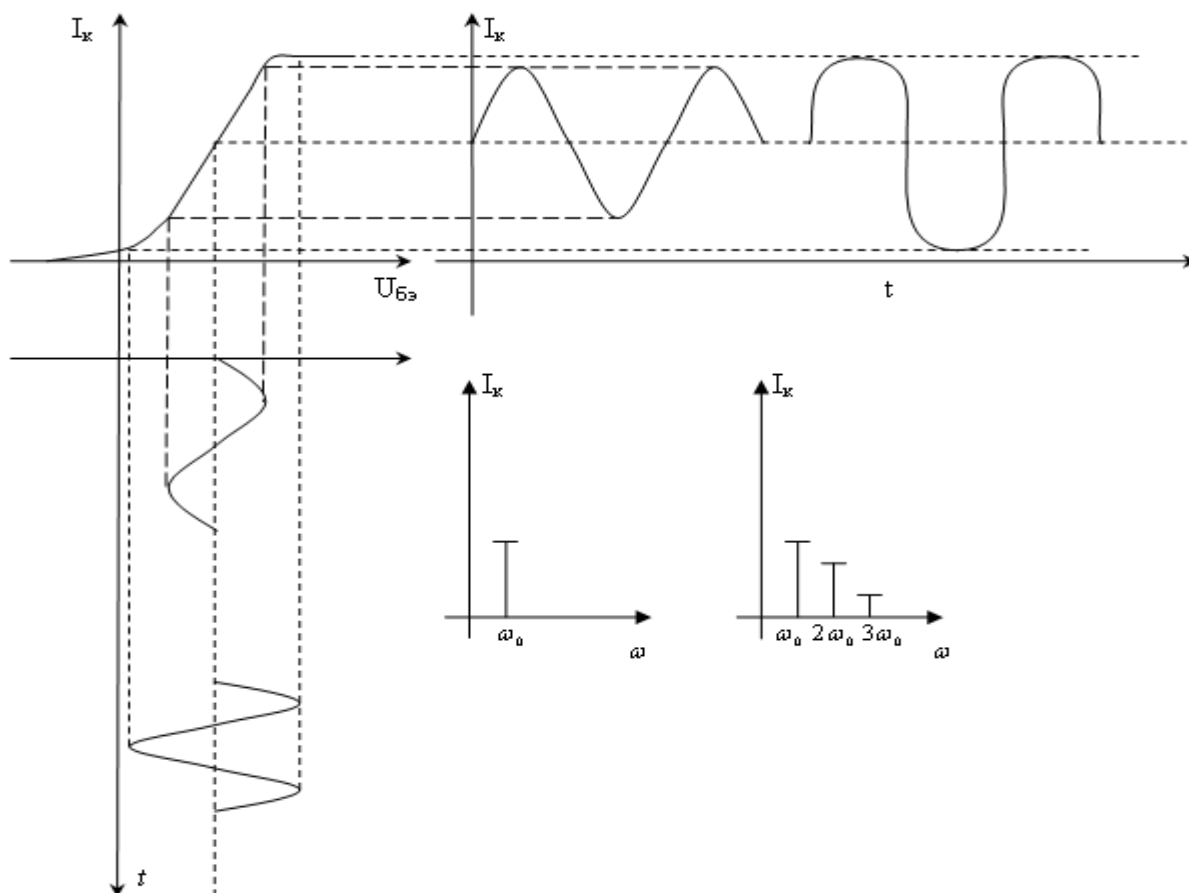
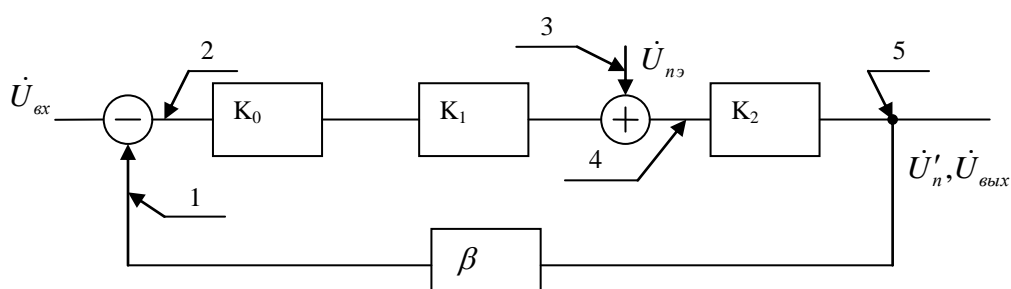
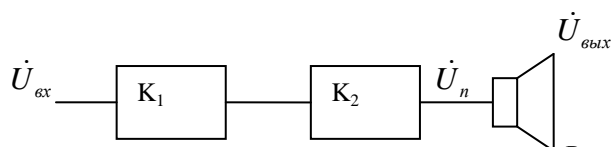


## Лекция №5

### Понятие нелинейных искажений. Устойчивость цепей. ([1] стр. 158-173)

Нелинейные искажения появляются при больших входных сигналах (см. рис.5.3), когда сигналы не умещаются на линейном участке ВАХ. Это явление происходит в конечных каскадах усилителя. Нелинейные искажения приводят к искажению формы тока. В результате этих искажений появляются паразитные гармоники, кратные и комбинационные частотам гармоник входного сигнала.



### Ослабление нелинейных искажений с помощью ООС

Паразитные гармоники  $\dot{U}_n$  появляются на выходе каскада  $K_2$  (рис. 5.1). Для уменьшения нелинейных искажений мы вводим ООС (рис. 5.2), а для компенсации ослабления полезного сигнала добавляется предварительный усилитель  $K_0$ .

Амплитуда паразитной гармоники на выходе каскада  $K_2$  уменьшится после введения ООС. Обозначим уменьшенную амплитуду  $\dot{U}'_n$  и определим во сколько раз она уменьшится после введения ООС по сравнению с  $\dot{U}_n$ . Для этого найдем амплитуду паразитной гармоники  $\dot{U}'_n$  в точке 5, последовательно определив амплитуду паразитной гармоники в различных точках схемы:

Точка 1:  $\dot{U}'_n \cdot \beta$

Точка 2:  $0 - \dot{U}'_n \cdot \beta$

Точка 3:  $\dot{U}_{nэ} = \frac{\dot{U}_n}{K_2}$  - эквивалентные паразитные гармоники, пересчитаны с выхода ко входу каскада  $K_2$ .

Точка 4:  $\dot{U}_{nэ} - \dot{U}'_n \cdot \beta \cdot K_0 \cdot K_1$

Точка 5:  $\dot{U}'_n = K_2(\dot{U}_{nэ} - \dot{U}'_n \cdot \beta \cdot K_0 \cdot K_1)$ .

Учитывая, что  $\dot{U}_{nэ} = \frac{\dot{U}_n}{K_2}$ , имеем  $\dot{U}'_n = K_2 \left( \frac{\dot{U}_n}{K_2} - \dot{U}'_n \cdot \beta \cdot K_0 \cdot K_1 \right)$ . Откуда

$$\dot{U}'_n(1 + \beta \cdot K_0 \cdot K_1 \cdot K_2) = \dot{U}_n \Rightarrow \dot{U}'_n = \frac{\dot{U}_n}{(1 + \beta \cdot K_0 \cdot K_1 \cdot K_2)}$$

Из последнего соотношения следует, что введение ООС уменьшает величину паразитной гармоники в  $(1 + \beta \cdot K_0 \cdot K_1 \cdot K_2)$  раз.

Виды ООС по способу подключения четырехполюсника обратной связи.

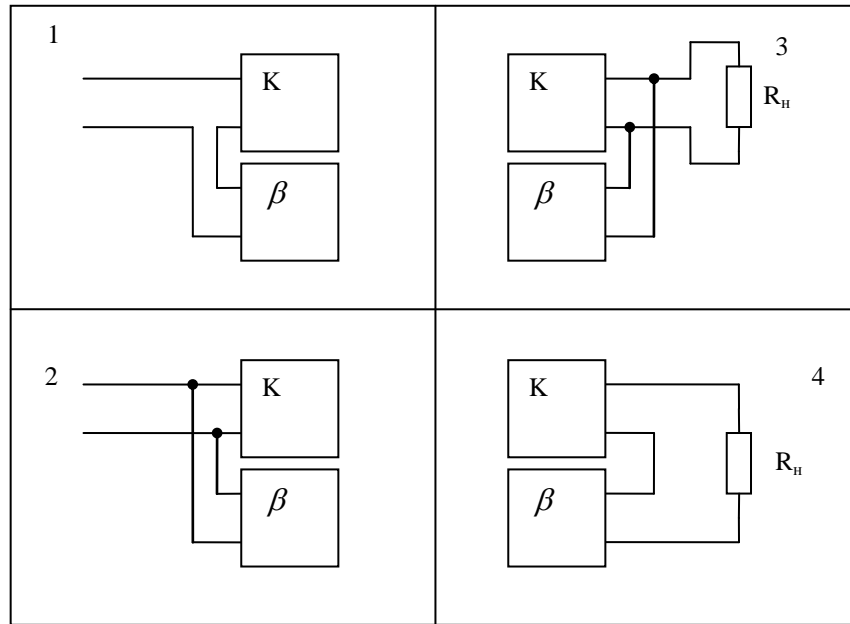


Рис.5.4.

На рисунке 5.4. изображены различные способы подключения четырехполюсника обратной части схемы к усилителю

- 1 – Последовательная ООС – устраняется при холостом ходе на входе усилителя.
- 2 – Параллельная ООС – устраняется при коротком замыкании входных клемм усилителя.
- 3 – ООС по напряжению – четырехполюсник ООС управляется выходным напряжением. Устраняется при коротком замыкании выходных клемм усилителя.
- 4 – ООС по току – четырехполюсник ООС управляется выходным током. Устраняется при размыкании выходных клемм.

ООС влияет на входное и выходное сопротивление усилителя и используется для согласования каскадов.

Виды ООС	$R_{вх}$	$R_{вых}$
Последовательная по напряжению	Увеличивается	Уменьшается
Последовательная по току	Увеличивается	Увеличивается
Параллельная по напряжению	Уменьшается	Уменьшается
Параллельная по току	Уменьшается	Увеличивается

При любых видах ООС входное и выходное сопротивления усилителя, охваченного ООС, меняются в фактор связи  $(1 + K\beta)$  раз. Это позволяет согласовывать отдельные каскады усилителя по входному и выходному сопротивлению.

### Устойчивость цепей с ОС

Система называется устойчивой, если она возвращается в исходное состояние, после прекращения внешних воздействий.

Радиотехническая цепь (РТЦ) считается устойчивой, если сигнал на ее выходе стремится к нулю, после прекращения входного сигнала. Неустойчивость в цепи может возникнуть после появления в ней положительной обратной связи (ПОС).

#### Алгебраический критерий устойчивости.

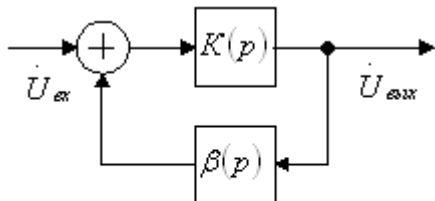


Рис. 5.5

На рисунке 5.5. Изображен усилитель с передаточной функцией  $K(p)$ , охваченный ПОС с помощью четырехполюсника с передаточной функцией  $\beta(p)$ . Рассмотрим случай, когда входной сигнал отсутствует ( $\dot{U}_{вх} = 0$ ), то есть цепь автономна. Тогда  $\hat{U}_{вх}(p) = 0$  и уравнение состояния цепи  $\hat{U}_{вых}(p) = K(p)\beta(p)\hat{U}_{вых}(p)$ . Откуда

$$\hat{U}_{вых}(p)(1 - K(p)\beta(p)) = 0 \quad (5.1).$$

Поскольку при включении питания в усилителе возникают переходные процессы, то выходное напряжение  $\dot{U}_{вых} \neq 0$  и, следовательно,  $\hat{U}_{вых}(p) \neq 0$ . Тогда равенство (5.1) справедливо, когда  $(1 - K(p)\beta(p)) = 0$ . Это уравнение относительно переменной  $p$  называется характеристическим уравнением. Пусть  $p_1, p_2, \dots$  - корни уравнения. Так как рассматриваемая цепь линейна, то в общем случае выходной сигнал

$$u_{вых}(t) = A_1 e^{p_1 t} \cdot 1(t) + A_2 e^{p_2 t} 1(t) + \dots$$

Корень характеристического уравнения  $p_k = \sigma_k + j\omega_k$  в общем случае комплексное число. Выходной сигнал будет стремиться к нулю, если действительные части показателей степени всех экспонент отрицательны.

Из этого следует, что для устойчивости линейной цепи, охваченной ОС, достаточно чтобы полюса ее передаточной функции (корни характеристического уравнения) лежали в левой полуплоскости плоскости  $P$ .

Пример.  
Определите устойчивость RC цепи (см. рис. 5.6)

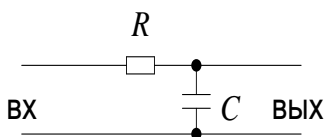


Рис.5.6.

$$K(p) = \frac{1}{p\tau_0 + 1}$$

$$P_{n1} = -\frac{1}{\tau_0}, \text{ где } \tau_0 = RC$$

RC-цепь устойчива, т.к. полюс передаточной функции цепи лежит в левой полуплоскости (см. Рис. 5.7)

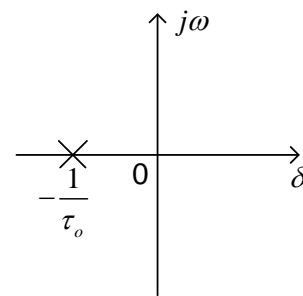


Рис.5.7

К недостаткам алгебраического метода можно отнести два:

1. Аналитические трудности решения характеристического уравнения.
2. Алгебраический критерий не позволяет определить частоту, на которой возможна неустойчивость (генерация)

### Частотный критерий устойчивости.

Радиотехническая цепь (РТЦ) устойчива, если не существует частот, на которых  $AЧХ > 1$ , а  $\PhiЧХ = 2\pi n, n \in Z$ .

В частотном критерии устойчивости под АЧХ и ФЧХ РТЦ понимаются АЧХ и ФЧХ разомкнутого тракта, включающего в себя последовательно включенный усилитель и четырехполюсник ОС (см. рис. 5.8).

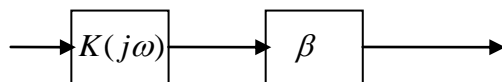


Рис.5.8.

Система неустойчива, если на частоте  $\omega_0$  выполняется условие (1)

$$\begin{cases} AЧХ > 1 \\ \PhiЧХ = 2\pi n, n \in Z \end{cases} \quad (1)$$

На рисунке 5.9 изображены АЧХ и ФЧХ разомкнутого тракта РТЦ, которая неустойчива на частоте  $\omega_0$ .

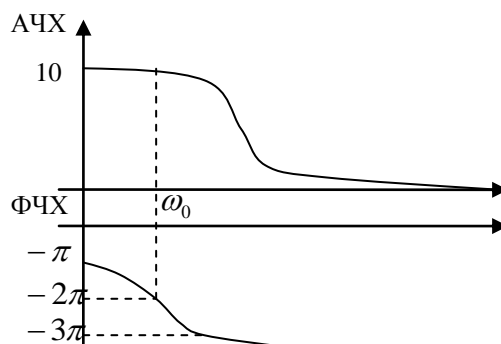


Рис.5.9

При включении любой РТЦ в ней возникают шумы, которые выделяются на нагрузке и в спектре которых содержится в том числе и гармоника на частоте  $\omega_0$ . Если выполняется условие (1), то при замыкании разомкнутого тракта (при подключении выхода четырехполюсника ОС ко входу усилителя) гармоника на частоте  $\omega_0$  усилится, поскольку АЧХ разомкнутого тракта больше единицы. Кроме того, эта гармоника сложится в фазе на нагрузке с гармоникой, существующей на той же частоте в виде свободного колебания, поскольку сдвиг фаз разомкнутого тракта кратен величине  $2\pi$ . Это приведет к росту амплитуды гармоники и, следовательно, к неустойчивости РТЦ. На этом факте построена работа генераторов гармонических сигналов.

### Задания на самостоятельную проработку

1. На рисунке 5.10 изображены принципиальные схемы устройств с различными видами отрицательной обратной связи, отличающиеся способом подключения четырехполюсника обратной связи. Определите для каждой схемы вид обратной связи.

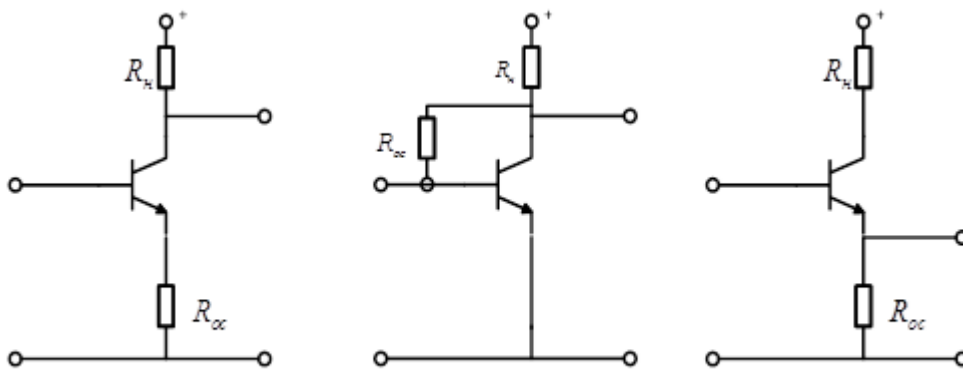


Рис.5.10.

2. На рисунке 5.11. изображена схема устройства. Определите, устойчиво ли это устройство. Ответ поясните.

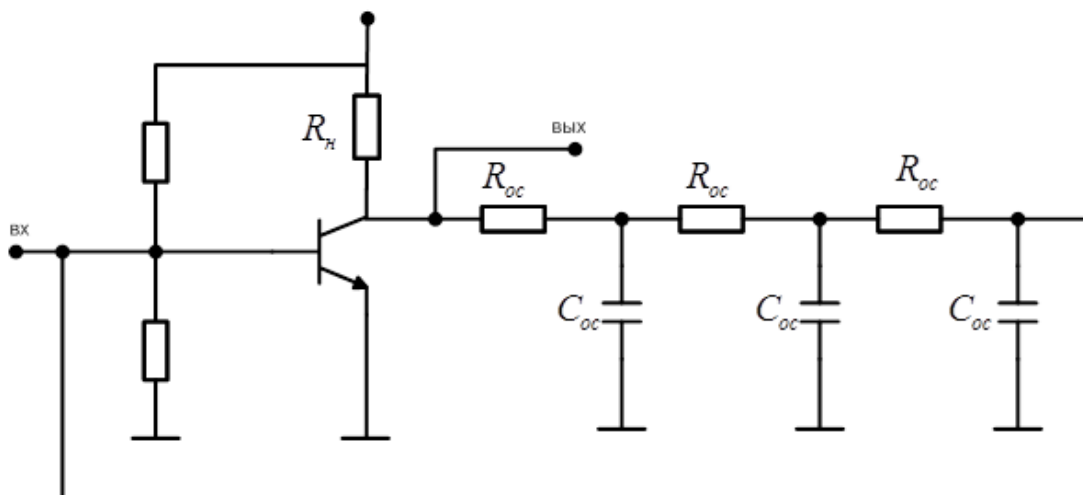


Рис.5.11.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение нелинейным искажениям
2. В чем причина нелинейных искажений?
3. Нелинейным искажениям подвергся входной сигнал, в спектр которого входили частоты 2 кГц и 10 кГц. Может ли в результате нелинейных искажений появиться гармоника с частотой 11 кГц? 12 кГц?
4. Почему при введении ООС паразитные гармоники ослабляются, а ослабление полезных гармоник компенсируется в предусилителе?
5. Какие виды ООС по способу подключения четырехполюсника обратной связи вы знаете?
6. Как влияет обратная связь на входное и выходное сопротивления усилителя?
7. Для чего нужно изменять входное и выходное сопротивления усилителя?
8. Какая радиотехническая цепь считается устойчивой?
9. Сформулируйте алгебраический критерий устойчивости
10. Сформулируйте частотный критерий устойчивости и поясните его суть из физических соображений.

### Типовые задачи к экзамену

1. Предложите характеристическое уравнение четвертого порядка, описывающее неустойчивую радиотехническую цепь.
2. Определите, является ли устойчивой радиотехническая цепь, характеристическое уравнение которой  $p^3 + 2p^2 + 2p + 1 = 0$ .
3. Усилитель, комплексно-частотная характеристика которого задана функцией  $K(j\omega) = K_0$ , охвачен последовательной обратной связью. Четырехполюсником обратной связи является RC цепочка. Определите, при каком соотношении  $K_0 > 1$  или  $K_0 < 1$  данная цепь будет устойчивой. При анализе положите входное сопротивление усилителя равным бесконечности, а выходное - нулю.