

Лекция №4

Обратная связь в линейных цепях.

([1] стр. 158-167)

Обратная связь (ОС) – связь, при которой часть сигнала с выхода цепи поступает на ее вход.

Цели введения ОС:

Отрицательная обратная связь (ООС) – это ОС, при которой часть сигнала, снимаемого с выхода, вычитается из входного сигнала. При этом коэффициент усиления (АЧХ) на всех частотах уменьшается.

Преимущества:

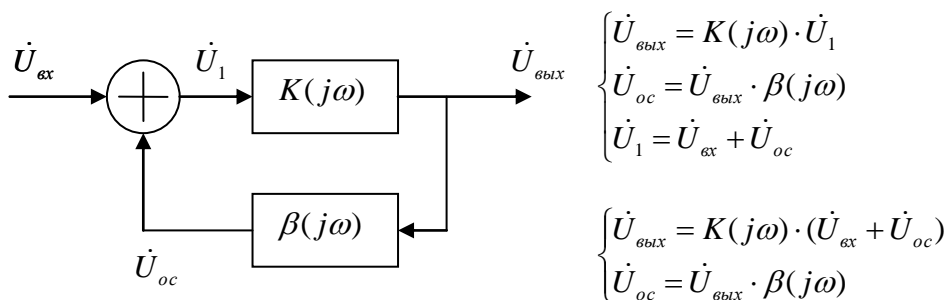
1. Повышение стабильности линейных цепей.
2. Уменьшение коэффициента нелинейных искажений.
3. Расширение полосы пропускания
4. Изменение входного и выходного сопротивлений (для согласования).
5. Создание устройств на базе операционных усилителей (АРУ – схемы).

Положительная обратная связь – обратная связь, при которой часть выходного сигнала складывается с входным. При этом АЧХ на какой-либо из частот может быть существенно больше АЧХ без ПОС.

Преимущества:

1. Повышение коэффициента усиления.
2. Возможность создания автогенераторов (генераторов гармонических колебаний).

КЧХ усилителя с ОС.

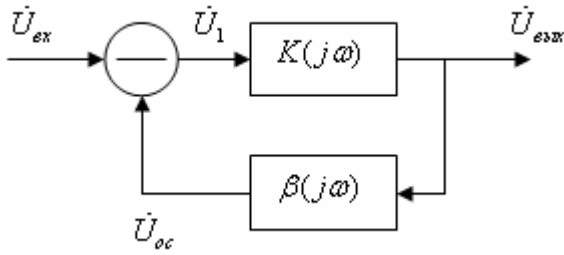


$$\dot{U}_{\text{вых}} = K(j\omega) \cdot \dot{U}_{\text{ex}} + K(j\omega) \cdot \dot{U}_{\text{вых}} \cdot \beta(j\omega)$$

$$\dot{U}_{\text{вых}} (1 - K(j\omega) \cdot \beta(j\omega)) = K(j\omega) \cdot \dot{U}_{\text{ex}}$$

$$K_{oc} = \frac{\dot{U}_{\text{вых}}}{\dot{U}_{\text{вх}}} = \frac{K(j\omega)}{1 - K(j\omega) \cdot \beta(j\omega)}$$

Применение ООС для стабилизации коэффициента усиления.



Для усилителя с ООС комплексно-частотная характеристика (КЧХ) $K_{oc} = \frac{\dot{U}_{\text{вых}}}{\dot{U}_{\text{вх}}} = \frac{K(j\omega)}{1 + K(j\omega) \cdot \beta(j\omega)}$

$$\frac{dK_{oc}}{dK} = \frac{1 + K\beta - K\beta}{(1 + K\beta)^2} = \frac{1}{(1 + K\beta)^2}; \quad \frac{dK_{oc}}{dK} = \frac{K}{1 + K\beta} \cdot \frac{1}{(1 + K\beta) \cdot K}$$

$$\frac{\frac{dK_{oc}}{K}}{1 + K\beta} = \frac{dK}{K} \cdot \frac{1}{1 + K\beta}; \quad \frac{dK_{oc}}{K_{oc}} = \frac{dK}{K} \cdot \frac{1}{1 + K\beta}; \quad (4.1)$$

Введем обозначения $\frac{dK_{oc}}{K_{oc}} = \delta_{K_{ооc}}$ - относительная нестабильность коэффициента усиления усилителя,

охваченного ООС, $\delta_K = \frac{dK}{K}$ - относительная нестабильность коэффициента усиления усилителя без ООС. Из

(4.1) следует, что $\delta_{K_{ооc}} = \frac{\delta_K}{(1 + K\beta)}$. Таким образом, относительная нестабильность коэффициента усиления

усилителя, охваченного ООС, уменьшается в $1 + K\beta$ раз по сравнению с относительной нестабильностью коэффициента усиления усилителя без ОС.

Влияние нестабильность четырехполосника обратной связи на нестабильность коэффициента усилителя, охваченного ООС.

$$\frac{dK_{oc}}{d\beta} = \frac{0 - (K)^2}{(1 + K\beta)^2} = -\frac{K}{1 + K\beta} \cdot \frac{K\beta}{(1 + K\beta)\beta}; \quad \frac{dK_{oc}}{K} = -\frac{d\beta}{\beta} \cdot \frac{K\beta}{1 + K\beta}; \quad \frac{dK_{oc}}{K_{oc}} = -\frac{d\beta}{\beta} \cdot \frac{K\beta}{1 + K\beta};$$

Пусть $\frac{dK_{oc}}{K_{oc}} = \delta_{K_{ооc}}$, $\delta_\beta = -\frac{d\beta}{\beta}$. Тогда $\delta_{K_{ооc}} = \delta_\beta \frac{K\beta}{1 + K\beta}$. Поскольку $K\beta \gg 1$, то $\delta_{K_{ооc}} \approx \delta_\beta$ (4.2)

Из (4.2) следует, что относительная нестабильность коэффициента усиления усилителя, охваченного ООС такая же как у четырехполосника обратной связи.

Вывод: Для четырехполосника обратной связи надо использовать стабильные элементы, параметры которых остаются постоянными во времени или меняются очень слабо.

Применение ООС для расширения полосы пропускания усилителя.

Рассмотрим КЧХ усилителя низких частот без разделительного конденсатора

$$K_{\text{УНЧ}}(j\omega) = -\frac{K_{\text{max}}}{1 + j\omega\tau_0}$$

$$K_{\text{УНЧООС}}(j\omega) = \frac{-\frac{K_{\text{max}}}{1 + j\omega\tau_0}}{1 + \frac{K_{\text{max}}\beta}{1 + j\omega\tau_0}} = -\frac{K_{\text{max}}}{1 + K_{\text{max}}\beta + j\omega\tau_0} = -\frac{\frac{K_{\text{max}}}{1 + K_{\text{max}}\beta}}{1 + j\omega\frac{\tau_0}{1 + K_{\text{max}}\beta}} = -\frac{K_{\text{maxoc}}}{1 + j\omega\tau_{\text{0oc}}}, \text{ где}$$

$$K_{\text{maxoc}} = \frac{K_{\text{max}}}{1 + K_{\text{max}}\beta}; \quad \tau_{\text{0oc}} = \frac{\tau_0}{1 + K_{\text{max}}\beta}$$

$$AЧХ = \frac{K_{\text{maxoc}}}{\sqrt{1 + (\omega\tau_{\text{0oc}})^2}}$$

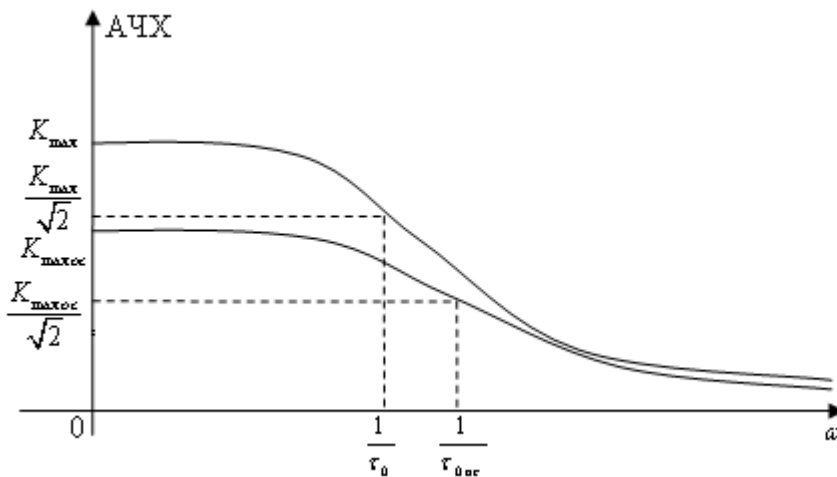
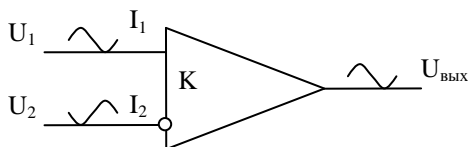


Рис.4.1 АЧХ усилителя с ООС и без ООС

Из полученных результатов следует (см. рис.4.1), что введение ООС расширяет полосу пропускания в $1 + K\beta$ раз ($1 + K\beta = H$ - фактор связи), однако при этом K_{max} уменьшается так же в $1 + K\beta$ раз.

Применение ООС в операционных усилителях.

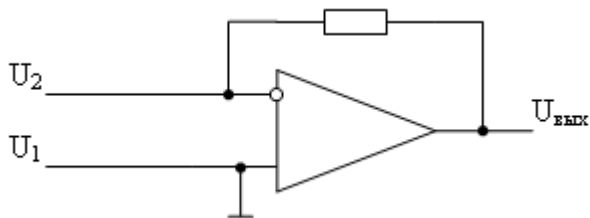


$$U_{\text{вых}} = (U_1 - U_2) \cdot K$$

$$R_{\text{ex}} \approx 10^6 \text{ Ом} \Rightarrow I_1 \approx I_2 \approx 0$$

$$R_{\text{вых}} \approx 1000 \text{ Ом}, \quad K = 10^6$$

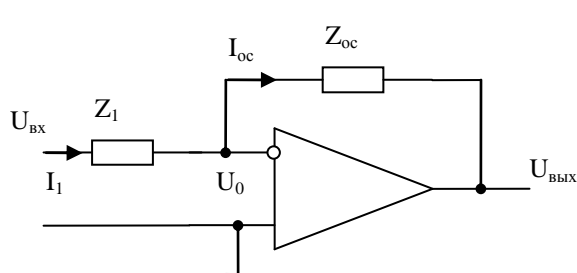
$$U_{\text{вых}} \leq E_{\text{пит}}$$



$$\left. \begin{aligned} U_{\text{вых}} &\approx 10B \\ K &= 10^6 \\ U_1 &= 0 \\ (U_1 - U_2) &= \frac{U_{\text{вых}}}{K} \end{aligned} \right\} \Rightarrow U_2 \approx 0$$

При заземленном неинвертирующем входе, отрицательной обратной связи и стандартных параметрах операционного усилителя ($K = 10^6$; $U_{\text{вых}} \approx 10B$) потенциал инвертирующего входа приблизительно равен нулю и инвертирующий вход можно рассматривать как «виртуальную землю».

Выведем формулу для передаточной функции операционного усилителя, охваченного однопетлевой ООС, при заземленном неинвертирующем входе. При выводе формулы будем использовать понятие «виртуальной земли», Кроме того, учитывая большое входное сопротивление усилителя, будем считать, что токи, втекающие в усилитель, равны нулю. Тогда $U_0 = 0$, $I_1 = I_{oc}$ и передаточную функцию найдем из решения системы уравнений

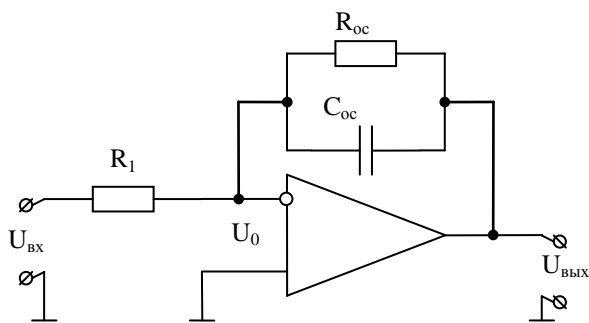


$$\begin{cases} I_1 = \frac{U_{\text{вх}} - U_0}{Z_1} \\ I_{oc} = \frac{U_0 - U_{\text{вых}}}{Z_{oc}} \\ U_0 = 0 \\ I_1 = I_{oc} \end{cases}$$

Тогда $\frac{U_{\text{вх}}}{Z_1} = \frac{-U_{\text{вых}}}{Z_{oc}} \Rightarrow K(p) = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{Z_{oc}}{Z_1} \Rightarrow K(p) = -\frac{Z_{oc}(p)}{Z_1(p)}$ (4.3)

Пример 1

Найдем передаточную функцию АЧХ – фильтра первого порядка, схема которого приведена на рисунке. Для этого используем формулу (4.3).



$$Z_1(p) = R_1;$$

$$Z_{oc}(p) = \frac{R_{oc} \cdot \frac{1}{pC_{oc}}}{R_{oc} + \frac{1}{pC_{oc}}} = \frac{R_{oc}}{1 + pR_{oc}C_{oc}} = \frac{R_{oc}}{1 + p\tau_{oc}}$$

$$K(p) = -\frac{R_{oc}}{R_1 + p\tau_{oc}} = \frac{-K_m}{1 + p\tau_{oc}}$$

$$K_m = \frac{R_{oc}}{R_1}; \tau_{oc} = R_{oc}C_{oc}$$

Это УНЧ, или простейший активный RC фильтр низких частот.

Диаграмма нулей и полюсов передаточной функции УНЧ с полюсом $P_{i1} = -\frac{1}{\tau_{oc}}$ приведена на рисунке 4.2.

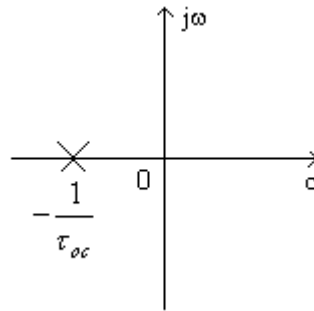
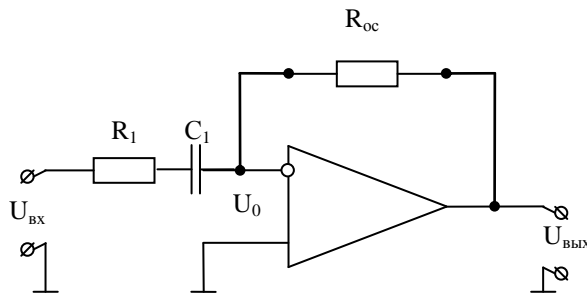


Рис.4.2

Самостоятельно найдите КЧХ, АЧХ и ФЧХ этого фильтра.

Пример 2

Найдем передаточную функцию АРС – фильтра первого порядка, схема которого приведена на рисунке. Для этого используем формулу (4.3).



$$Z_1(p) = R_1 + \frac{1}{pC_1} = \frac{pC_1R_1 + 1}{pC_1}; \quad Z_{oc}(p) = R_{oc}$$

$$K(p) = -\frac{pC_1R_{oc}}{pC_1R_1 + 1} = \frac{-p\tau}{p\tau_1 + 1};$$

$$\lim_{p \rightarrow \infty} K(p) = -K_m$$

где $K_m = \frac{R_{oc}}{R_1}$; $\tau = R_{oc}C_1$; $\tau_1 = R_1C_1$

Это УВЧ, или простейший активный RC фильтр высоких частот.

Диаграмма нулей и полюсов передаточной функции УВЧ с полюсом $p_{n1} = -\frac{1}{\tau_1}$ и нулем $p_{01} = 0$ приведена на рисунке 4.3.

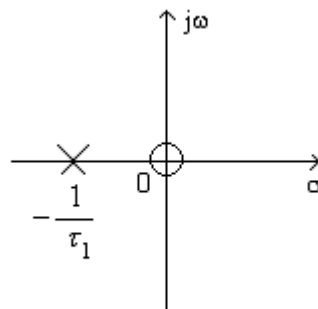


Рис.4.3

Самостоятельно найдите КЧХ, АЧХ и ФЧХ этого фильтра.

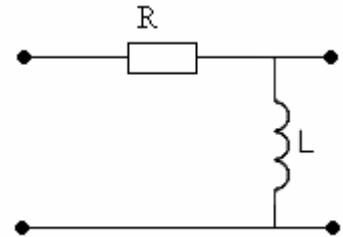
Контрольные вопросы к лекции 4

1. Дайте определение обратной связи
2. Дайте определение положительной (ПОС) и отрицательной (ООС) обратной связи
3. Для чего можно использовать ООС?
4. Для чего можно использовать ПОС?
5. Как влияет ООС на нестабильность усилителя?
6. Как влияет ООС на нестабильность четырехполюсника обратной связи?
7. Почему при введении ООС расширяется полоса пропускания усилителя и уменьшается его коэффициент усиления?
8. Когда следует расширять полосу пропускания усилителя?
9. Перечислите основные особенности операционного усилителя.
10. Приведите примеры схем фильтров низких и высоких частот на основе операционного усилителя.

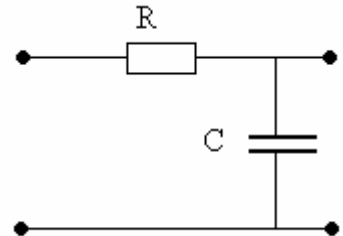
Типовые задачи к экзамену

1. Относительная нестабильность коэффициента усиления усилителя составляет 20%. Найти величины коэффициента усиления усилителя, охваченного отрицательной обратной связью K_{oc} и коэффициента отрицательной обратной связи β , после введения которой нестабильность усиления снизится до 1%, если номинальное усиление усилителя $K=10^5$.

2. Комплексно-частотная характеристика усилителя $K(j\omega) = -K_0/(1+j\omega\tau_0)$. Записать аналитическое выражение АЧХ усилителя после введения в него частотно-зависимой отрицательной обратной связи с помощью четырехполюсника, схема которого приведена на рисунке, если $\tau_0=L/R$, а входное и выходное сопротивления четырехполюсника ОС считать равными $R_{вх}=\infty, R_{вых}=0$.



3. Комплексно-частотная характеристика усилителя $K(j\omega) = -K_0/(1+j\omega\tau_0)$. Записать аналитическое выражение ФЧХ усилителя после введения в него частотно-зависимой отрицательной обратной связи с помощью четырехполюсника, схема которого приведена на рисунке, если $\tau_0=RC$, а входное и выходное сопротивления четырехполюсника ОС считать равными $R_{вх}=\infty, R_{вых}=0$.



4. Найдите передаточную функцию АРС – фильтра первого порядка, схема которого приведена на рисунке. Для этого используйте формулу (4.3). Постройте диаграмму нулей и полюсов. Используя эту диаграмму, изобразите приблизительный график АЧХ этого фильтра при условии, что $\tau_1=\tau_{oc}$.

