

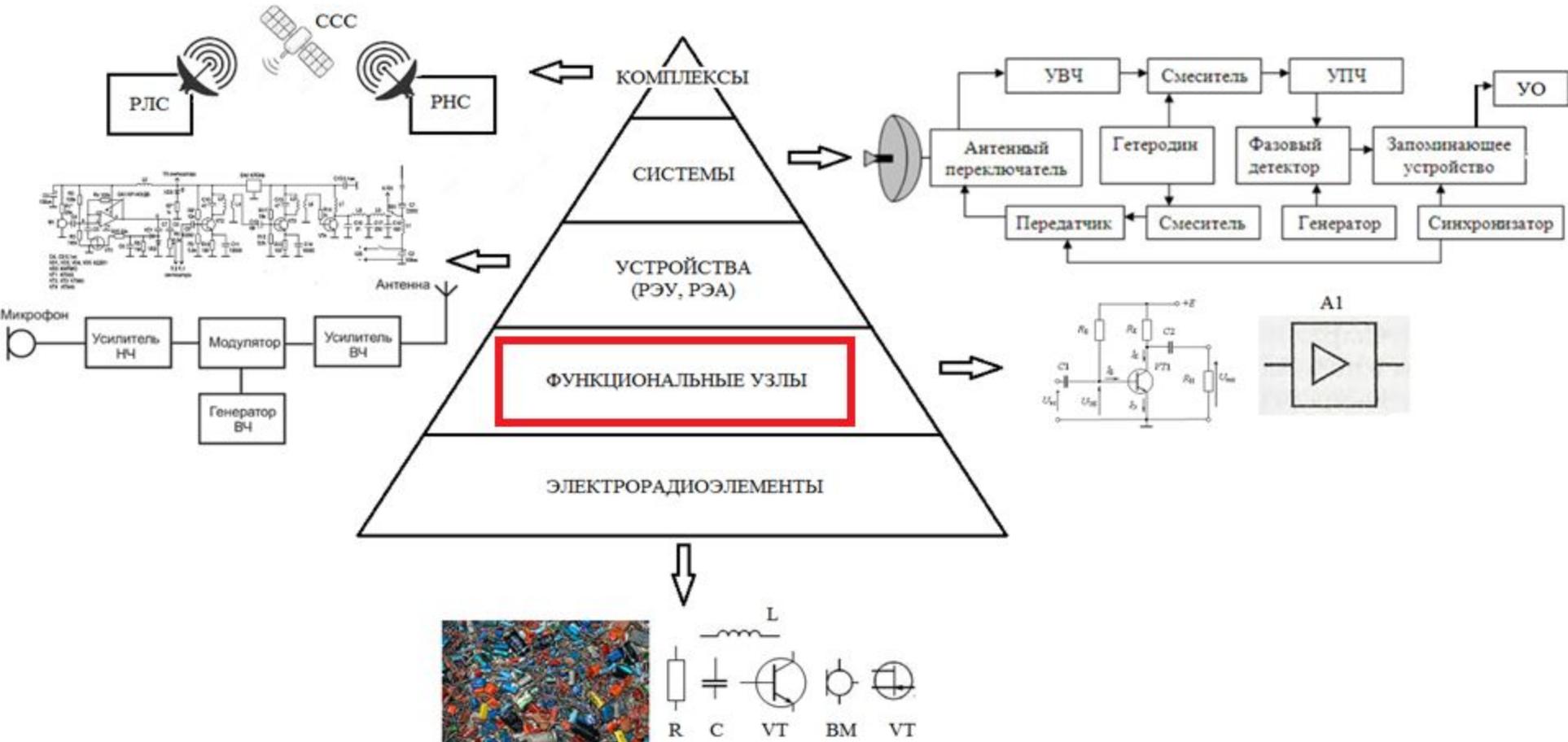
Кривин Николай Николаевич

(старший преподаватель КИПР, канд. техн. наук)

СХЕМО- И СИСТЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ



ИЕРАРХИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

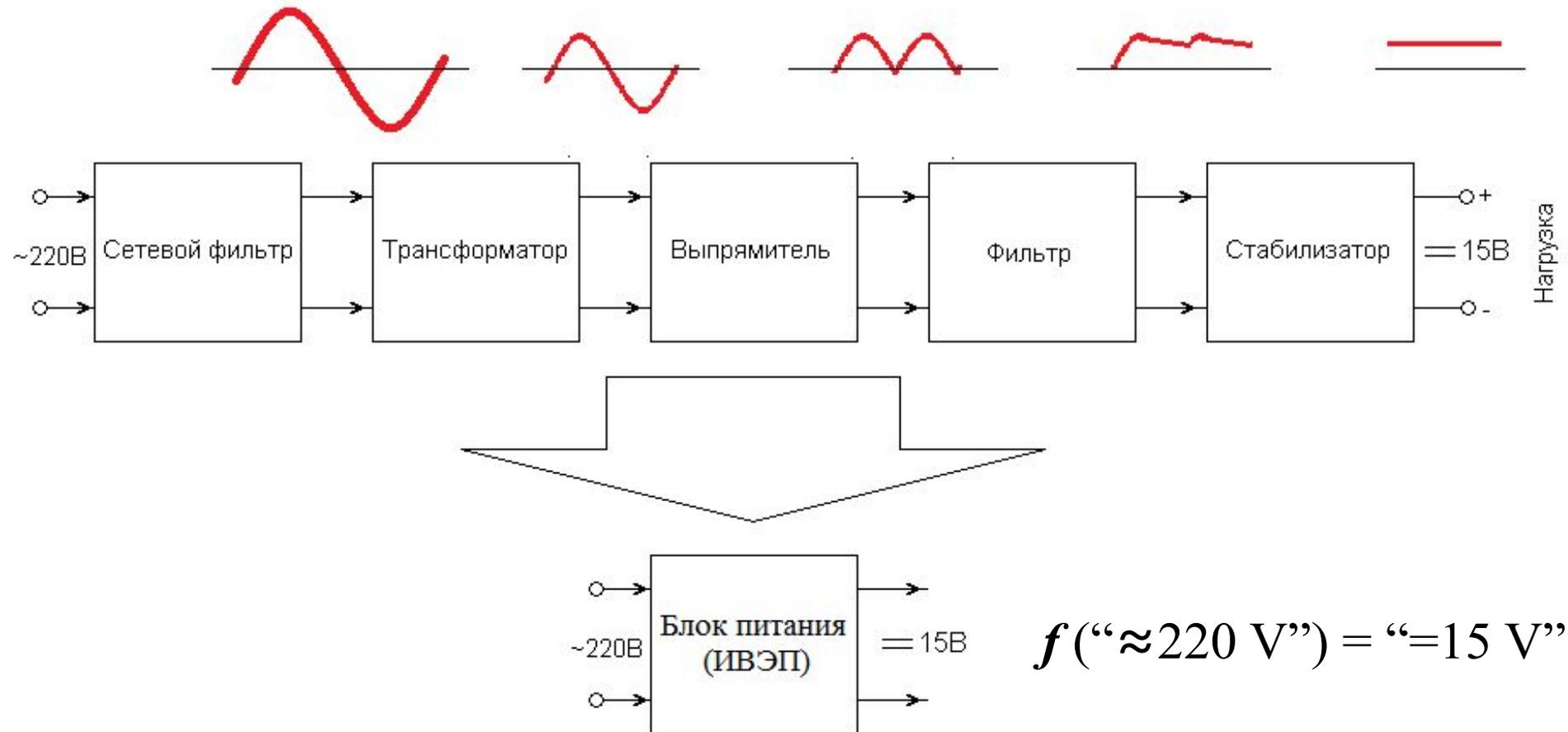


ДОСТАТОЧНО ПОЛНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУ

Функциональный узел – схема соединения ЭРЭ, инвариантная к способам схемотехнической реализации на основе разной ЭКБ, предназначенная для выполнения одной конкретной функции, сводимой к выражению однозначной математической зависимостью и не сводимой в явном виде к представлению совокупностью функций других функциональных узлов, если сложность данной схемы с системной точки зрения не порождает эффект эмерджентности, когда у схемы появляется новое свойство или новая функция.

II. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ

Функциональный узел – схема соединения ЭРЭ, инвариантная к способам схемотехнической реализации на основе разнотипной ЭКБ, предназначенная для выполнения одной конкретной функции, сводимой к выражению однозначной математической зависимости и не сводимой в явном виде к представлению совокупностью функций других функциональных узлов, если сложность данной схемы с системной точки зрения не порождает эффект эмерджентности, когда у схемы появляется новое свойство или новая функция.



ПРИМЕРЫ ФУ

УСИЛИТЕЛЬ

ГЕНЕРАТОР

ФИЛЬТР

СМЕСИТЕЛЬ

УМНОЖИТЕЛ
Ь ЧАСТОТЫ

ДЕЛИТЕЛЬ
ЧАСТОТЫ

МОДУЛЯТОР

ДЕМОДУЛЯТ
ОР

СТАБИЛИЗАТО
Р
НАПРЯЖЕНИЯ

СУММАТОР

ОГРАНИЧИТЕЛ
Ь УРОВНЯ

ЭЛЕКТРОННЫЙ
КЛЮЧ

ФАЗОВРАЩАТЕ
ЛЬ

АЦП

ЦАП

АЛГОРИТМ ИЗУЧЕНИЯ НОВОГО ДЛЯ ВАС ФУНКЦИОНАЛЬНОГО УЗЛА



Определение

Классификация

Назначение (функция) и области применения

Основные параметры и технические характеристики

Особенности схемотехнической реализации на разной
ЭКБ

Достоинства и недостатки ФУ, выполненного на разной
ЭКБ

УГО и ПО обозначения на структурных схемах

ИСТОЧНИКИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ФУ



**НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПО
ЭЛЕКТРОННЫМ ПРИБОРАМ**

**РУКОВОДСТВА ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ОТ ЗАВОДА-ПРОИЗВОДИТЕЛЯ (DATASHEET)**

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПРАВОЧНИКИ И ЭНЦИКЛОПЕДИИ ПО
СХЕМОТЕХНИКЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

ОТРАСЛЕВЫЕ ЖУРНАЛЫ

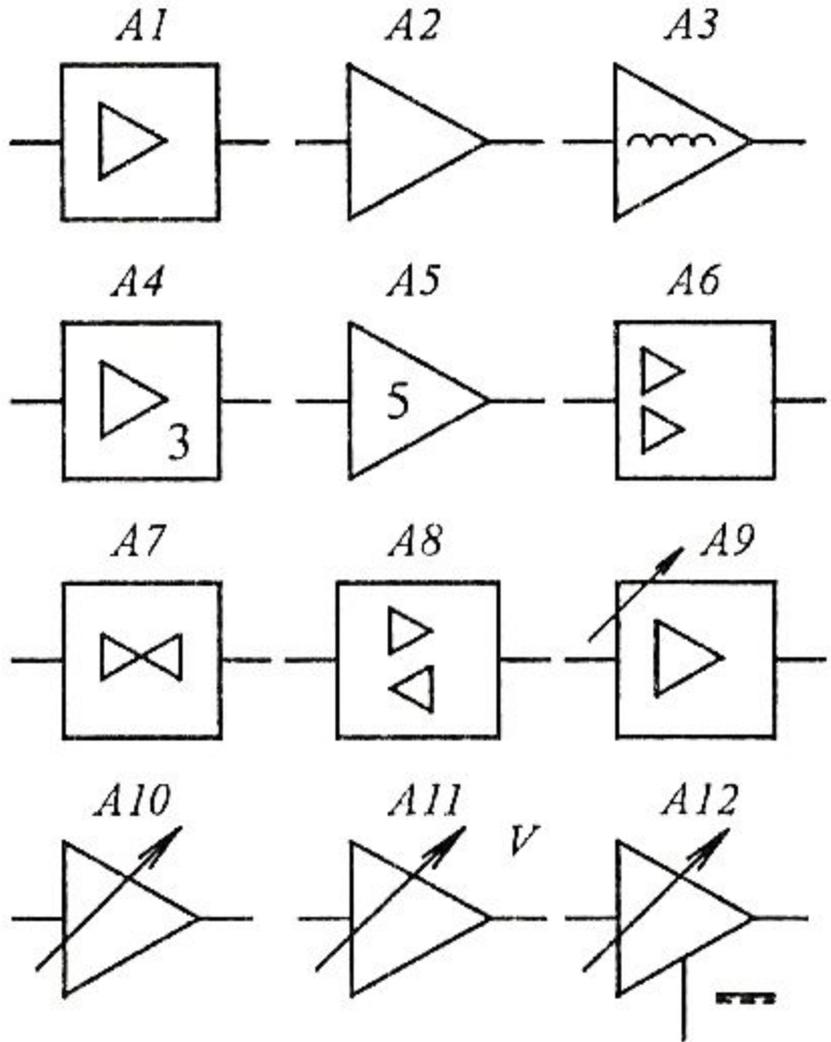
**СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПОДПИСНЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ
ИЗДАНИЯ**

Усилители. Общее определение

Функциональный узел – схема соединения ЭРЭ, инвариантная к способам схемотехнической реализации *на основе разной ЭКБ*, предназначенная для выполнения одной конкретной функции, сводимой к выражению однозначной математической зависимостью и не сводимой к представлению совокупностью функций других функциональных узлов...

Усилитель – схема соединения ЭРЭ, инвариантная к способам схемотехнической реализации *на основе разной ЭКБ (на транзисторах, на ОУ, на специальных ИМС)*, предназначенная для увеличения масштаба входных сигналов с сохранением их первоначальной формы.

УГО и ПО усилителей на структурных схемах устройств



ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Усилителями называют устройства, предназначенные для усиления входного электрического сигнала по напряжению, току или мощности. Структурная схема усилителя приведена на рис. 3.1.

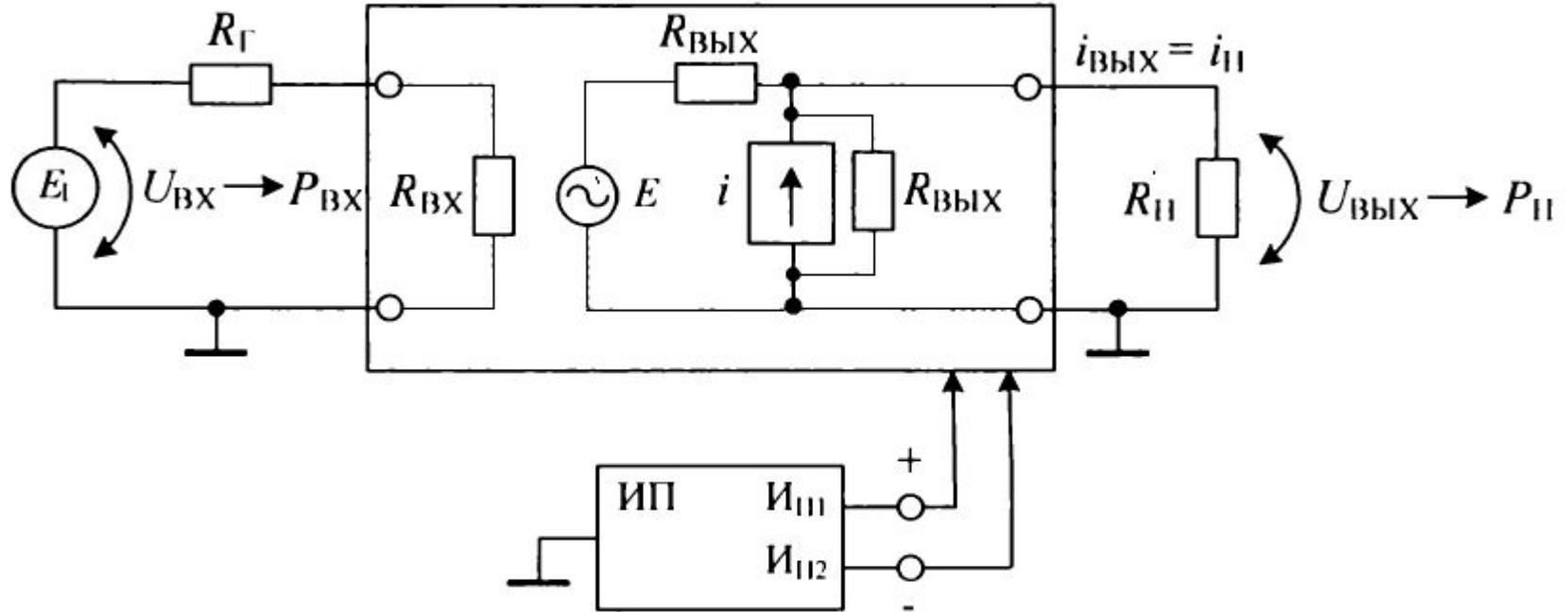


Рис. 3.1. Структурная схема усилителя:

E_{Γ} – управляющий источник или генератор сигналов; R_{Γ} – внутреннее сопротивление генератора сигналов; $P_{ВХ}$ – мощность усиливаемого сигнала; $R_{Н}$ – нагрузка усилителя; может также быть $R_{ВХ}$ другого усилителя или исполнительное устройство; $R_{ВЫХ}$ – выходное сопротивление усилителя

КЛАССИФИКАЦИЯ

I. По диапазону частот усиливаемых сигналов:

- Усилители звуковой частоты, предназначенные для усиления сигналов в полосе частот $f = 20 \dots 20\,000$ Гц.
- Усилители постоянного тока, предназначенные для усиления сигналов в полосе частот $f = 0 \dots 10$ МГц.
- Усилители высокой частоты, предназначенные для усиления сигналов в полосе частот $f = 100$ кГц \dots 100 МГц.

II. По соотношению между выходным сопротивлением усилителя $R_{\text{ВЫХ}}$ и нагрузкой $R_{\text{Н}}$:

- Усилители напряжения: $R_{\text{ВЫХ}} \ll R_{\text{Н}}$.

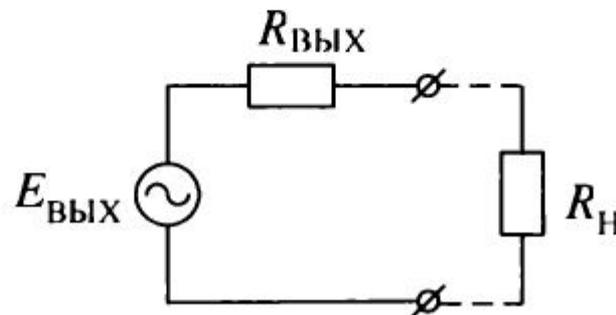


Рис. 3.2. Схема усилителя напряжения

Выходная цепь эквивалентна источнику напряжения или э. д. с (рис. 3.2).

КЛАССИФИКАЦИЯ

- Усилители тока: $R_{\text{ВЫХ}} \gg R_{\text{Н}}$.

Выходная цепь эквивалентна источнику тока (рис. 3.3).

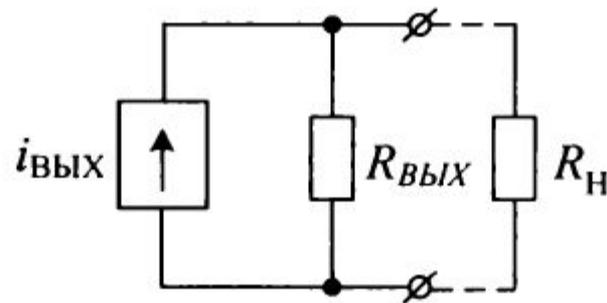


Рис. 3.3. Схема усилителя тока

- Усилители мощности: выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ}}$ согласовано с сопротивлением нагрузки $R_{\text{Н}}$, т. е. $R_{\text{ВЫХ}} \approx R_{\text{Н}}$. При этом мощность, отдаваемая усилителем в нагрузку будет максимальна.

КЛАССИФИКАЦИЯ

В общем случае усилитель может содержать несколько каскадов, соединенных друг с другом последовательно через цепи связи (ЦС). Такая многокаскадная структура усилителя приведена на рис. 3.4.

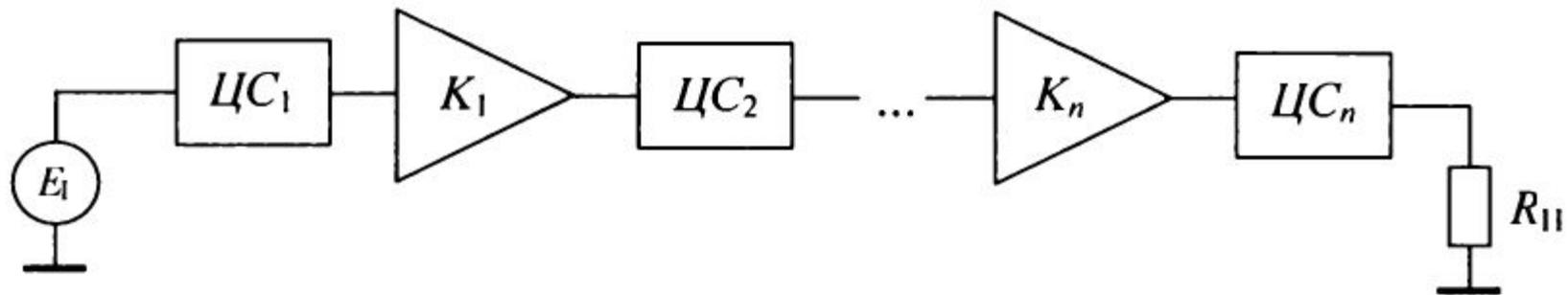


Рис. 3.4. Каскадная структура усилителя с цепями связи

КЛАССИФИКАЦИЯ

III. По типу цепей связи:

- С гальванической связью или связью по постоянному току (усилители постоянного тока, балансные усилители, дифференциальные усилители, операционные усилители).
- С емкостной связью, т. е. связью с помощью RC -цепей.
- С трансформаторной связью.

IV. По виду усиливаемых сигналов:

- Усилители непрерывных сигналов.
- Усилители видеосигналов или импульсных сигналов.

V. По назначению и месту в многокаскадных структурах:

- Предварительные.
- Промежуточные или буферные.
- Оконечные или выходные.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

3.2.1. КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ

- Коэффициент усиления по напряжению:

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}}; \quad (3.1)$$

в операторной форме $K_U(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)}$, где $p = \sigma + j\omega$ – оператор Лапласа;

- Коэффициент усиления по току:

$$\dot{K}_I = \frac{\dot{I}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{I}_{\text{ВХ}}}; \quad (3.2)$$

в операторной форме $K_I(p) = \frac{I_{\text{ВЫХ}}(p)}{I_{\text{ВХ}}(p)}$, где $p = \sigma + j\omega$ – оператор Лапласа;

при $\sigma = 0$ можно записать:

$$K_I(j\omega) = \frac{I_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{I_{\text{ВХ}}(j\omega)}.$$

- Коэффициент усиления по мощности:

$$\dot{K}_P = \frac{\dot{P}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{P}_{\text{ВХ}}}. \quad (3.3)$$

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

При проектировании усилительных устройств модуль коэффициента усиления измеряют в децибелах:

$$K_U[\text{дБ}] = 20 \lg \left| \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} \right| = 20 \lg |\dot{K}_U|; \quad (3.4)$$

$$K_I[\text{дБ}] = 20 \lg \left| \frac{\dot{I}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{I}_{\text{ВХ}}} \right| = 20 \lg |\dot{K}_I|; \quad (3.5)$$

$$K_P[\text{дБ}] = 10 \lg \left| \frac{\dot{P}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{P}_{\text{ВХ}}} \right| = 10 \lg |\dot{K}_P|. \quad (3.6)$$

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K = K_1 K_2 \dots K_n, \quad (3.7)$$

где n – число каскадов усилителя.

В децибелах коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен сумме коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K[\text{дБ}] = K_1[\text{дБ}] + K_2[\text{дБ}] + \dots + K_n[\text{дБ}]. \quad (3.8)$$

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

3.2.2. ВХОДНОЕ И ВЫХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСИЛИТЕЛЯ

Структура усилителя в виде четырехполюсника представлена на рис. 3.5.

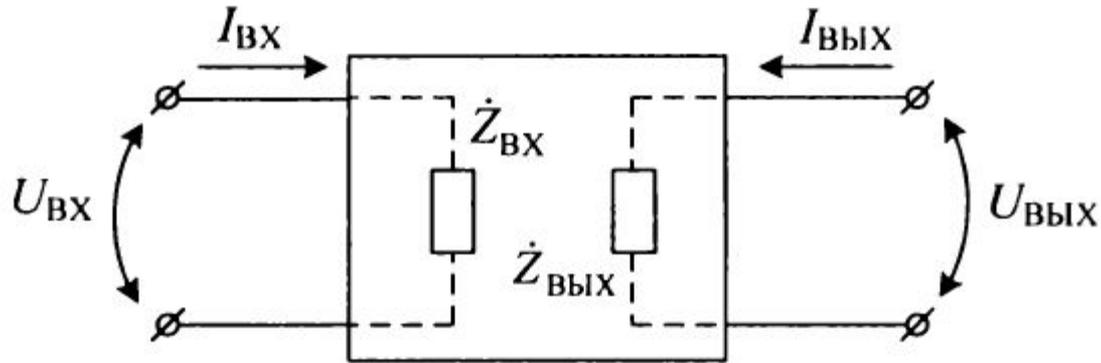


Рис. 3.5. Структура усилителя в виде четырехполюсника

На рис. 3.5 $\dot{Z}_{ВХ}$ и $\dot{Z}_{ВЫХ}$ – комплексные входные и выходные сопротивления усилителя, определяемые по следующим соотношениям:

$$\dot{Z}_{ВХ} = \left. \frac{\dot{U}_{ВХ}}{\dot{I}_{ВХ}} \right|_{\text{ПРИ К.З. НА ВЫХОДЕ}} ;$$

$$\dot{Z}_{ВЫХ} = \left. \frac{\dot{U}_{ВЫХ}}{\dot{I}_{ВЫХ}} \right|_{\text{ПРИ Х.Х. НА ВХОДЕ}} .$$

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

3.2.3. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ

Выделяют следующие частотные характеристики усилителя:

- АЧХ (амплитудно-частотная характеристика) – это зависимость модуля коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала;
- ФЧХ (фазочастотная характеристика) – это зависимость фазы комплексного коэффициента передачи от частоты или зависимость разности фаз выходного и входного сигналов от частоты.

Для коэффициента усиления по напряжению можно записать:

$$K_U(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)},$$

где $p = \sigma + j\omega$ – оператор Лапласа.

Положим $\sigma = 0$, тогда $p = j\omega$.

Комплексный коэффициент передачи усилителя определяется выражением:

$$K(j\omega) = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)}.$$

Модуль комплексного коэффициента передачи равен:

$$|K(j\omega)| = K(\omega).$$

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

Построение АЧХ усилителя выполняют из следующих расчетов:

$$K(j\omega) = A(\omega) + jB(\omega),$$

где $A(\omega)$ – действительная часть комплексного коэффициента передачи усилителя, а $B(\omega)$ – мнимая часть комплексного коэффициента передачи.

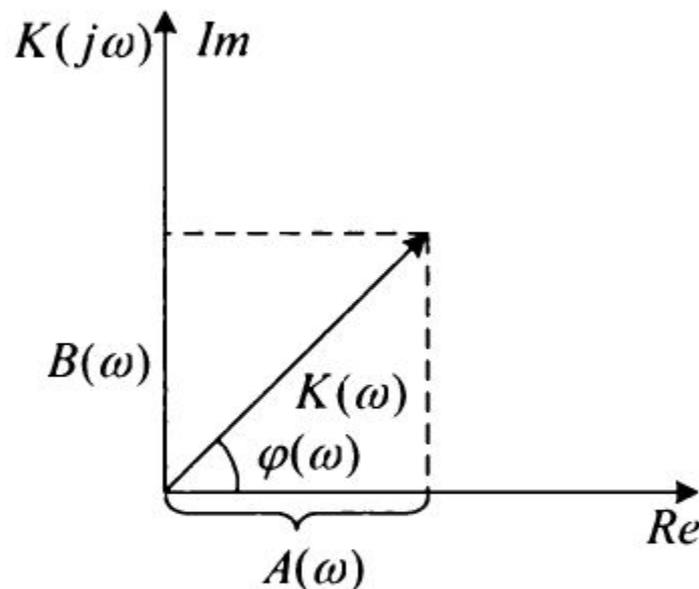


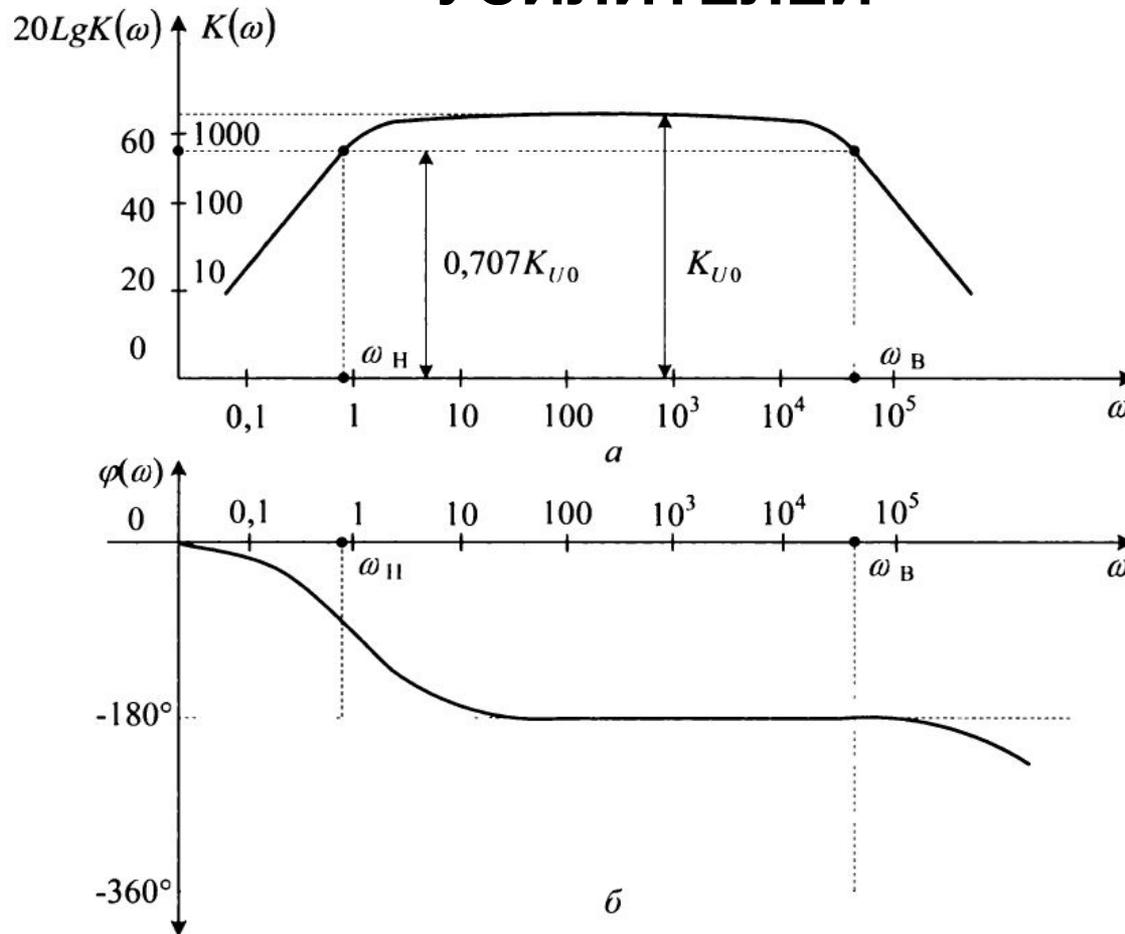
Рис. 3.6. Определение АЧХ и ФЧХ усилителя на комплексной плоскости

Тогда АЧХ и ФЧХ усилителя можно определить по следующим выражени-

ям:

$$K(\omega) = |K(j\omega)| = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)} - \text{АЧХ усилителя};$$
$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{B(\omega)}{A(\omega)} - \text{ФЧХ усилителя.}$$

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ



На рис. 3.7 ω_H и ω_B – нижняя и верхняя частоты полосы пропускания усилителя. ω_H и ω_B – это такие частоты, на которых

$$K(\omega_H) = K(\omega_B) = 0,707 K_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} K_0,$$

где K_0 – коэффициент передачи в полосе пропускания усилителя.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

3.2.4. НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ УСИЛИТЕЛЯ

Нелинейные искажения усилителя – это отклонение формы выходного сигнала от формы входного сигнала. Рассмотрим нелинейные искажения усилителя по схеме с ОЭ (рис. 3.8).

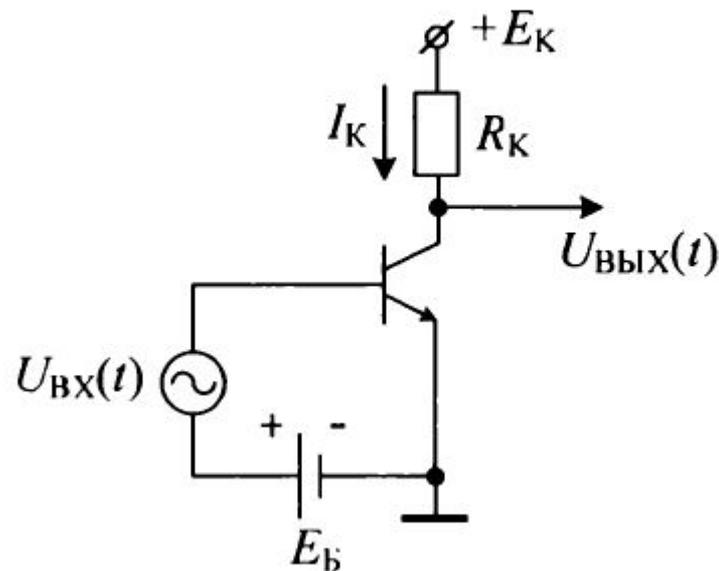


Рис. 3.8. Усилительный каскад по схеме с ОЭ

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

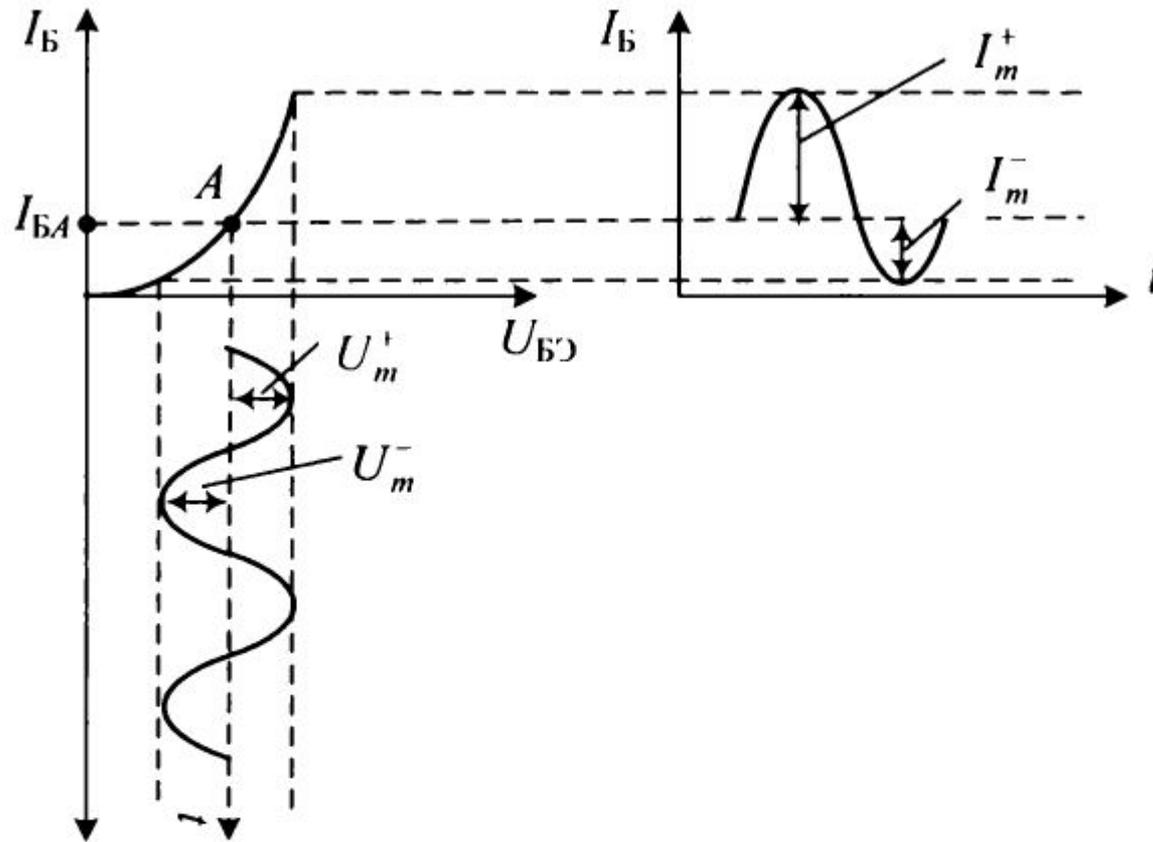


Рис. 3.9. Нелинейные искажения усилителя в схеме с ОЭ

Из графика видно, что при подаче на базу напряжения синусоидальной формы $U_{BX}(t) = U_m \sin \omega t$, ток $I_B(t)$ отличается от синусоиды, т.к. $I_m^+ \neq I_m^-$ из-за нелинейности входной характеристики транзистора.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

Нелинейные искажения приводят к тому, что в выходном сигнале появляются дополнительные составляющие с частотой кратной основной частоте усиливаемого сигнала. Например, если основная частота ω , то появляются частоты $2\omega, 3\omega, 4\omega, 5\omega$, и т. д.

Уровень нелинейных искажений оценивается коэффициентом нелинейных искажений γ и определяется по выражению:

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} P_i}{P_1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}{U_1^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2}{I_1^2}}, \quad (3.9)$$

где P_1, U_1 и I_1 – мощность, напряжение и ток выходного сигнала основной частоты; P_i, U_i и I_i – мощность, напряжение и ток i -ой гармоники выходного сигнала; i – номер гармоники выходного сигнала, кратной основной гармонике входного синусоидального сигнала.

Для высококачественных усилителей $\gamma = 0,01 \dots 0,2 \%$, а для усилителей среднего класса $\gamma = 5 \dots 8 \%$.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

УСИЛИТЕЛИ

3.2.5. ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН СИГНАЛА

Динамический диапазон сигнала (рис. 3.10) – это отношение вида:

$$D_c = \frac{U_{ВХ_{МАХ}} - U_{ВХ_{МИН}}}{U_{Ш}} \text{ или } D_c = \frac{U_{ВХ_{МАХ}}}{U_{ВХ_{МИН}}}, \quad (3.10)$$

в децибелах:

$$D_c[\text{дБ}] = 20 \lg \left[\frac{U_{ВХ_{МАХ}}}{U_{ВХ_{МИН}}} \right], \quad (3.11)$$

где $U_{Ш}$ – уровень шума в усилителе.

Качественные усилители имеют динамический диапазон сигнала $D_c[\text{дБ}] \geq 60 [\text{дБ}]$.

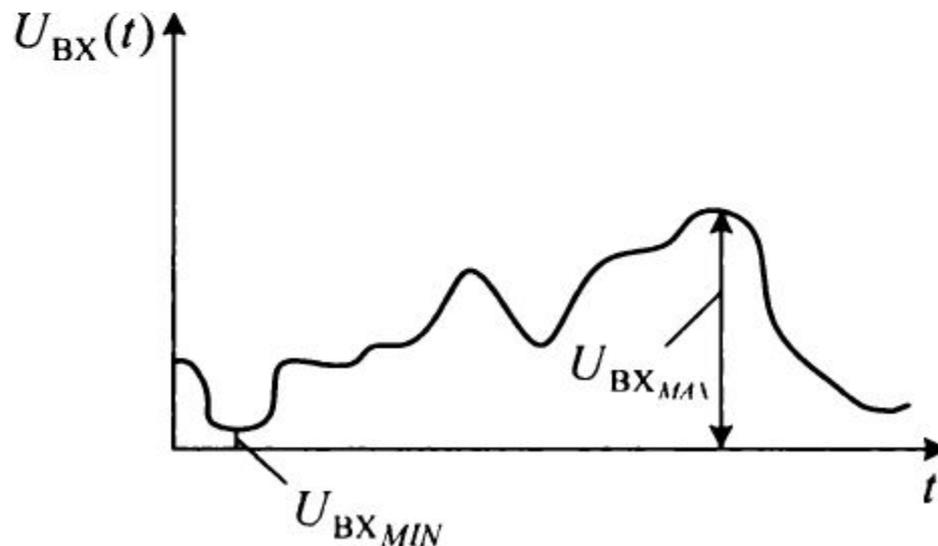


Рис. 3.10. Динамический диапазон сигнала

3.2.6. ИСКАЖЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Если на вход усилителя подать сигнал прямоугольной формы, то в усилителе возникают переходные процессы, которые приводят к искажению выходного сигнала. На рис. 3.11 показаны возможные искажения выходного сигнала.

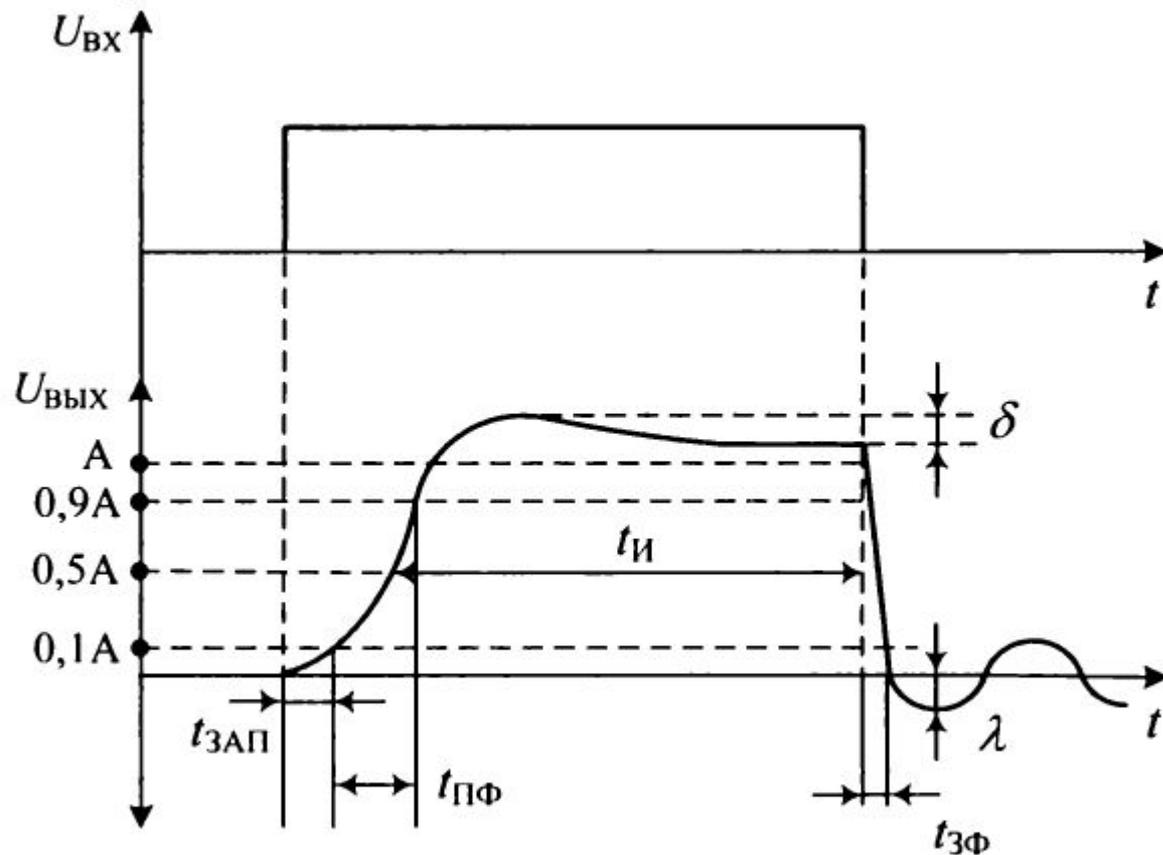


Рис. 3.11. Искажение импульсных сигналов:

δ — величина перерегулирования; $t_{зап}$ — время запаздывания;
 $t_{пф}$ и $t_{зф}$ — длительность переднего и заднего фронтов; λ — отрицательный выброс;
 $t_{и}$ — реальная длительность импульса

3.3. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ НА ТРАНЗИСТОРАХ

В зависимости от того, какой электрод транзистора является общим по отношению к входному и выходному сигналам, различают следующие схемы усилительных каскадов: с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК). Схемы усилительных каскадов приведены на рис. 3.12 – 3.15.

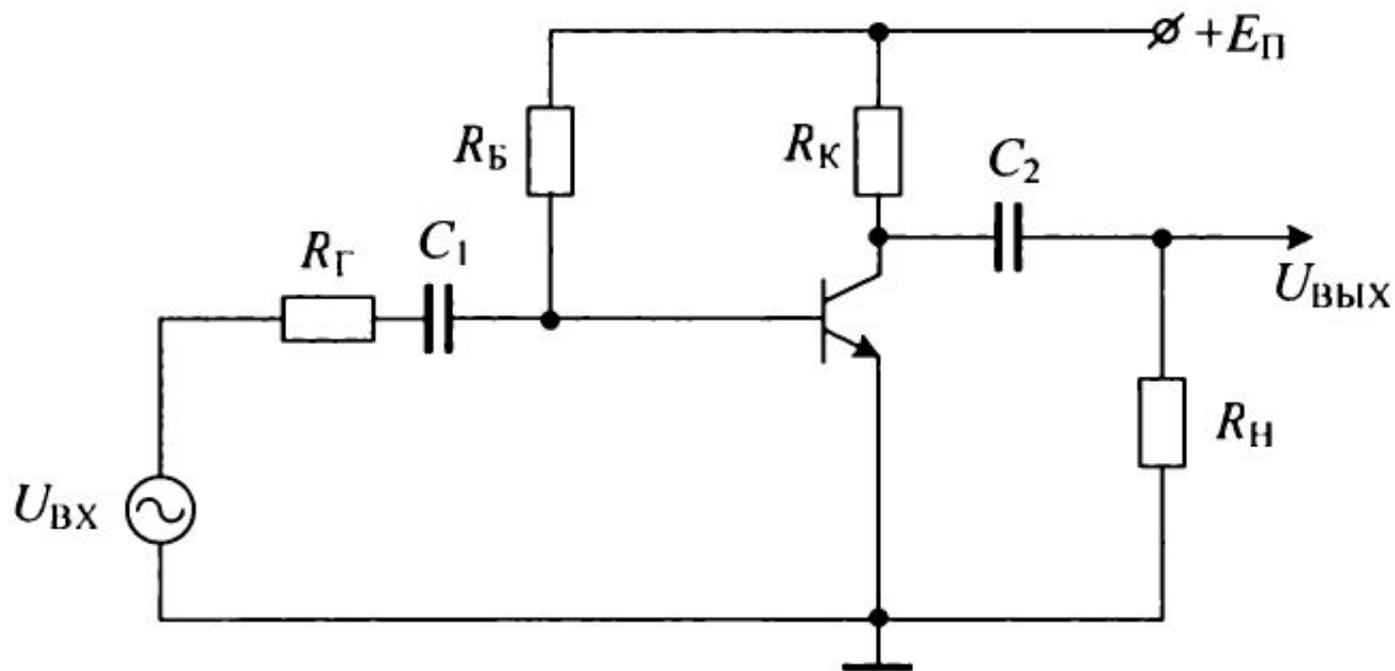


Рис. 3.12. Усилительный каскад с ОЭ

3.3. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ НА ТРАНЗИСТОРАХ

В зависимости от того, какой электрод транзистора является общим по отношению к входному и выходному сигналам, различают следующие схемы усилительных каскадов: с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК). Схемы усилительных каскадов приведены на рис. 3.12 – 3.15.

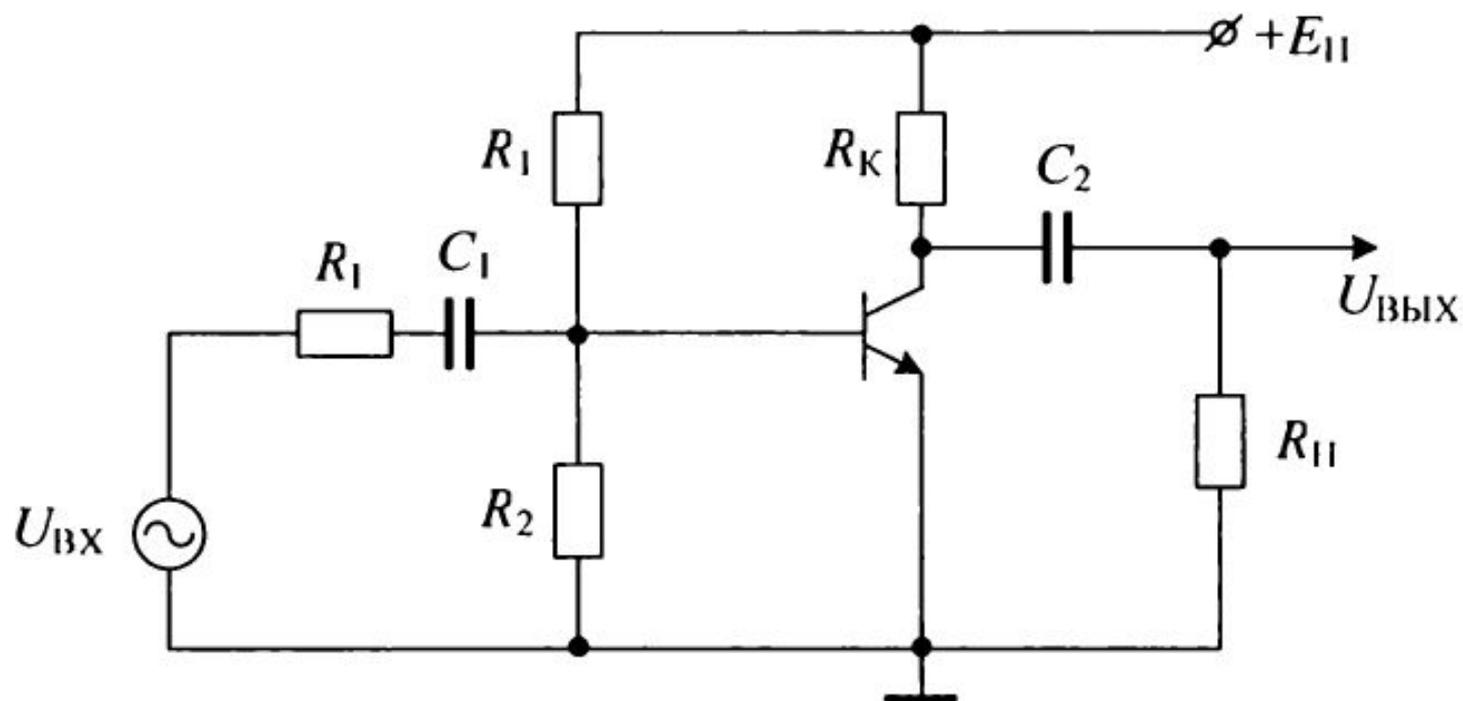


Рис. 3.13. Усилительный каскад с ОЭ и резистивным делителем

3.3. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ НА ТРАНЗИСТОРАХ

В зависимости от того, какой электрод транзистора является общим по отношению к входному и выходному сигналам, различают следующие схемы усилительных каскадов: с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК). Схемы усилительных каскадов приведены на рис. 3.12 – 3.15.

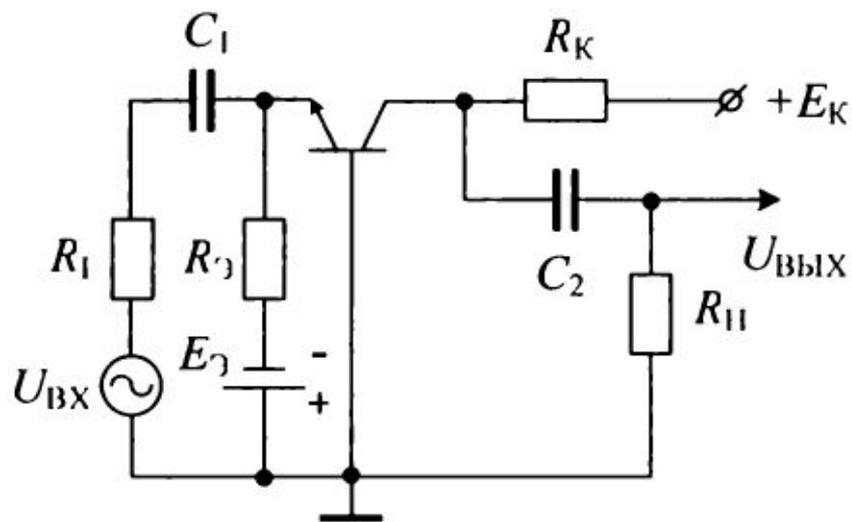


Рис. 3.14. Усилительный каскад с ОБ

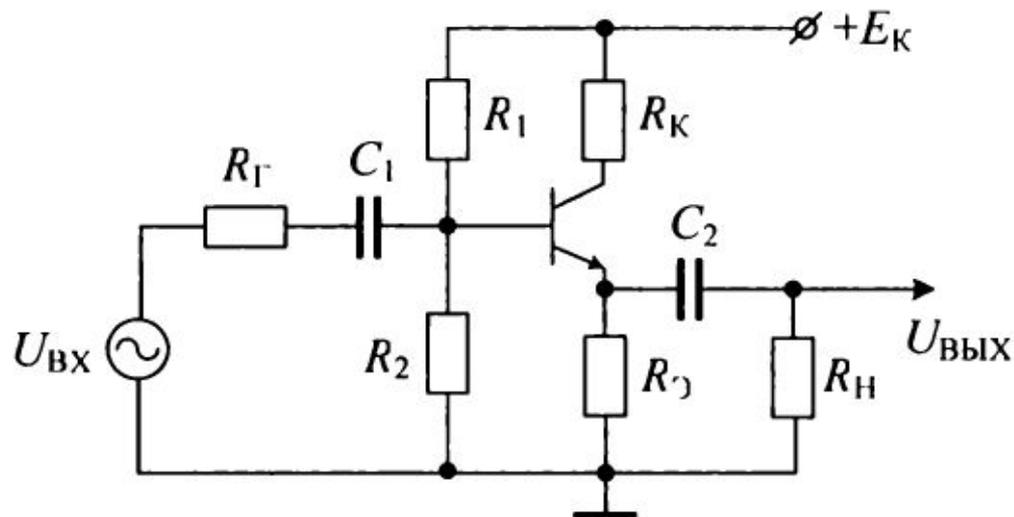


Рис. 3.15. Усилительный каскад с ОК

Сравнительные характеристики схем ОЭ, ОБ, ОК

| Схема | Кэф. усиления по напряжению | Кэф. усиления по току | Входное сопр. | Выходное сопр. | Предельная частота |
|-------|-----------------------------|-----------------------|---------------|----------------|--------------------|
| ОЭ | Выс. | Выс. | Выс. | Выс. | Низк. |
| ОБ | Выс. | Низк. | Низк. | Выс. | Выс. |
| ОК | Низк. | Выс. | Выс. | Низк. | Низк. |

3.3.2. КЛАССЫ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ

В зависимости от параметров рабочей точки и значения $U_{ВХ}$, ток коллектора I_K может протекать либо в течение всего периода изменения входного сигнала $U_{ВХ}$, либо в течении только части периода.

Соответственно этому различают 5 разновидностей режима работы усилителей или 5 классов: A , AB , B , C и D . Положение рабочей точки для различных классов усилительного каскада с ОЭ показано на рис. 3.18.

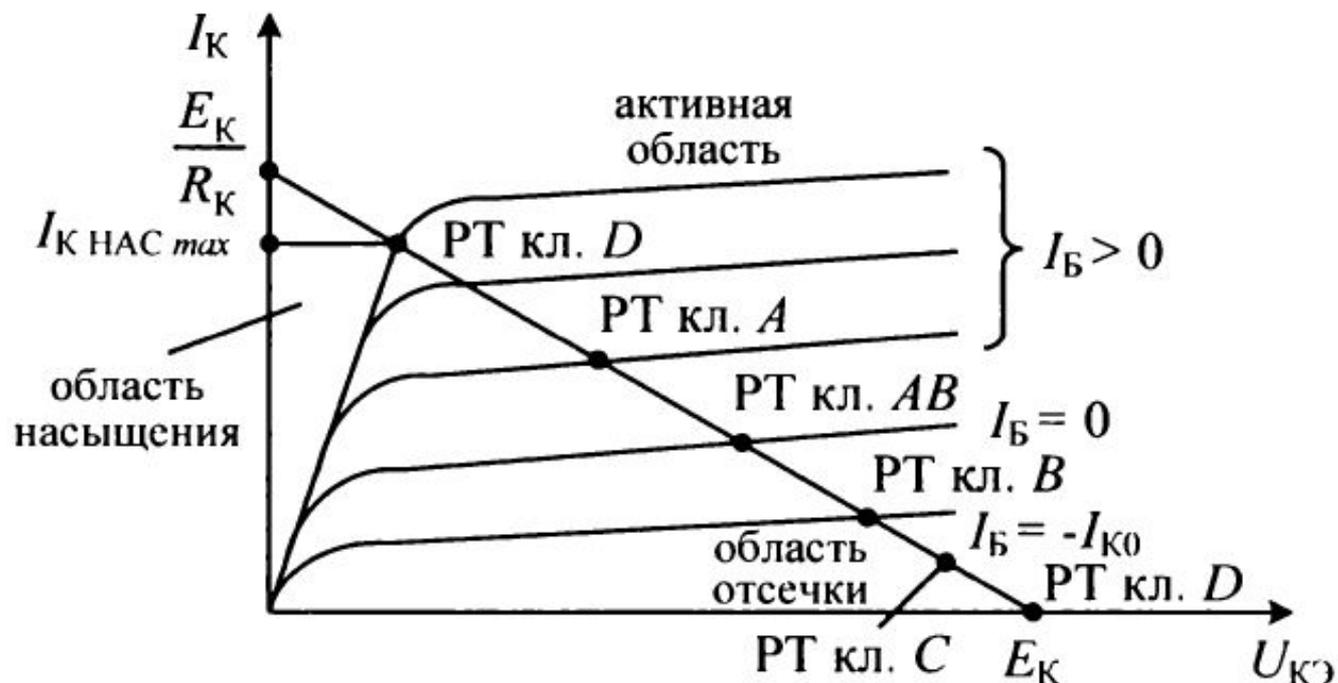


Рис. 3.18. Положение рабочей точки для различных классов

3.3.2.1. Класс А

В классе А начальное положение рабочей точки на нагрузочной прямой и амплитуда входного сигнала (или управляющего тока I_B) выбираются так, чтобы текущее положение рабочей точки не выходило за пределы нагрузочной прямой, в которых изменения I_K прямо пропорциональны изменениям I_B или чтобы текущее положение рабочей точки не выходило за пределы активной области при изменении тока I_B . Положение рабочей точки класса А на ВАХ усилительного каскада с ОЭ показано на рис. 3.19.

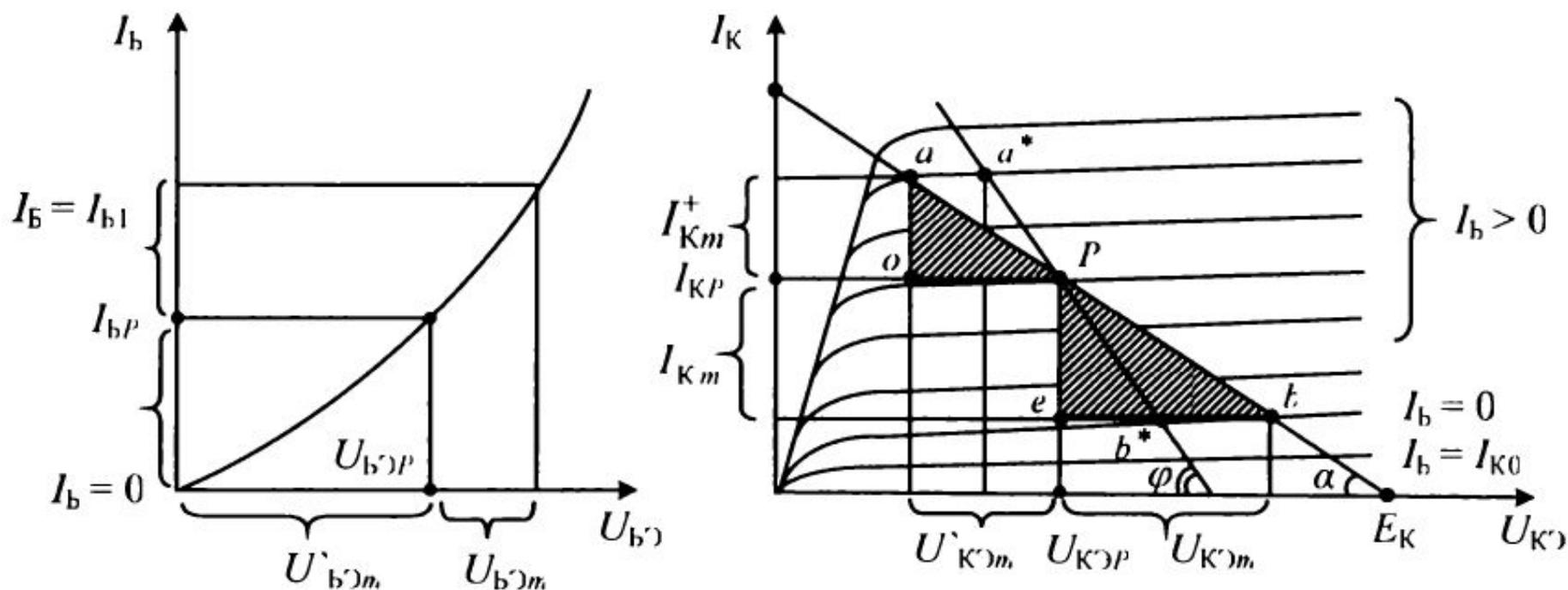


Рис. 3.19. Положение рабочей точки в классе А

К достоинству усилительного каскада в классе A относят его минимальные нелинейные искажения.

Недостатком усилительного каскада в классе A является низкий коэффициент полезного действия η .

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{СР}}} = \frac{1}{2} \frac{I_{\text{КМ}} U_{\text{КЭМ}}}{I_{\text{КР}} U_{\text{КЭР}}}, \quad (3.12)$$

где $P_{\text{ВЫХ}}$ – мощность, отдаваемая усилителями в нагрузку, $P_{\text{СР}}$ – средняя мощность, выделяемая на коллекторе транзистора, $I_{\text{КМ}} \leq I_{\text{КР}}$; $U_{\text{КЭМ}} \leq U_{\text{КЭР}}$.

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{2} I_{\text{КМ}} U_{\text{КЭМ}} = \frac{1}{2} I'_{\text{КМ}} U'_{\text{КЭМ}} = \text{площади } \Delta aOP \approx \text{площади } \Delta beP.$$

Поэтому, коэффициент полезного действия η усилительного каскада $\eta \leq 50\%$ или $\eta \leq 0,5$.

При подключении нагрузки нагрузочная прямая пойдет под углом:

$$\varphi = \text{arcctg } R_{\text{К}} \parallel R_{\text{Н}} = \text{arcctg } \frac{R_{\text{К}} R_{\text{Н}}}{R_{\text{К}} + R_{\text{Н}}}.$$

Тогда рабочим участком станет участок a^*b^* и, соответственно, уменьшится амплитуда выходного сигнала ($U_{\text{КМ}}, U'_{\text{КМ}}$) и к.п.д. $\eta^* < \eta$.

3.3.2.2. Класс *B*

Классу *B* соответствует начальное положение рабочей точки в области токов I_K , близких к I_{K0} . Рассмотрим положение рабочей точки класса *B* на примере транзистора в схеме с ОБ (рис. 3.20).

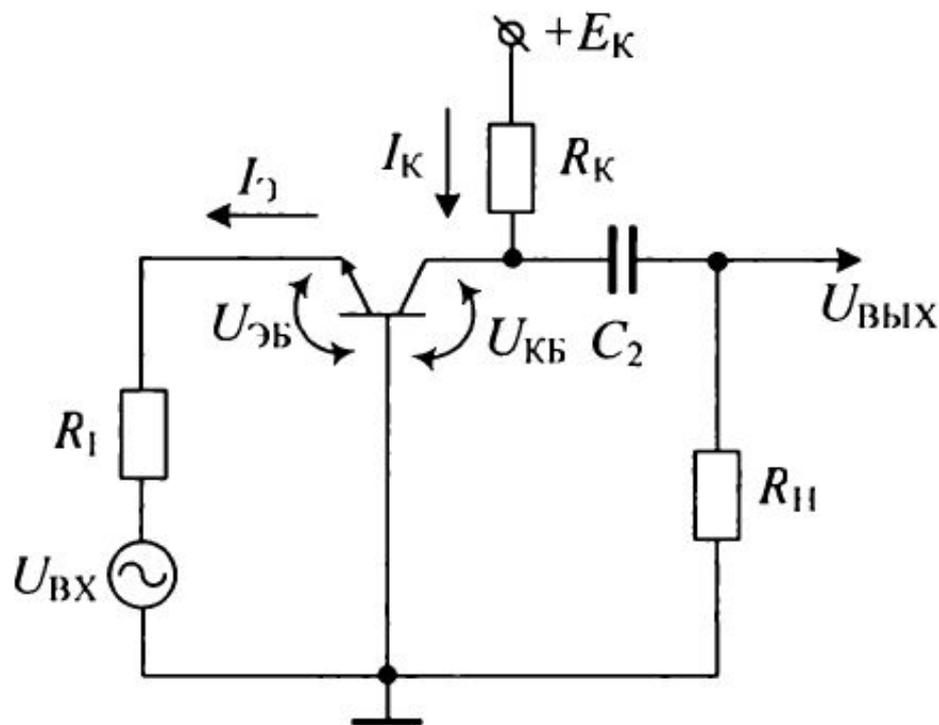


Рис. 3.20. Усилительный каскад по схеме с ОБ

Усилительный каскад в схеме с ОБ не инвертирует входной сигнал. В классе B транзистор открыт лишь в течение половины периода входного сигнала, т. е., работает с $\pi/2$ отсечкой тока (угол отсечки $Q = 90^\circ$).

Положение рабочей точки усилителя класса B на входной характеристике показано на рис. 3.21. Положение рабочей точки усилителя класса B на выходной характеристике показано на рис. 3.22.

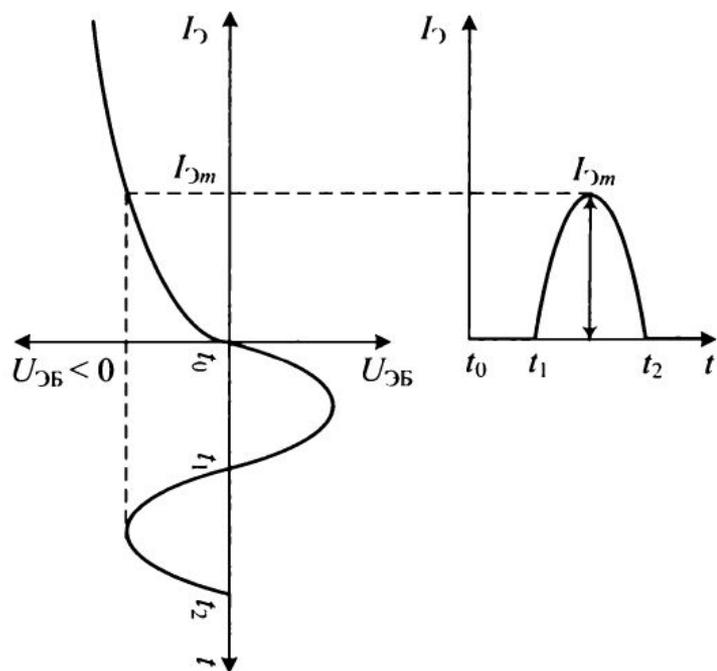


Рис. 3.21. Положение рабочей точки усилителя класса B на входной характеристике

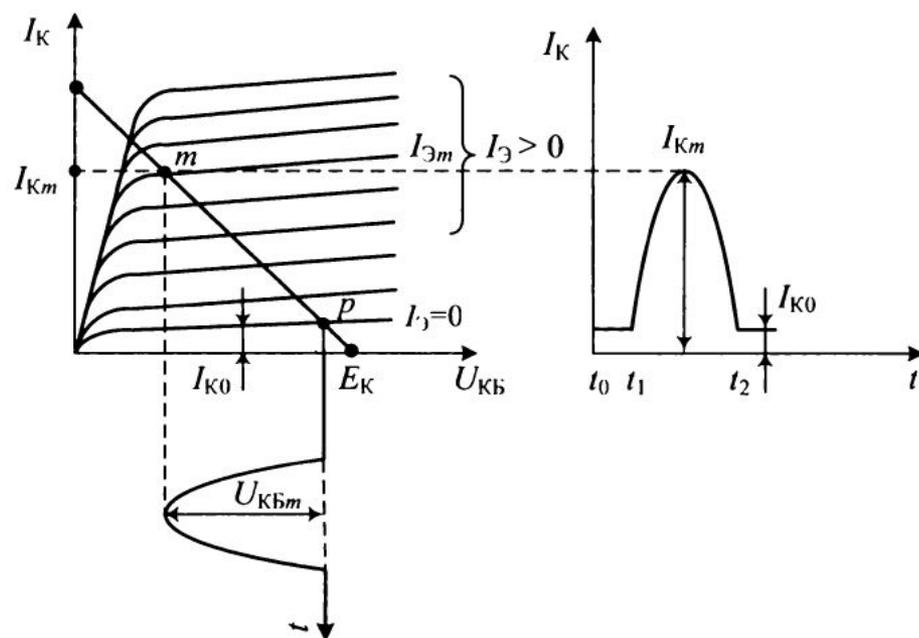
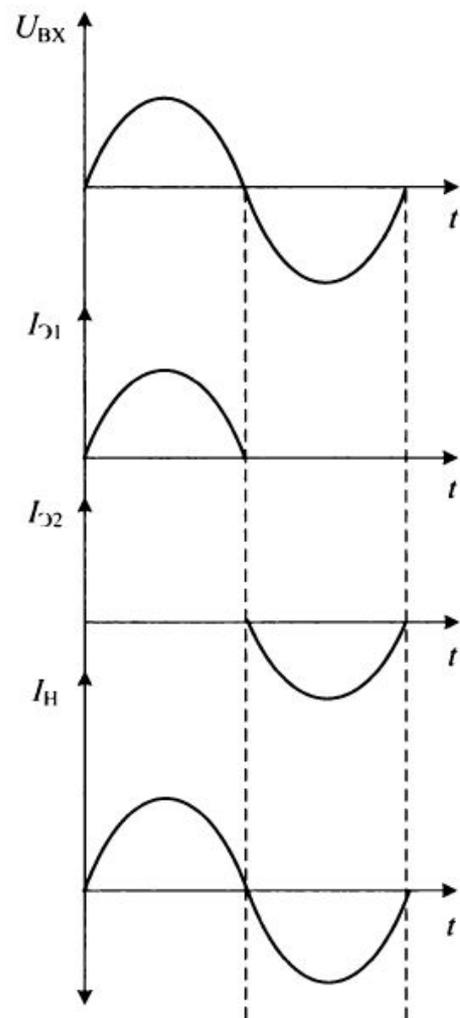


Рис. 3.22. Положение рабочей точки усилителя класса B на выходной характеристике

Недостатком усилительного каскада в классе B является большой уровень нелинейных искажений, поэтому усилитель в классе B применяется лишь в двухтактных схемах, например в двухтактных выходных каскадах (рис. 3.23).



Достоинством двухтактных выходных каскадов является $\eta \approx 70\%$.

n-p-n и p-n-p транзисторы должны образовывать комплементарную пару!!!

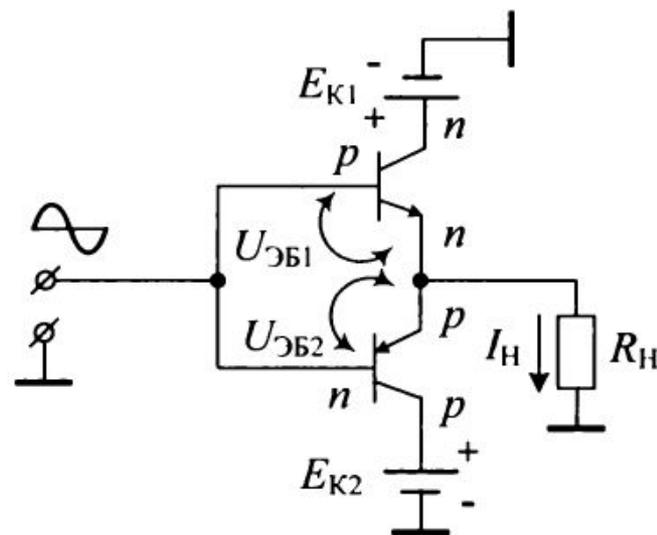


Рис. 3.23. Схема двухтактного выходного каскада

Рис. 3.24. Временные диаграммы двухтактного выходного каскада

3.3.2.3. Класс АВ

Класс *AB* занимает промежуточное значение между классами *A* и *B*. Класс *AB* более экономичен, чем класс *A* и характеризуется меньшими нелинейными искажениями, чем класс *B*.

Положение рабочей точки класса *AB* усилительного каскада с ОЭ показано на рис. 3.25.

Возможны различные зависимости выходного тока $I_K(t)$ в зависимости от выбора (положения) рабочей точки (рис. 3.26, 3.27).

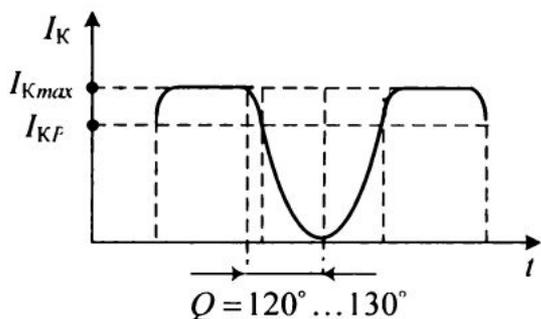


Рис. 3.26. Временная диаграмма рабочей точки p_1 класса *AB*

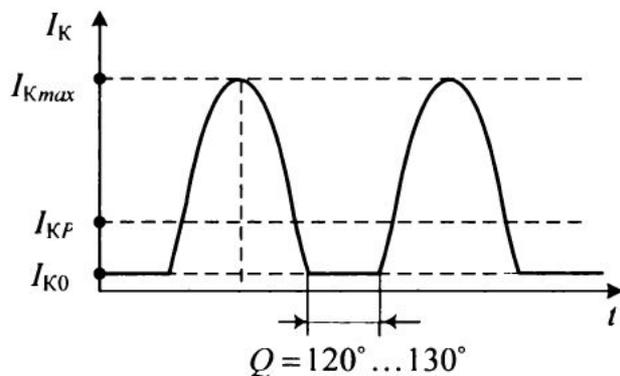


Рис. 3.27. Временная диаграмма рабочей точки p_2 класса *AB*

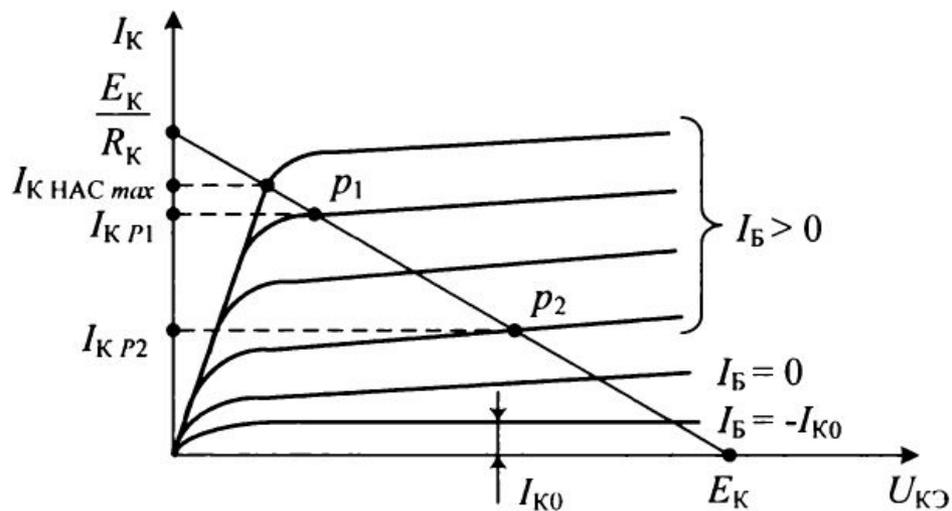


Рис. 3.25. Положение рабочей точки класса *AB*

3.3.2.4. Класс C

В классе C начальное смещение соответствует режиму отсечки. В отсутствие сигнала усилитель класса C закрыт и почти не потребляет тока и начинает открываться лишь после того, как входной сигнал превысит пороговое значение. Этот режим применяется в нелинейных усилителях-формирователях сигналов.

3.3.2.5. Класс D

Транзистор в классе D работает в ключевом режиме. Это означает, что транзистор в процессе работы периодически переходит из открытого состояния (режима насыщения) в закрытое состояние (режим отсечки) и наоборот.

Схема транзисторного усилителя в ключевом режиме приведена на рис. 3.28.

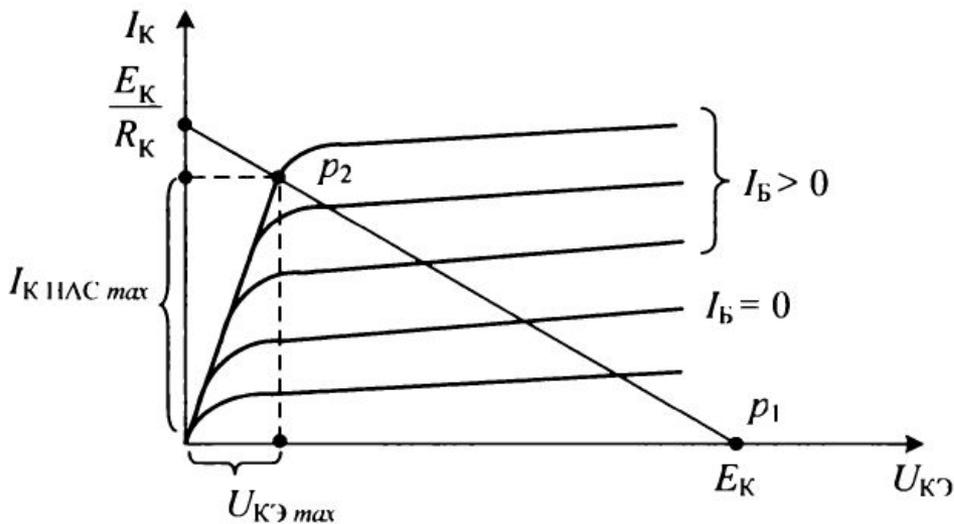
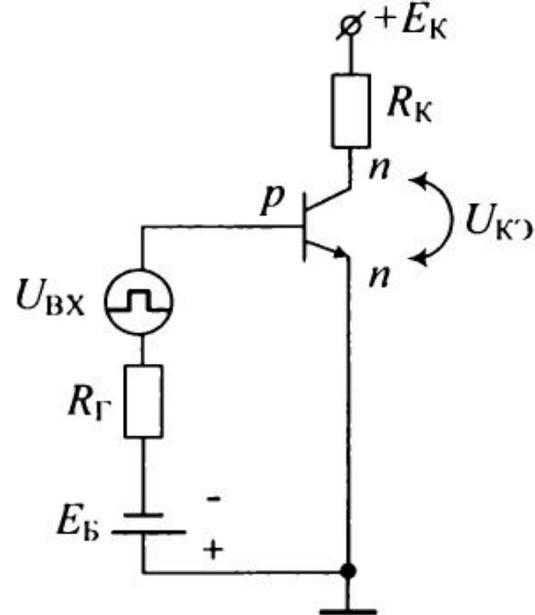


Рис. 3.29. Положение рабочих точек класса D

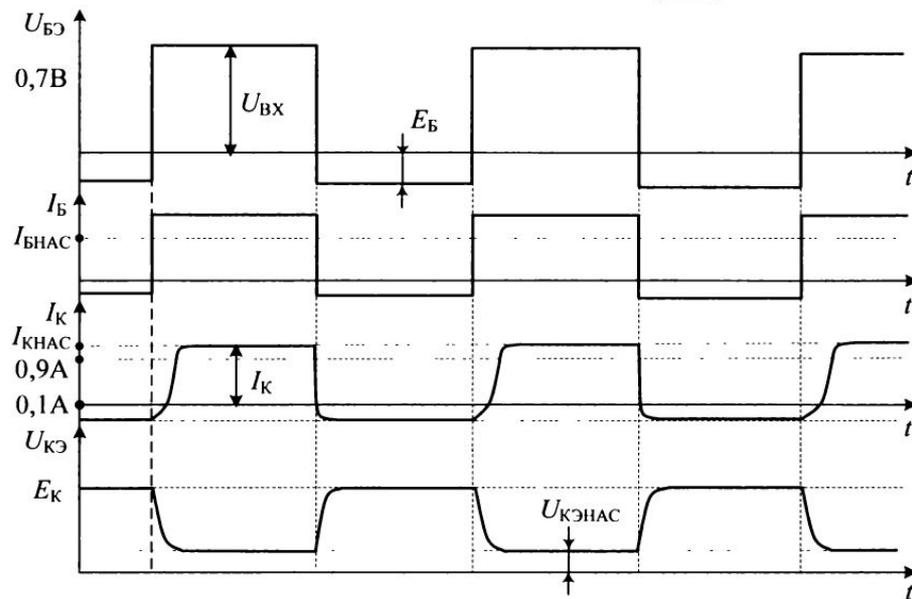


Рис. 3.30. Временные диаграммы усилителя класса D

3.6. СТАБИЛЬНОСТЬ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

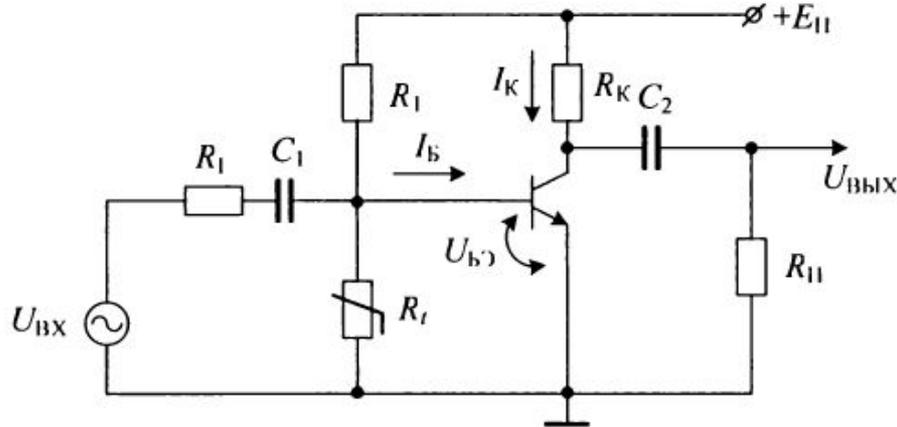
Всякое смещение рабочей точки характеризуется приращениями ΔI_{Kp} и $\Delta U_{Kcp} = \Delta I_{Kp} R_K$ и вызывает изменение дифференциальных параметров транзистора, поскольку они зависят от режима его работы.

Причинами нестабильности рабочей точки усилительного каскада являются:

- технологические разбросы параметров транзисторов при изготовлении;
- временные изменения параметров (старение);
- температурная зависимость параметров транзистора.

3.7. ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

3.7.1. ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОРЕЗИСТОРА



Вывод. Включение в схему сопротивления R_3 повышает температурную стабильность усилительного каскада с ОЭ. Сопротивление R_3 является сопротивлением последовательной отрицательной обратной связи по току (ООС). Для качественных усилительных каскадов $N_3 = 3 \dots 5$.

3.7.2. ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ ДИОДА

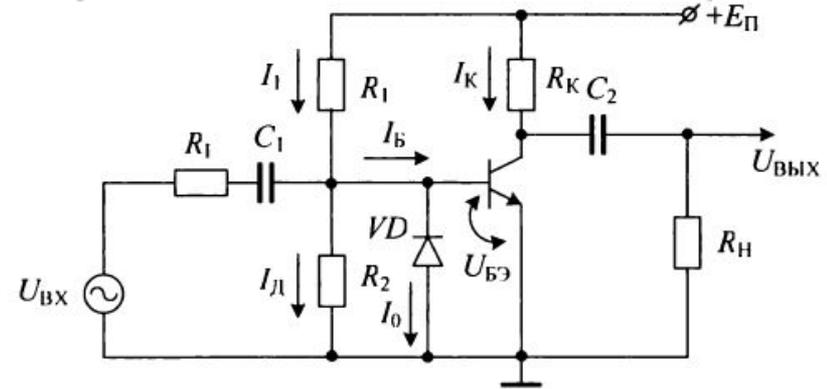


Рис. 3.43. Схема усилительного каскада при термостабилизации с помощью диода

3.7.3. ЭМИТТЕРНАЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ

Схема усилительного каскада с эмиттерной термостабилизацией рабочей точки приведена на рис. 3.44.

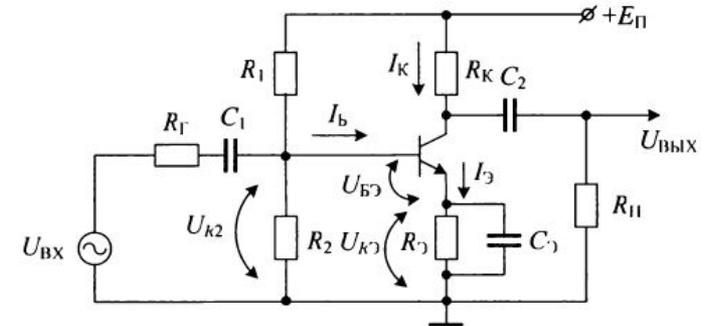


Рис. 3.44. Схема усилительного каскада с эмиттерной термостабилизацией

Замечания по выбору сопротивления R_3 , т. е. по выбору коэффициента N_3 .

• Для хорошей термостабилизации усилительного каскада сопротивление R_3 нужно выбрать как можно больше, а сопротивление R_2 – меньше. Однако необходимо, чтобы $R_2 > R_{BX\text{ТРОЭ}}$, т. к. в противном случае это приводит к шунтированию входного сопротивления транзистора.

• Включение сопротивления R_3 в цепь эмиттера приводит к уменьшению коэффициента усиления по напряжению схемы с ОЭ:

$$K_{U_{OЭ}} = \frac{\beta R_K}{R_{BX_{OЭ}}} = \frac{\beta R_K}{r_b + (1 + \beta)r_3} \approx \frac{R_K}{r_3}. \quad (3.54)$$

ГЛАВА 4. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В УСИЛИТЕЛЯХ

Обратной связью (ОС) называется такая электрическая связь между каскадами усилителя, при которой часть энергии усиленного сигнала с выхода усилителя подается обратно на его вход.

4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОС

По способу подключения цепи ОС к выходу усилителя:

- по напряжению;
- по току.

По способу подключения цепи ОС к входу усилителя:

- последовательная;
- параллельная.

Рассмотрим на примерах виды обратных связей.

На рис. 4.1 показана схема последовательной ОС по напряжению, где $\dot{U}_\beta = f(\dot{U}_{\text{ВЫХ}})$ – напряжение ОС, а $\dot{\beta} = \dot{U}_\beta / \dot{U}_{\text{ВЫХ}}$ – коэффициент передачи цепи ОС.

На рис. 4.2 показана схема последовательной ОС по току, где $\dot{U}_\beta = f(\dot{I}_{\text{II}})$ – напряжение ОС по току, а $\dot{\beta} = \dot{U}_\beta / \dot{U}_{\text{ВЫХ}}$ – коэффициент передачи цепи ОС.

На рис. 4.3 показана схема параллельной ОС по напряжению, где $\dot{U}_\beta = f(\dot{U}_{\text{ВЫХ}})$ – напряжение ОС, а $\dot{\beta} = \dot{U}_\beta / \dot{U}_{\text{ВЫХ}}$ – коэффициент передачи цепи ОС.

На рис. 4.4 показана схема параллельной ОС по току, где $\dot{U}_\beta = f(\dot{I}_{\text{II}})$ – напряжение ОС по току, а $\dot{\beta} = \dot{U}_\beta / \dot{U}_{\text{ВЫХ}}$ – коэффициент передачи цепи ОС.

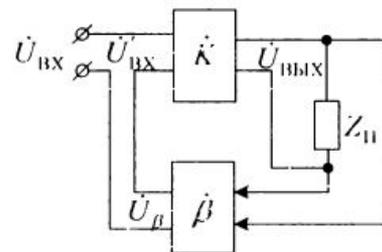


Рис. 4.1. Последовательная ОС по напряжению

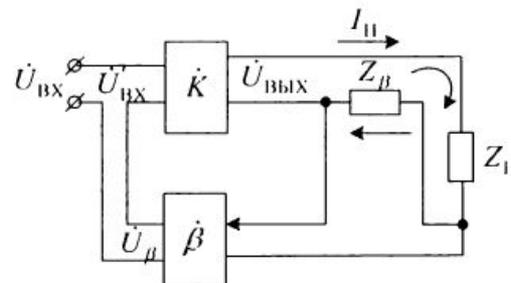


Рис. 4.2. Последовательная ОС по току

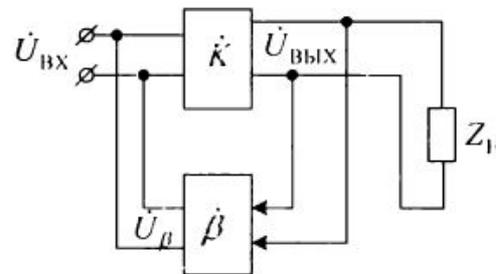


Рис. 4.3. Параллельная ОС по напряжению

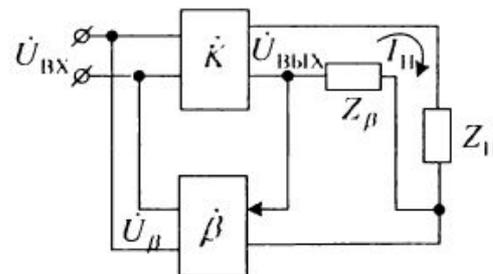


Рис. 4.4. Параллельная ОС по току

Особенности ОС:

- ОС по напряжению характеризуется тем, что сигнал ОС пропорционален выходному напряжению;
- ОС по току отличается тем, что сигнал ОС пропорционален выходному току;
- для последовательной ОС характерно сложение напряжений на входе;
- для параллельной ОС характерно сложение токов на входе.

Обратную связь также классифицируют по виду знака. Поэтому различают:

- положительную ОС (ПОС);
- отрицательную ОС (ООС).

Временные диаграммы напряжений для ПОС и ООС приведены на рис. 4.5.

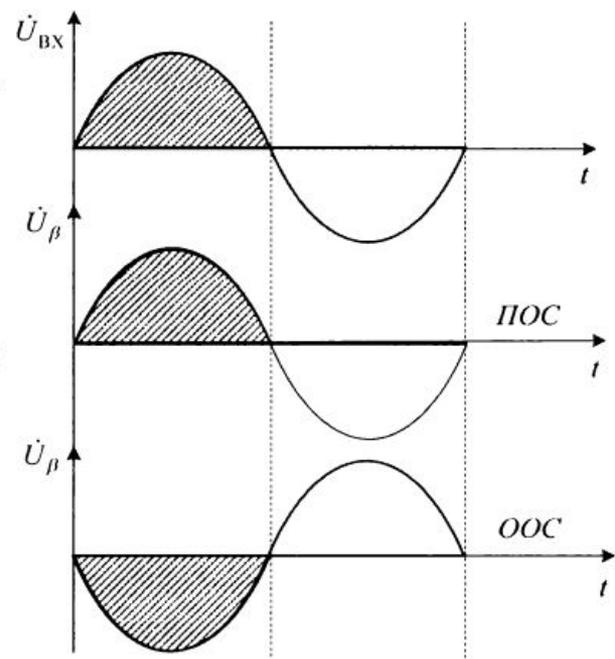


Рис. 4.5. Виды ОС по знаку

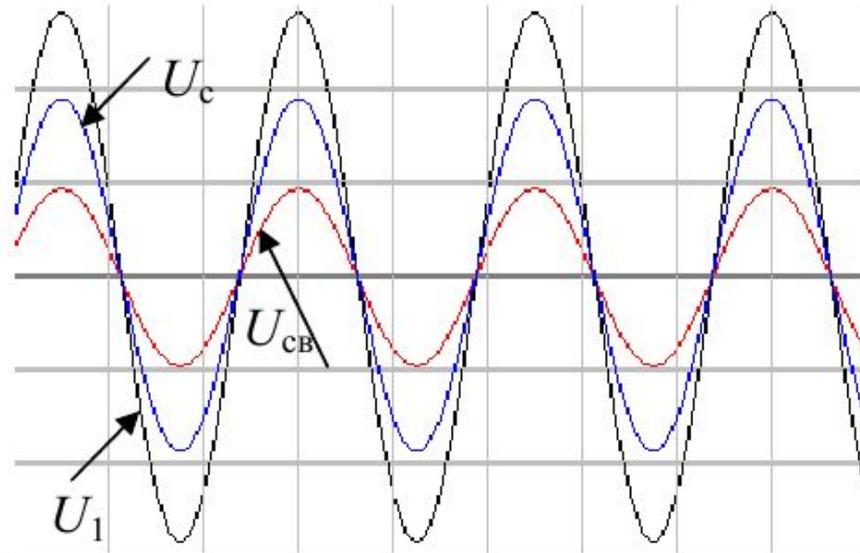
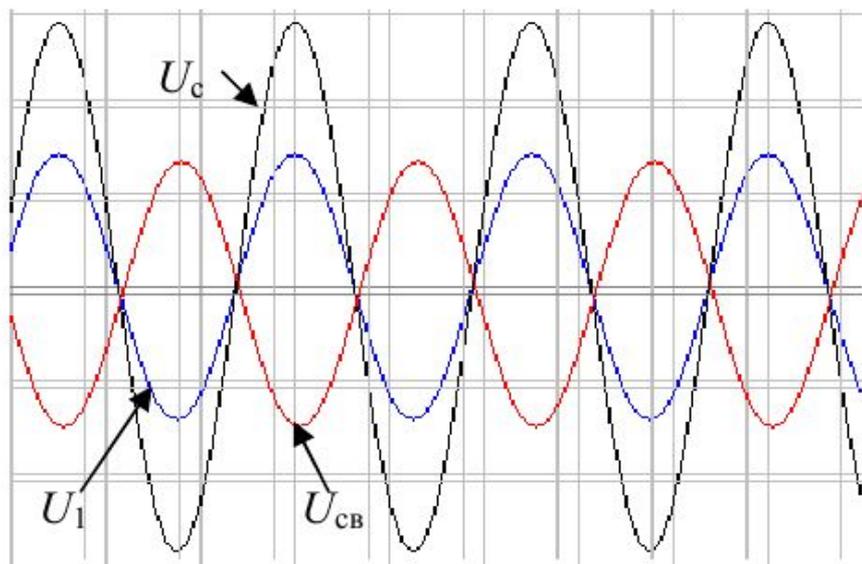


Рисунок 4.2 – Напряжения при отрицательной (слева) и положительной обратной связи

Если для образования обратной связи напряжение снимается с выхода некоторого транзистора и подводится к его же входу, обратная связь называется **местной**; если напряжение обратной связи подводится к входу другого транзистора, обратная связь называется **общей**.

Обратная связь различается также в зависимости от того, на каком токе осуществляется обратная связь - **на постоянном** или **на переменном**. Обратная связь на постоянном токе управляет поведением схемы на постоянном токе, стабилизируя рабочий режим транзисторов. Обратная связь на переменном токе при правильной организации позволяет изменить параметры схемы в желаемом направлении.

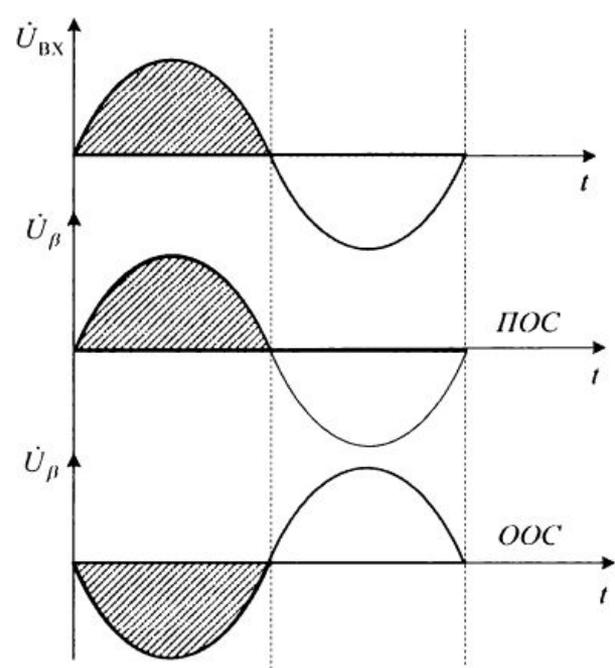


Рис. 4.5. Виды ОС по знаку

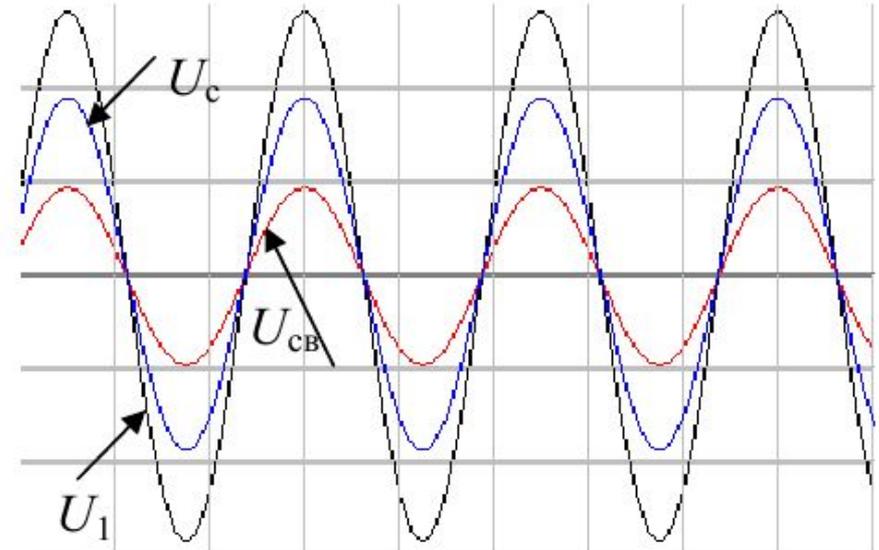
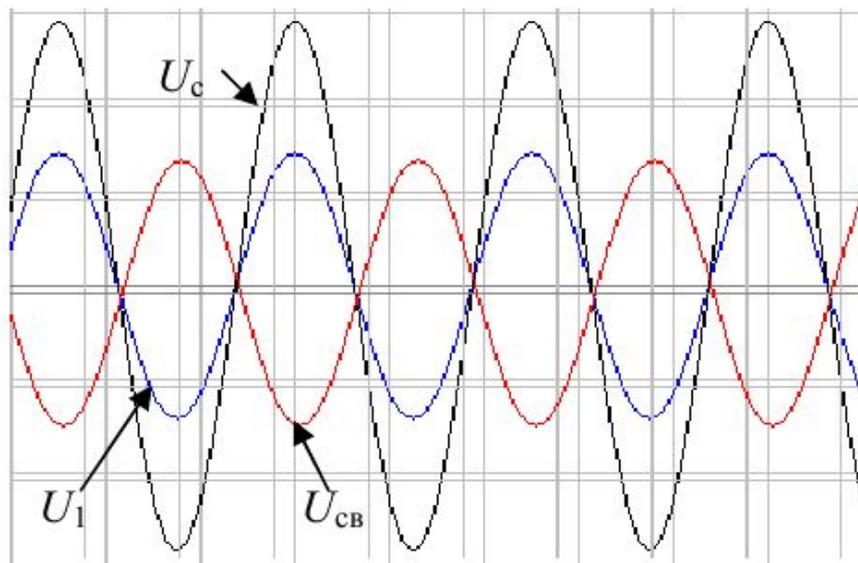


Рисунок 4.2 – Напряжения при отрицательной (слева) и положительной обратной связи

4.2. СВОЙСТВА УСИЛИТЕЛЕЙ, ОХВАЧЕННЫХ ЦЕПЬЮ ОС

4.2.1. КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ УСИЛИТЕЛЯ, ОХВАЧЕННОГО ЦЕПЬЮ ОС

а) если $\varphi_K(\omega) + \varphi_\beta(\omega) = \pi$, тогда $e^{j\omega} = \cos \pi + j \sin \pi = -1$ — это ООС.

$$K_{\text{ос}}(j\omega) = \frac{K(\omega)e^{j\varphi_K(\omega)}}{1 + \beta(\omega)K(\omega)} = K_{\text{ос}}(\omega)e^{j\varphi_K(\omega)},$$

где $\beta(\omega)$ и $K(\omega)$ — действительные числа.

Соответственно модуль комплексного коэффициента усиления усилителя с ООС будет равен:

$$|K_{\text{ос}}(j\omega)| = K_{\text{ос}}(\omega) = \frac{K(\omega)}{1 + \beta(\omega)K(\omega)}. \quad (4.7)$$

Вывод. Модуль комплексного коэффициента усиления усилителя, охваченного ООС, уменьшается в $[1 + \beta(\omega)K(\omega)]$ раз. Коэффициент усиления усилителя, охваченного глубокой ООС, не зависит от собственного коэффициента усиления усилителя, а определяется только коэффициентом передачи цепи обратной связи.

При $\beta K \gg 1$ наступает глубокая ООС. Тогда коэффициент усиления усилителя, охваченного глубокой ООС, равен:

$$K_{\text{ос}} = \frac{K}{1 + \beta K} \quad \text{или} \quad K_{\text{ос}} = \frac{K / \beta K}{\frac{1}{\beta K} + 1} = \frac{K / \beta K}{1} = \frac{1}{\beta}.$$

4.2. СВОЙСТВА УСИЛИТЕЛЕЙ, ОХВАЧЕННЫХ ЦЕПЬЮ ОС

4.2.1. КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ УСИЛИТЕЛЯ, ОХВАЧЕННОГО ЦЕПЬЮ ОС

б) если $\varphi_K(\omega) + \varphi_\beta(\omega) = 0$, тогда $e^{j0} = \cos 0 + j \sin 0 = 1$ — это ПОС.

Из выражения (4.6) получим:

$$K_{oc}(j\omega) = \frac{K(\omega)e^{j\varphi_K(\omega)}}{1 + \beta(\omega)K(\omega)};$$
$$|K_{oc}(j\omega)| = K_{oc}(\omega) = \frac{K(\omega)}{1 - \beta(\omega)K(\omega)}. \quad (4.8)$$

Вывод. Модуль комплексного коэффициента усиления усилителя, охваченного ПОС, уменьшается в $[1 - \beta(\omega)K(\omega)]$ раз. Если $\beta(\omega)K(\omega) \leq 1$, то получим увеличение коэффициента усиления K_{oc} . В усилителях чаще всего применяют ООС.

4.2.2. СТАБИЛЬНОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ УСИЛИТЕЛЯ С ООС

Введем понятие $\eta = \frac{\Delta K}{K}$ – коэффициент относительной неустойчивости

коэффициента усиления.

Для ООС коэффициент усиления с ОС равен:

$$K_{\text{оос}} = \frac{K}{1 + \beta K}.$$

$$\Delta K_{\text{оос}} = \frac{K_{\text{оос}}}{(1 + \beta K)} \cdot \frac{\Delta K}{K};$$

$$\underbrace{\frac{\Delta K_{\text{оос}}}{K_{\text{оос}}}}_{\eta_{\text{оос}}} = \underbrace{\frac{\Delta K}{K}}_{\eta} \cdot \frac{1}{(1 + \beta K)}; \quad (4.9)$$

$$\eta_{\text{оос}} = \frac{\eta}{(1 + \beta K)}, \quad (4.10)$$

где $\eta_{\text{оос}}$ – коэффициент относительной неустойчивости усилителя, охваченного ООС, η – коэффициент относительной неустойчивости усилителя без ООС.

Вывод. Коэффициент относительной неустойчивости коэффициента усиления усилителя с ООС в $(1 + \beta K)$ раз меньше, чем коэффициент относительной неустойчивости коэффициента усиления усилителя без ООС.

4.2.3. ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ УСИЛИТЕЛЯ С ООС

Для определения входного сопротивления усилителя с ООС рассмотрим схему усилителя с последовательной ОС по напряжению. Данная схема представлена на рис. 4.7.

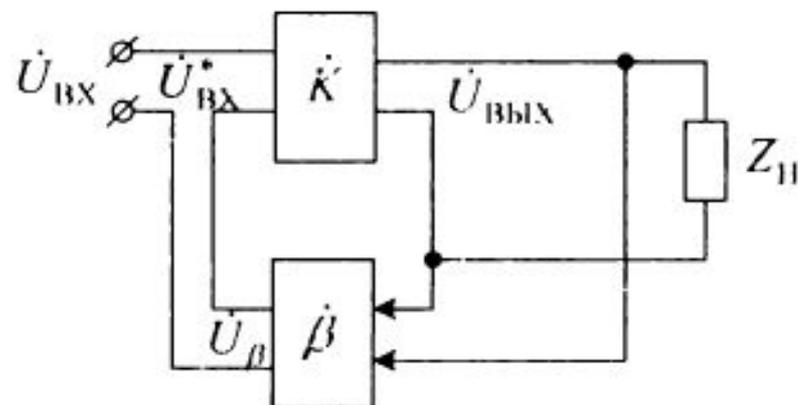


Рис. 4.7. Схема усилителя с последовательной ОС по напряжению

Для усилителя с ОС можно записать:

$$R_{ВХ} = \frac{\Delta U_{ВХ}^*}{\Delta I_{ВХ}}.$$

$$R_{ВХОС} = \frac{\Delta U_{ВХ}^* (1 + \beta K)}{\Delta I_{ВХ}} = R_{ВХ} (1 + \beta K). \quad (4.11)$$

Вывод. Входное сопротивление усилителя, охваченного ООС, увеличивается в $(1 + \beta K)$ раз по сравнению с входным сопротивлением усилителя без ОС.

4.2.4. ВЛИЯНИЕ ООС НА ПОЛОСУ ПРОПУСКАНИЯ УСИЛИТЕЛЯ

Нижняя частота полосы пропускания усилителя с ООС уменьшается в $(1+K_0\beta)$ раз и определяется по выражению:

$$\omega_{Н_{ОС}} = \frac{1}{\tau_{Н_{ОС}}} = \frac{1}{\tau_{Н}(1+K_0\beta)} = \frac{\omega_{Н}}{(1+K_0\beta)}.$$

Верхняя частота полосы пропускания усилителя с ООС увеличивается в $(1+K_0\beta)$ раз и определяется по выражению:

$$\omega_{В_{ОС}} = \frac{1}{\tau_{В_{ОС}}} = \frac{(1+K_0\beta)}{\tau_{В}} = \frac{1}{\tau_{В}}(1+K_0\beta) = \omega_{В}(1+K_0\beta).$$

АЧХ усилителя с ООС показана на рис. 4.8.

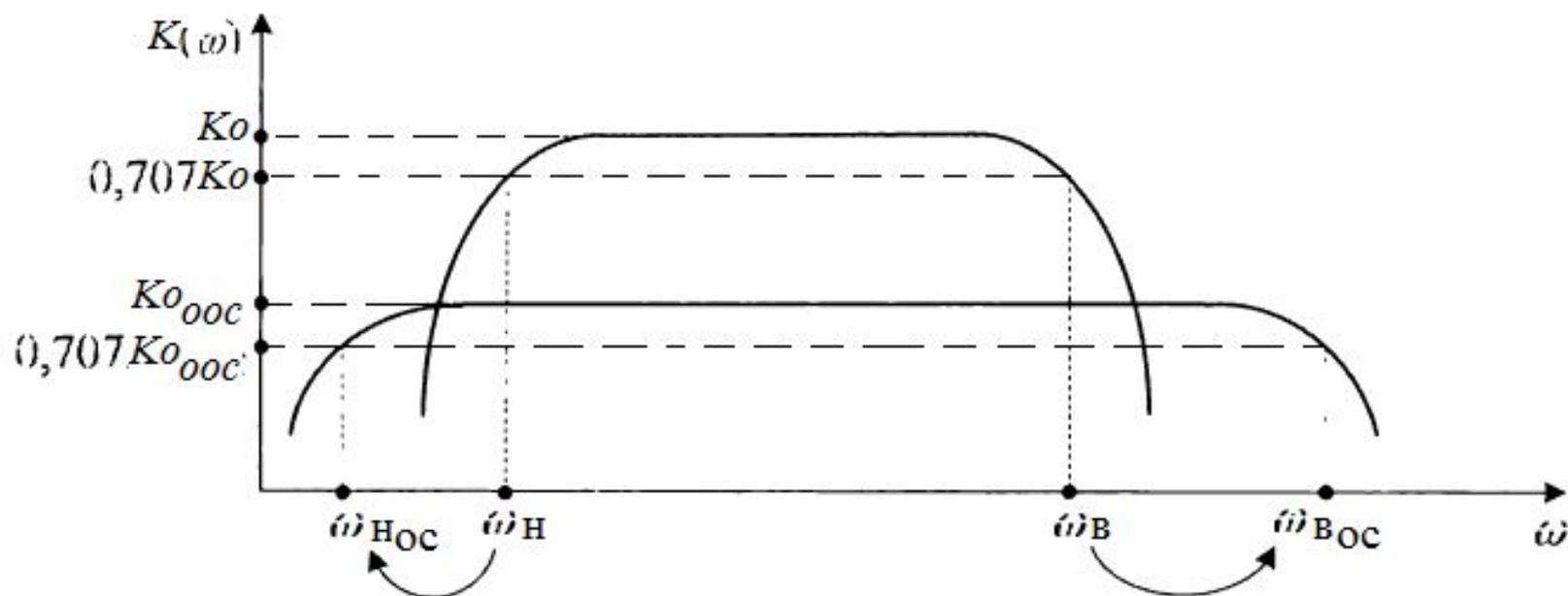


Рис. 4.8. АЧХ усилителя с ООС

4.2.5. УСТОЙЧИВОСТЬ УСИЛИТЕЛЕЙ С ОС

Комплексный коэффициент передачи усилителя с ОС равен:

$$K_{\text{ОС}}(j\omega) = \frac{K(\omega)e^{j\varphi_K(\omega)}}{1 - \beta(\omega)K(\omega)e^{j(\varphi_K + \varphi_{\beta})}}$$

Если $(\varphi_K + \varphi_{\beta}) = 2\pi n$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, то получается ПОС, т. к. $e^{j(2\pi n)} = 1$.

Если $\beta(\omega)K(\omega) \rightarrow 1$, то $|K_{\text{ОС}}| \rightarrow \infty$.

Вывод. При положительной ОС создаются условия к самовозбуждению, т. е. усилитель становится неустойчивым.

Условия генерации в усилителе:

- $\beta(\omega)K(\omega) = 1$ – баланс амплитуд.
- $(\varphi_K + \varphi_{\beta}) = 2\pi n$ – баланс фаз, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Анализ устойчивости усилителя с ОС производится с помощью построения частотно-фазовой характеристики или годографа фактора обратной связи.

Существует правило определения вида обратной связи по способу снятия:

- ∞ если при мысленном коротком замыкании нагрузки напряжение обратной связи становится равным нулю, то это обратная связь по напряжению;
- ∞ если напряжение обратной связи равно нулю при мысленном отключении нагрузки (холостой ход), то это обратная связь по току.

Более удобным может оказаться другое правило:

- ∞ если выходное напряжение и напряжение обратной связи снимаются с одного и того же электрода транзистора (коллектора или эмиттера), то это обратная связь по напряжению (при этом короткое замыкание нагрузки делает равными нулю оба напряжения – и выходное напряжение, и напряжение обратной связи);
- ∞ если выходное напряжение и напряжение обратной связи снимаются с разных электродов, то это обратная связь по току (мысленный холостой ход делает равными нулю и выходной ток, и напряжение обратной связи, выходное напряжение при этом не равно нулю – оно равно напряжению холостого хода).

Правило определения вида обратной связи по способу введения:

- ∞ если U_c и U_{cb} подаются на один и тот же электрод, они оказываются параллельными – параллельная обратная связь (цепь R_6, C_4 на рис. 4.7);
- ∞ если U_c и U_{cb} подаются на разные электроды, со стороны входных зажимов они оказываются последовательными – последовательная обратная связь (сопротивление R_8 на рис. 4.7).

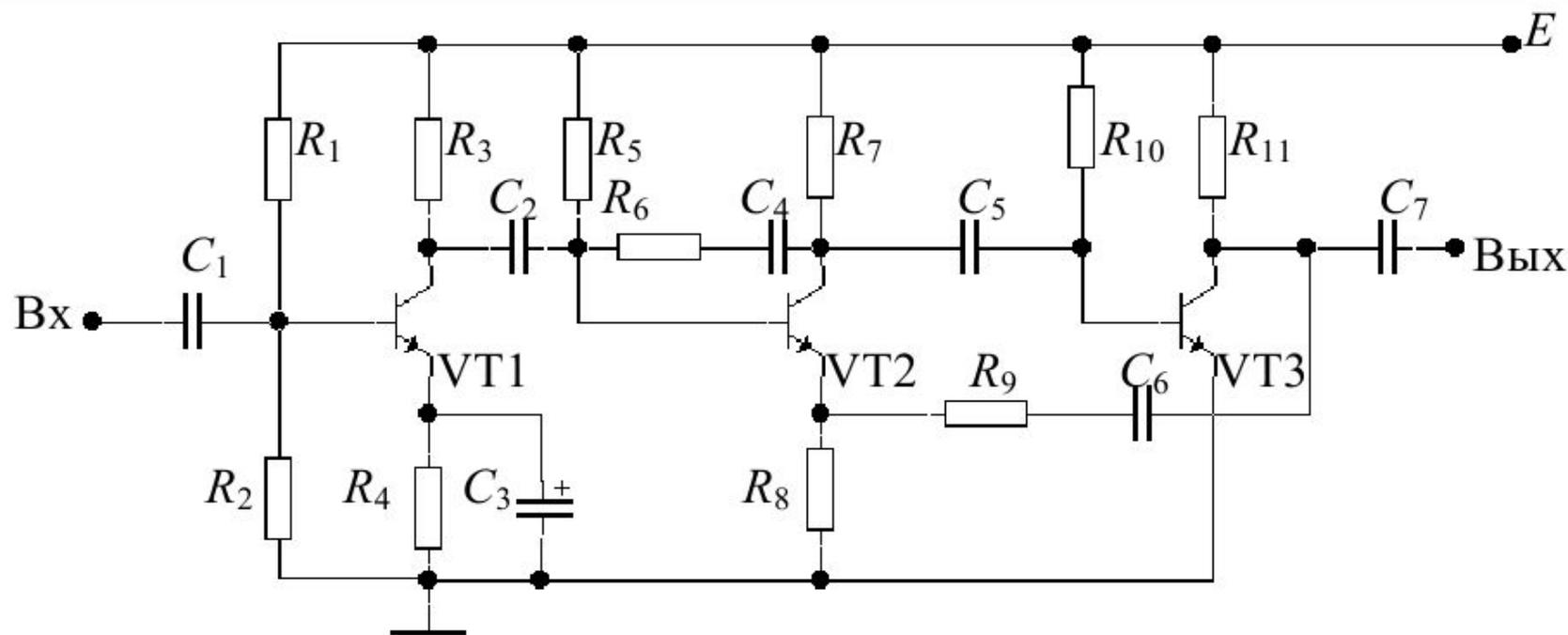


Рисунок 4.7 – Схема усилителя с несколькими цепями обратной связи

Примерами схем с обратными связями являются:

- Схема эмиттерного повторителя (рис. 4.10) – последовательная ОС по напряжению.

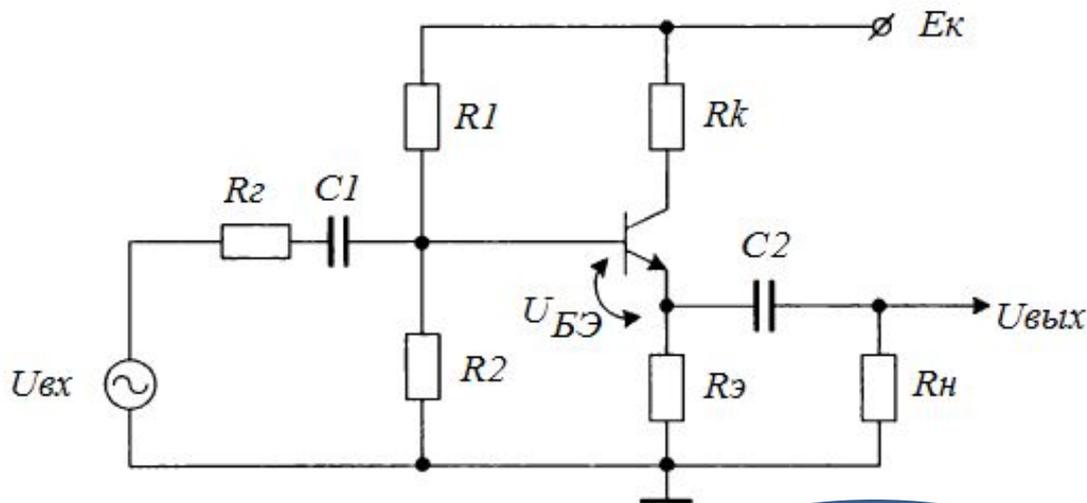


Рис. 4.10. Схема последовательной ОС по напряжению

- Схема с общим эмиттером (рис. 4.11) – последовательная ОС по току. В данной схеме $R_э$ – сопротивление ОС по току, напряжение ОС $U_{ОС} \sim I_э = I_k + I_б$.

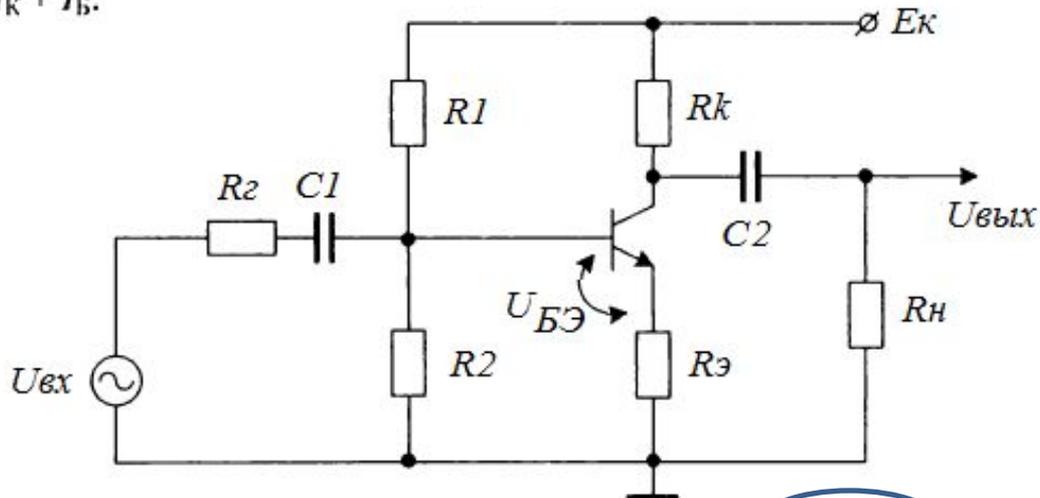


Рис. 4.11. Схема последовательной ОС по току

Индивидуальное задание на ноябрь-декабрь

Обзорные рефераты на темы

► «Современные методы инженерного творчества»

(к 4 декабря)

► «Современные отрасли человеческой деятельности, требующие специалистов со знанием СиСЭС»

(к 11 декабря)

► «Отечественные предприятия – разработчики и производители современной ЭКБ» (к 4 декабря)

Домашнее задание

СТАРОЕ до 25 октября

-) Раздел «Транзисторы» по [МРБ 1190 А.И.Аксенов, А.В.Нефедов. **Элементы схем БРА. Диоды. Транзисторы 1992**]
-) Разделы 2.2 и 2.3 по [Опадчий, Глудкин...]
-) Изучить Главу 1. [**Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах Ровдо А.А.**]
-) Изучить Главу 9, изучить разделы учебника, соответствующие ТЗ на курсовой проект [Перепёлкин Д.А. - **Схемотехника усилительных устройств (Специальность) - 2014**]
-) Изучить параграф 4.4 «Схемотехника усилительных устройств» [Нефедов В.И. **Основы радиоэлектроники и связи 2009**]

СТАРОЕ до 30 октября

-) Глава 1 и Глава 2 на подробный разбор. Тезисный конспект. [Перепёлкин Д.А. - **Схемотехника усилительных устройств (Специальность) - 2014**]
-) Изучить полностью, основные вопросы на конспект, примеры схемотехнического моделирования усилительных каскадов повторить в MicroCAP. [Шарыгина Л.И. **Элементы аналоговой схемотехники. Учебное пособие 2015.**]

Домашнее задание

ТЕКУЩЕЕ до 8 ноября

-) Параграф 4.6 изучить до пункта «Импульсные и избирательные усилители» [Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи, 2009]
-) Главы 6, 7 на конспект [Перепёлкин Д.А. - Схемотехника усилительных устройств, 2014]
-) Главы 7, 8, 9 изучить [Опадчий, Глудкин. Аналоговая и цифровая электроника]
-) Главы 1, 3, 4, 5, 6, 13 изучить [Б.Картер, Р. Манчини. Операционные усилители для всех, 2011]
-) Глава 4, пункт 4.1 на конспект [И. Достал. Операционные усилители, 1982]
-) В качестве дополнительной справочной литературы использовать остальные книги из папки «Схемы на операционных усилителях»!

Домашнее задание

НОВОЕ до 8 ноября

-) Глава 3 на конспект [Перепёлкин Д.А. - Схемотехника усилительных устройств, 2014] (готовимся к новой КР по схемотехнике однокаскадных усилителей!)
-) Пункты 11, 12, 13, 14, 16 изучить [Зорин А.Ю. УГО на электрических схемах, 2007] (готовимся к новой КР по УГО и ПО!)
-) Главы 6, 7 изучить [Опадчий, Глудкин. Аналоговая и цифровая электроника]
-) Главы 2, 3, 4, 5 изучить [Ровдо А.А. Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах]
-) Пункт «Импульсные и избирательные усилители» с. 418-420 изучить [Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи, 2009]
-) Главы 2 (п. 2.1-2.5), 8, 11 (п. 11.1-11.4) повторить [Баскаков С.И. РТЦ и С, 2000]
-) Журнал «Радиоконструктор», номера 1-12 за 1999 год изучить (алгоритм чтения схемы электрической принципиальной: назначение устройства, ТХ, особенности схемы и используемой ЭКБ, назначение элементов, алгоритм работы).
-) Изучить возможности программы **Circuit Simulator**. Изучить процессы, протекающие в простейших аналоговых схемах (вкладки *Circuits: Basics, A/C Circuits, Passive Filters, Other passive circuits, Diodes, Op-Amps, Transistors, MOSFET, Active Filters*) [<http://www.falstad.com/circuit/>]