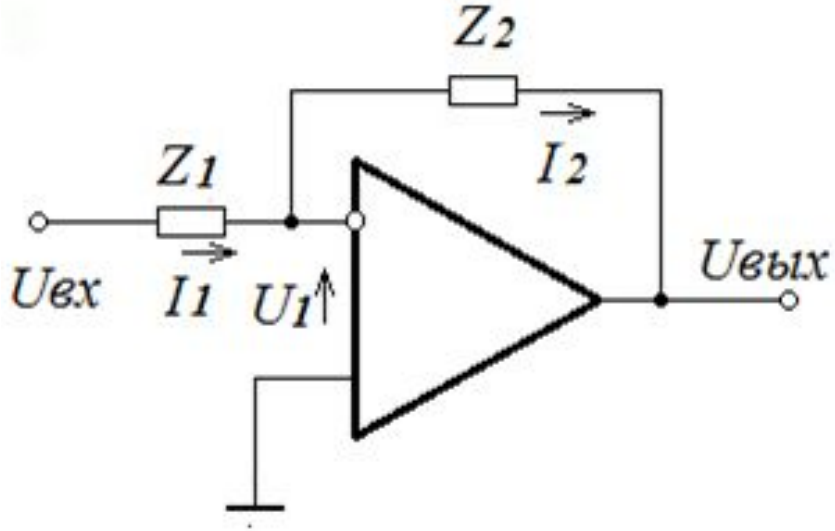
Характеристики близки к идеальному усилителю:

- полоса пропускания от 0 до ∞,
- коэффициент усиления →∞,
- Rвх→∞
- Rвых→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 Z2 **между инвертирующим входом и выходом операционного усилителя**.
- Коэффициент передачи ОУ, прямо пропорционален сопротивлению двухполюсника Z2, включенного между выходом и инвертирующим входом операционного усилителя и обратно пропорционален сопротивлению двухполюсника Z1, включенного между входом и источником сигнала.



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

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

При условии $K_u \to \infty$,

$$K_{о.с} = U_{вых}/U_{вх} = -Z_2/Z_1$$

Активные фильтры

Устройства на основе частотно-зависимых ОС

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

Передаточная функция ФНЧ:

$$W_{ФНЧ}(P)=K_0/(1+a_1p+a_2p^2+\ldots+a_np^n)$$

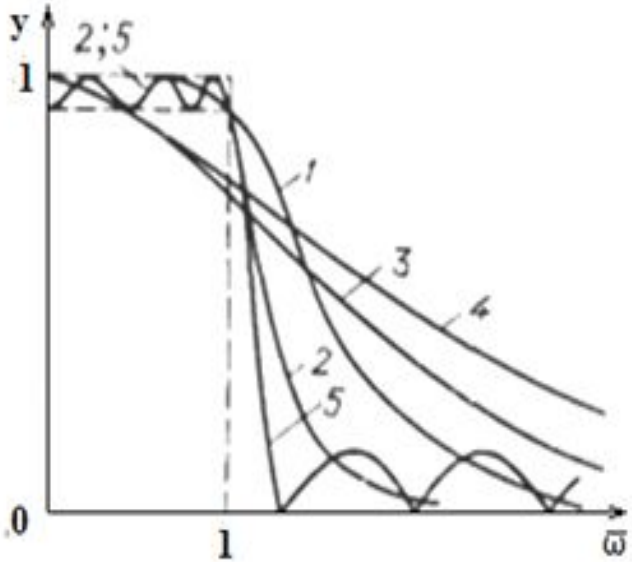
Полиномы 1. Батерворта,

2. Чебышева, 3. Бесселя,

4. RC фильтр,

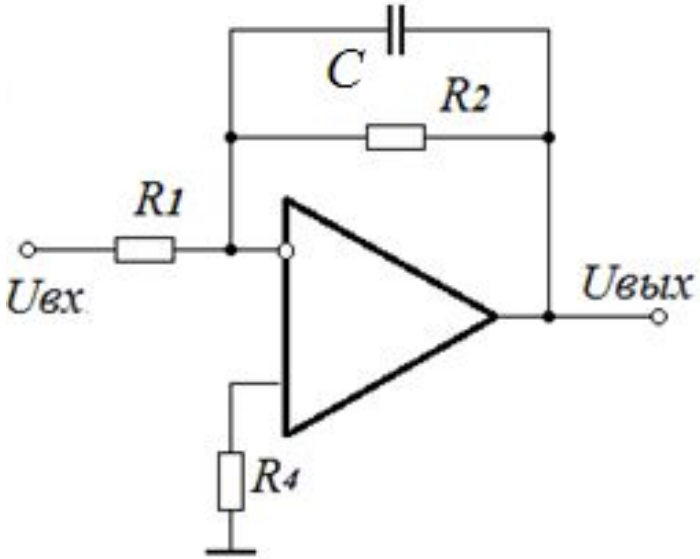
5. Эллиптический фильтр (имеет нули ПФ)

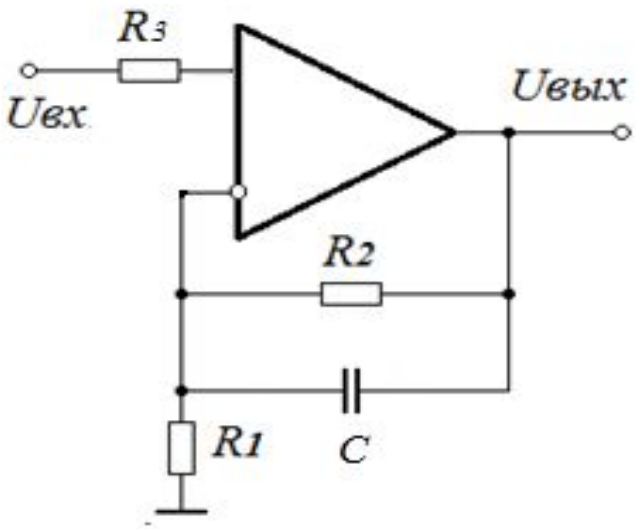
- Прототипы всех фильтров — ФНЧ.



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

Активные фильтры нижних частот



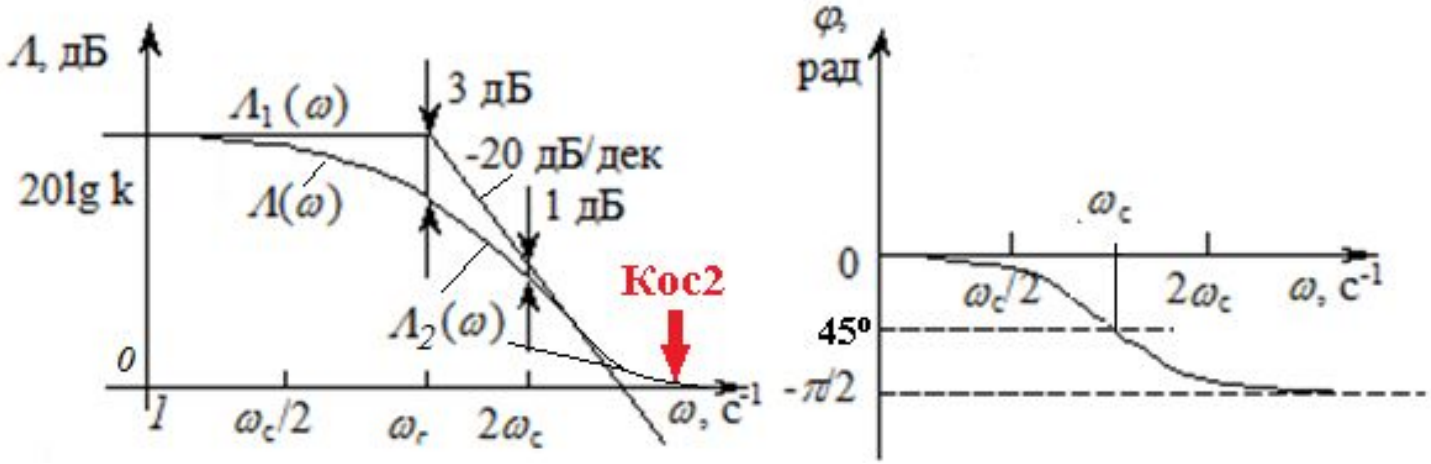


ОС включается между выходом и инвертирующем входом!

- Коэффициент усиления с учетом обратной связи и изменения полярности: $K_{OC1} = -R_2/R_1$, $K_{OC\,2} = 1 + R_2/R_1$
- Постоянная времени цепи ОС $\tau = R_2C$,

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

ЛАЧХ фильтров нижних частот

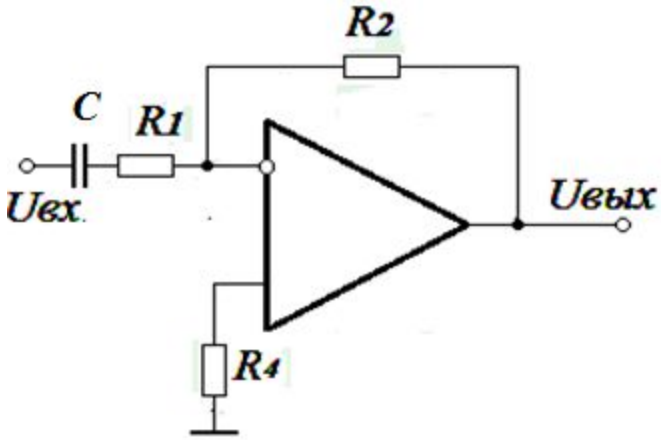


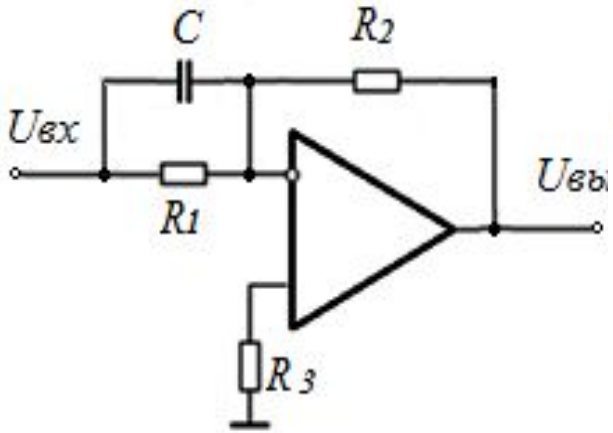
В ЛАЧХ по горизонтальной оси откладываются частоты в логарифмическом масштабе, по вертикальной оси – коэффициент передачи в децибелах (дБ), Λ=20lg|K(ω)|.

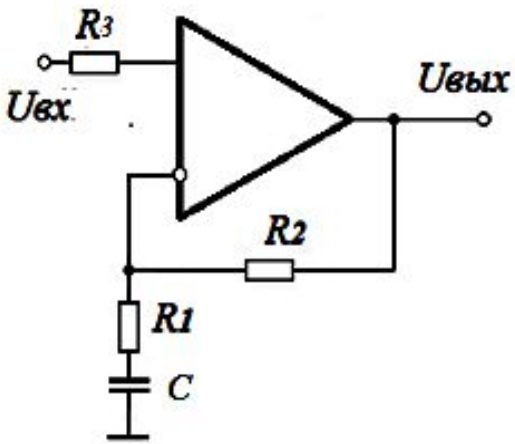
Максимальная разница между АЧХ и ЛАЧХ составит 3 дБ на частоте сопряжения, совпадающей с верхней частотой *ωв=2πfв*.

$$\Lambda_1(\omega) = \frac{20\lg|K|}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}} \qquad \varphi(\omega) = -\mathrm{arctg}\,\omega T$$

Активные фильтры верхних частот





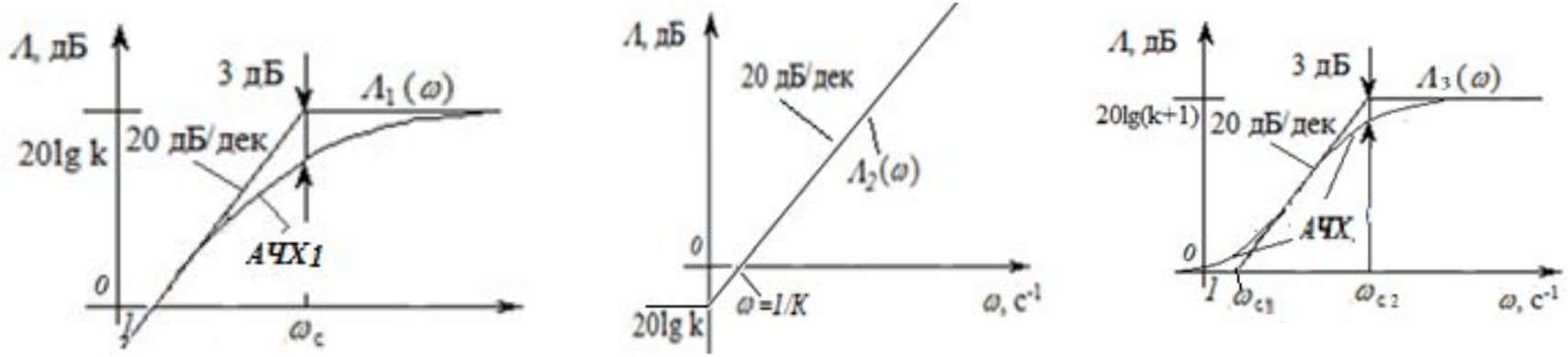


- $K_{OC1,2}$ =-R_2/R_1, $K_{OC\,3}=1+R_2/R_1$ коэффициент усиления с учетом обратной связи и изменения полярности, $\tau=R_1C$ – постоянная времени цепи ОС.

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

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



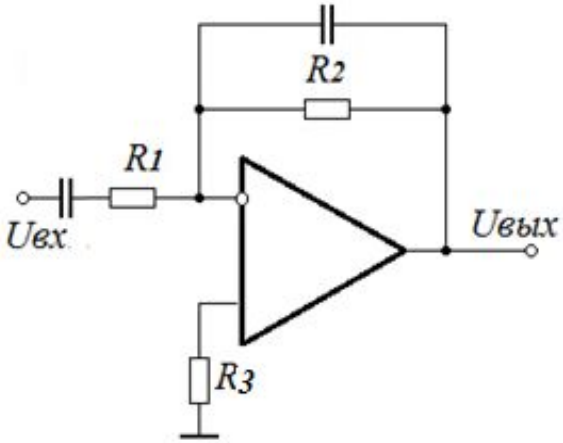
ФВЧ 1 - последовательное соединение дифференцирующего устройства с *Кдиф=ωτ* и ФНЧ, с частотой сопряжения $\omega_c=1/\tau$, компенсирует подъем ЛАЧХ с частоты ω_c

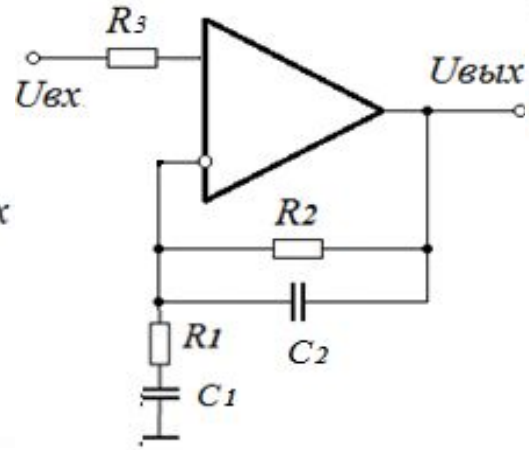
ФВЧ 2 - дифференцирующее устройство, ограничение ***K=R2/R1***

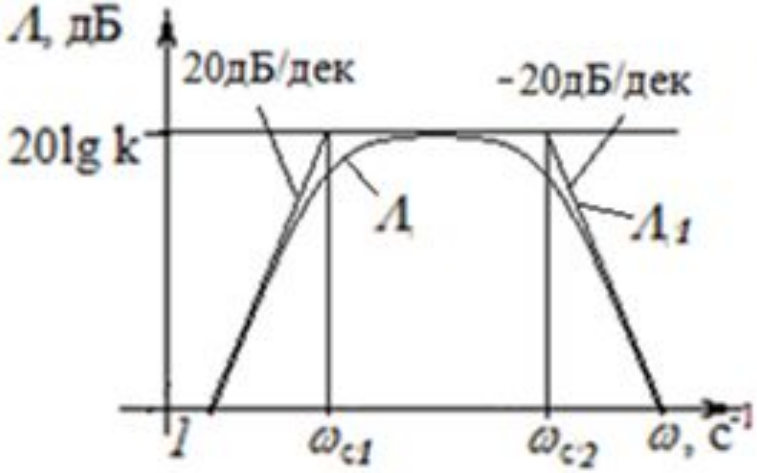
ФВЧ 3 – неинвертирующий, отличается от ФВЧ 1 коэффициентом передачи на НЧ, равным 1 и наличием двух частот сопряжения, $\omega_{C1}=1/kT$ и $\omega_{C2}=1/T$.

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

Полосовые фильтры







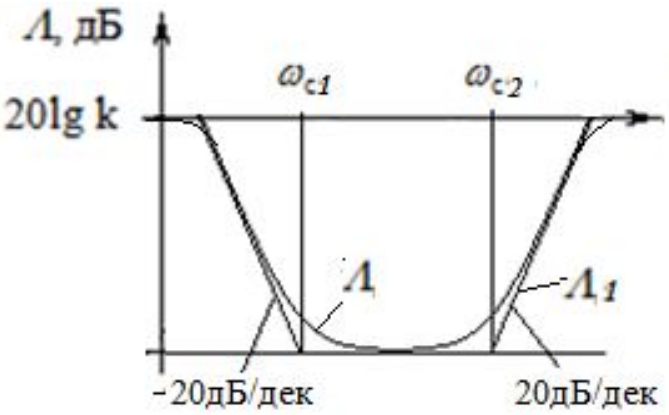
Объединение цепей ОС фильтров низких и высоких частот

Постоянные времени для верхних и нижних частот существенно отличаются, **расчет АЧХ независимый** ,

$$R_1C_1=\tau_н= 1/2\pi f_н, \qquad R_2C_2=\tau в=1/2\pi f_в.$$

Коэффициенты усиления $K_{OC\,1}= -R_2/R_1$, для неинвертирующего – $K_{OC\,2}= 1+ R_2/R_1$.

Режекторные фильтры



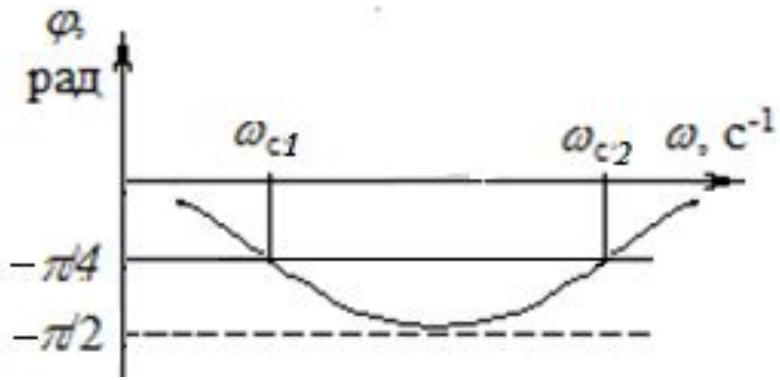
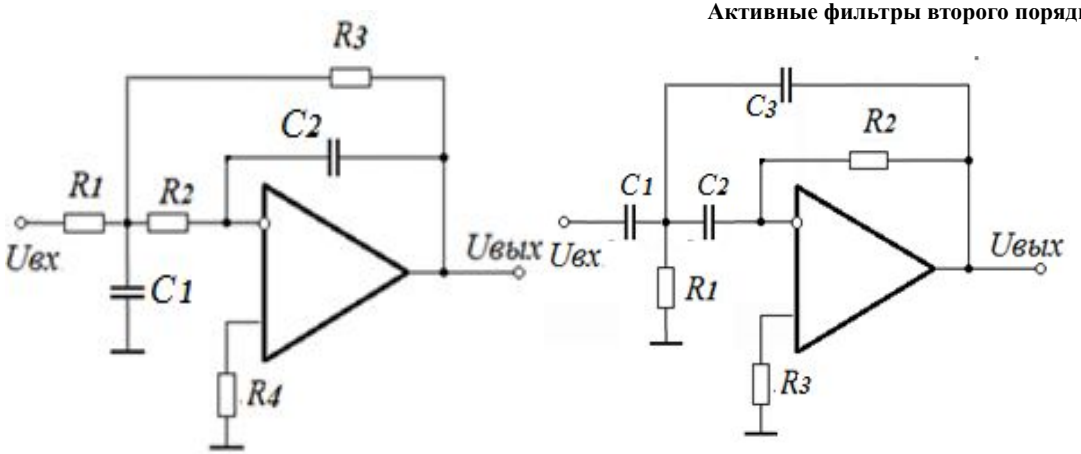
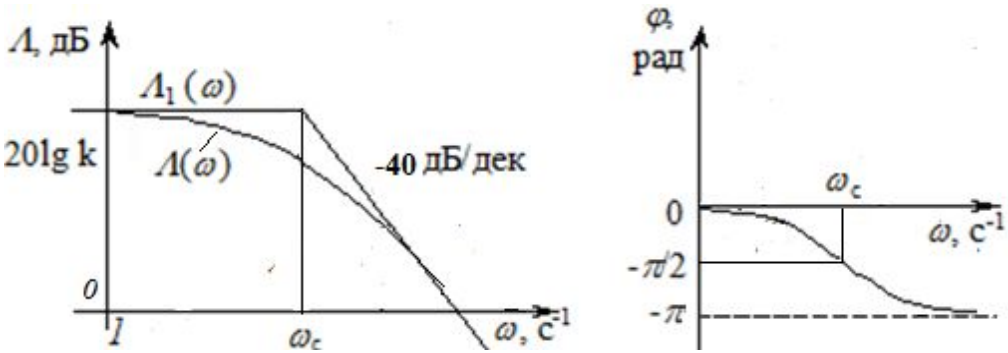
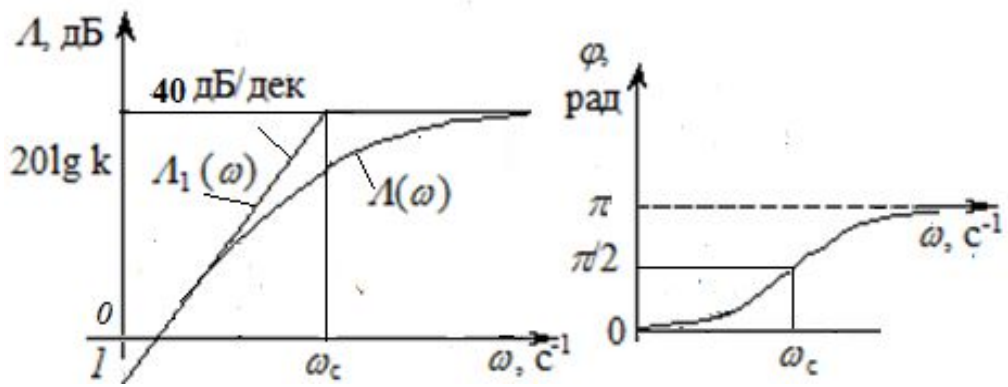


Схема как у полосовых фильтров, отличие частотной характеристики режекторного фильтра в том, что действие ФНЧ проявляется на нижних частотах, а ФВЧ – на верхних частотах, что обеспечивается соответствующим выбором постоянных времени фильтров.

Активные фильтры второго порядка







- Для улучшения избирательности повышается порядок передаточных функций.

При условии $R_1=R_2$ частота сопряжения для ФНЧ

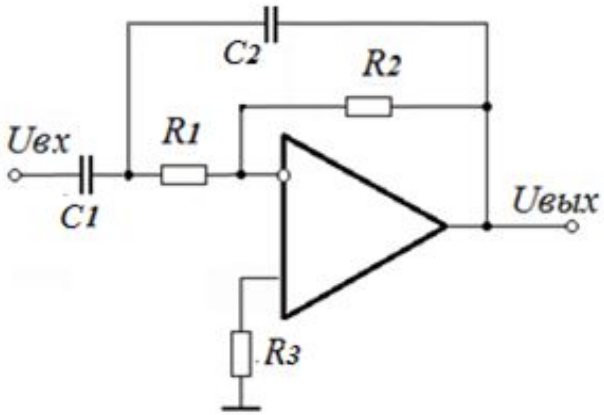
$$\omega_C = \frac{1}{\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}}$$

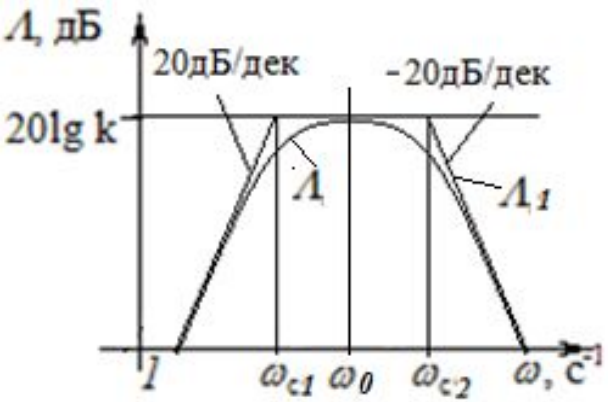
При условии $C_1=C_2$ для ФВЧ частота сопряжения:

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

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

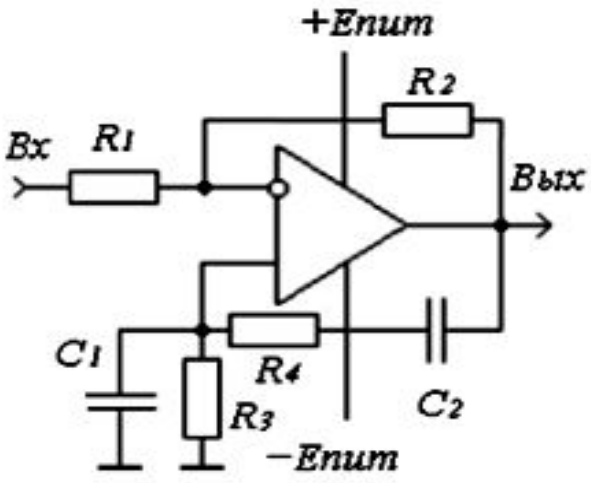
Селективные фильтры

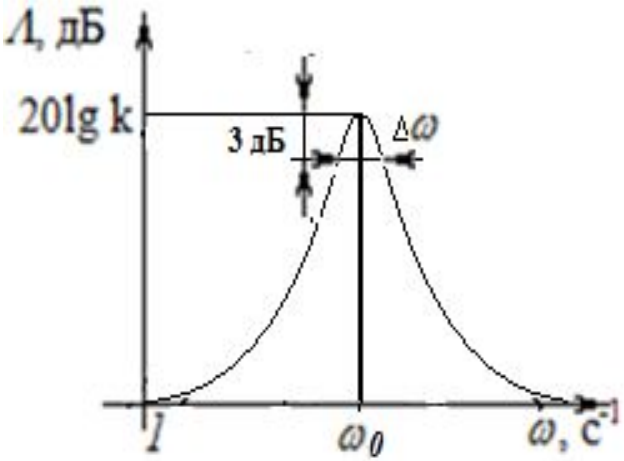




- Выделяют сигналы в узкой полосе рабочих частот. В полосовых фильтрах элементы ФВЧ и ФНЧ действовали независимо на своих частотах. При сближении *fн* и *fв* элементы фильтров начинают влиять друг на друга, что необходимо учитывать при расчетах: коэффициент передачи определяется отношением постоянных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

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





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 $Q \to \infty$.

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

Мост Вина, расчетные соотношения

- 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

$$\beta_{ooc}=R_1/(R_1+R_2),$$

коэффициент передачи положительной ОС на частоте резонанса, $\beta_{пос}=1/3$.

На частоте резонанса, $\beta_{пос}=\beta_{ooc}$ 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:

$$R \geq Q/\omega_0 C, \text{ при } R_{вх\ оу} >> R=R_3=R_4.$$

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:

$$R2 = 2R_1 - R_1/Q$$

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

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

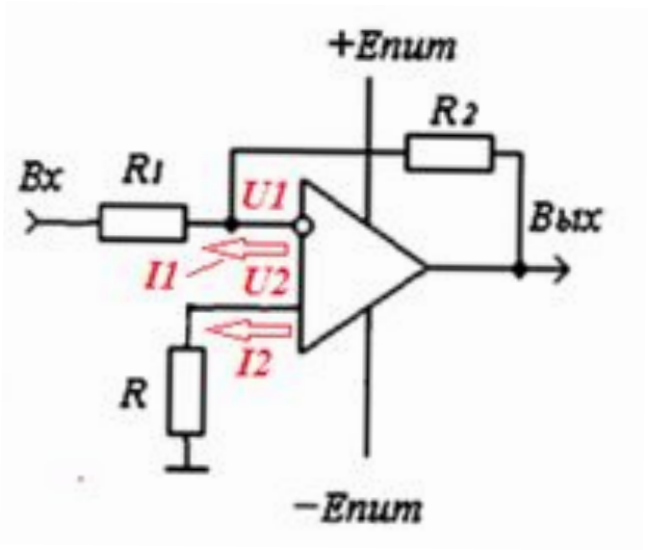
Температурная стабилизация параметров ОУ.

Зависимость напряжения смещения *Uсм* от температуры описывается температурной чувствительностью ОУ *dUсм/dT*. Смещение вызвано разностью напряжений эмиттерных переходов из-за несимметрии транзисторов. Изменение тока смещения описывает выражение:

$$\Delta I_{вх} = I_{б01} - I_{б02} = I_{э01}/H_{211} - I_{э02}/H_{212}$$

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

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

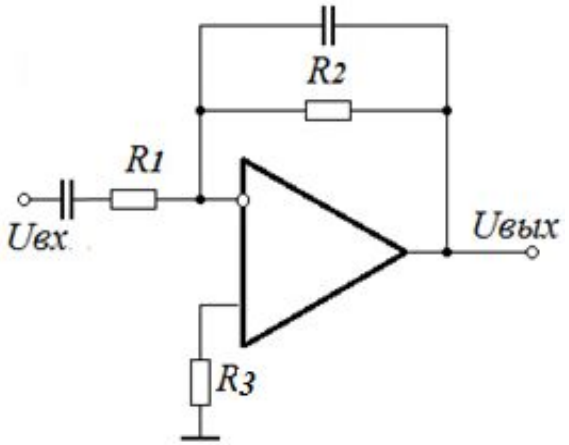


Для выполнения условия *U1=U2=I1*R1||R2=I2*R*, необходимо выполнить **условие компенсации** *R=R1||R2*.

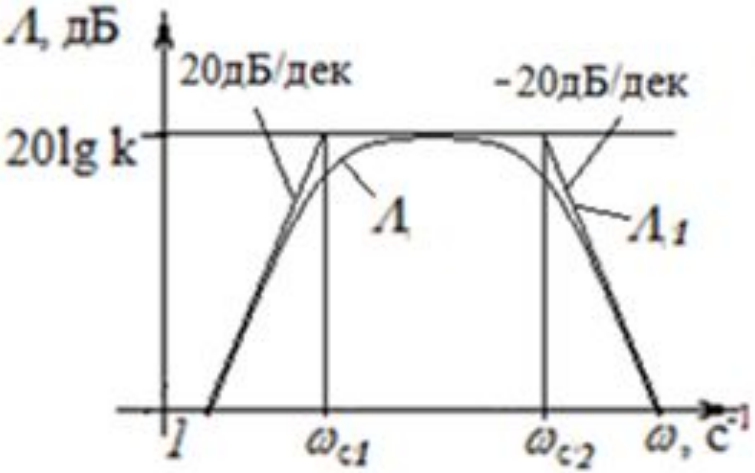
Пример расчета. Полосовой фильтр

- Задание. Рассчитать ПФ со следующими характеристиками:
- Верхняя частота 1 МГц;
- Нижняя частота 10кГц;
- Коэффициент усиления Ко=20дБ.
- Характеристики ОУ считать идеальными.
- 1. Принимаем величину резистора R2<<RвхОУ, R2=10кОм.
- 2. Определяем величину резистора R1, обеспечивающего нужный коэффициент усиления Ко=10 раз
- R1=R2/Ко=1кОм
- Из условия термостабилизации определяем величину R3=R2, так как R1 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

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

- Откуда из условия Yв=*К(jω)/Ко*=1/√2 определяем *τв=1/2πfв=1/6,28*1МГц=0,16мкс*
- Из выражения *τв=R2*C2,* находим C2=0,16мкс/10кОм=0,16*10^{-8}Ф=1,6 нФ

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

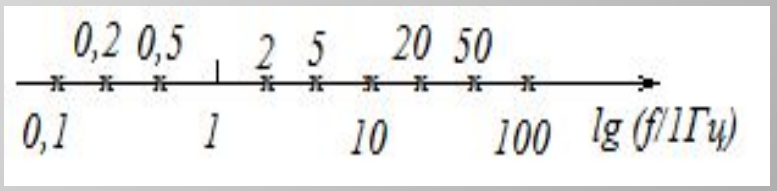
$$Y_н(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{1}{\omega^2 T_н^2}}}$$

- Из условия Yн=1/√2 находим
- *τн=1/2πfн=1/6,28*10кГц=* 0,16*10^{-4}=1,6 мс
- Из выражения *τн=R1*C1,* находим C1=0,16мс/1кОм=0,16*10^{-6}Ф=0,16 мкФ

Построение АЧХ каскада в логарифмическом масштабе

В логарифмической шкале длина отрезка частоты от начальной, 1 Гц, пропорциональна логарифму отношения величин, f/1Гц.

lg0,1=-1; lg1=0; lg10=1; lg100=2, lg2≈0,3, lg3 =0,5 и lg5≈0,7

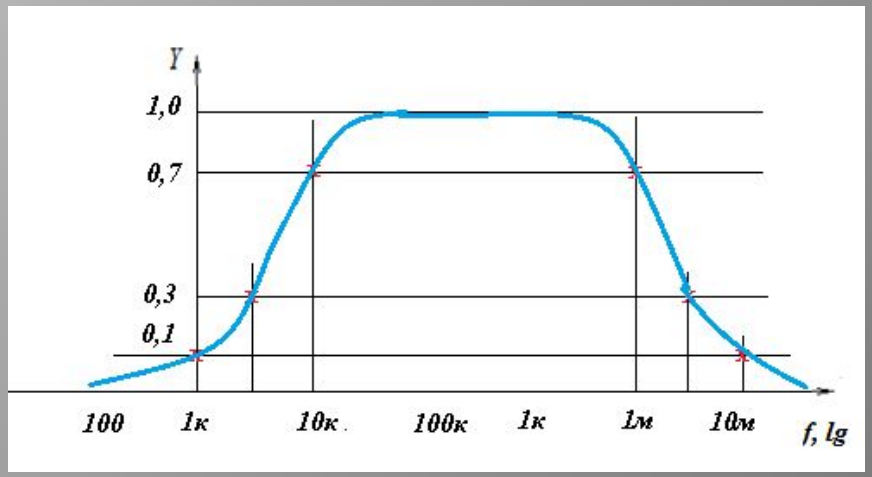


Логарифмическая шкала должна с запасом перекрывать весь диапазон рабочих частот, 10 кГц-1 МГц

График удобно строить, определяя значения Y на частотах $f=10f_в=10МГц$, $f=3f_в=3МГц$ $f=f_в=1МГц$, $f=f_н$, $f=0,3f_н=3кГц$, $f=0,1f_н=1кГц$

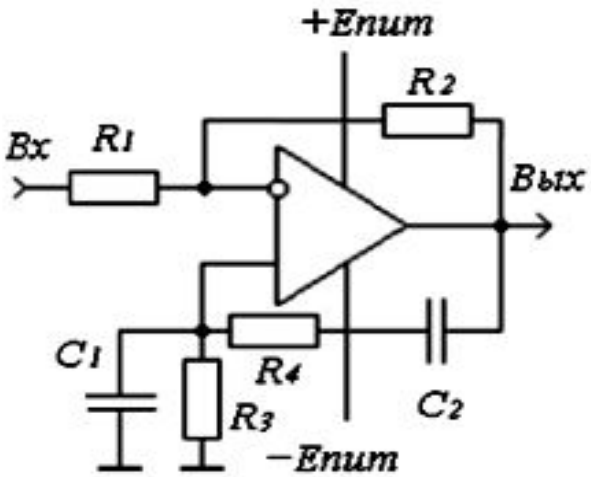
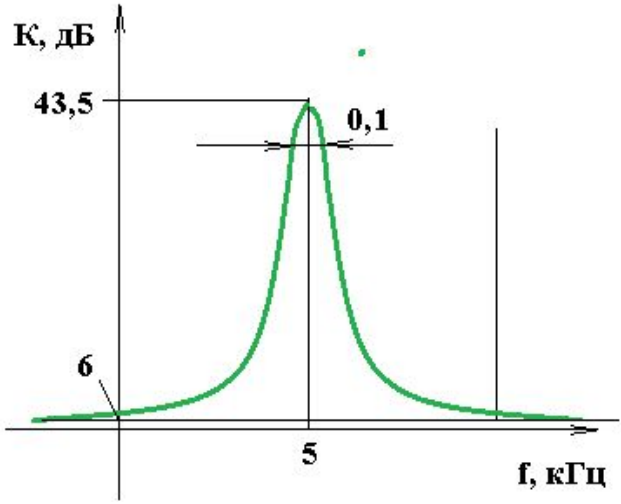
Соответственно, значение ЛАЧХ на этих частотах

$Y=0,7$; $Y=0,316$; $Y=0,1$



Пример расчета. Резонансный фильтр

- Задание. Рассчитать фильтр на частоту резонанса fo=5кГц, с добротностью Q=50. Использовать ОУ с Rвх>1МОм, Ко=10^5, f_1=100МГц
- Решение: **Цепь ПОС**
- 1. R3=R4=R=Rвх/100=1МОм/100=10кОм
- 2. C1=C2=C=τ/R, τ=RC=1/2πfo
- C=1/2πfoR=1/6,28*5*10^3*10^4=0,3*10^6=300нФ
- **Цепь ООС**
- 1. R1=Rвх/10=1МОм/10=100кОм
- 2. R2=2R1-R1/Q=200-100/50 =196кОм
- **Итог**: Q=100/(200-196)=50. Δf=fo/Q=5/50=100Гц
- Ко=3Q= 3*50=150 К(0)=К(∞)=R2/R1=200/196≈2



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