

ТЕМА 3.3. УСИЛИТЕЛИ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ (4 ЧАС)

(КЛАССИФИКАЦИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ

(ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА);

СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ; ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В

УСИЛИТЕЛЯХ; ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

УСИЛИТЕЛЕЙ; СХЕМА НА БИПОЛЯРНОМ

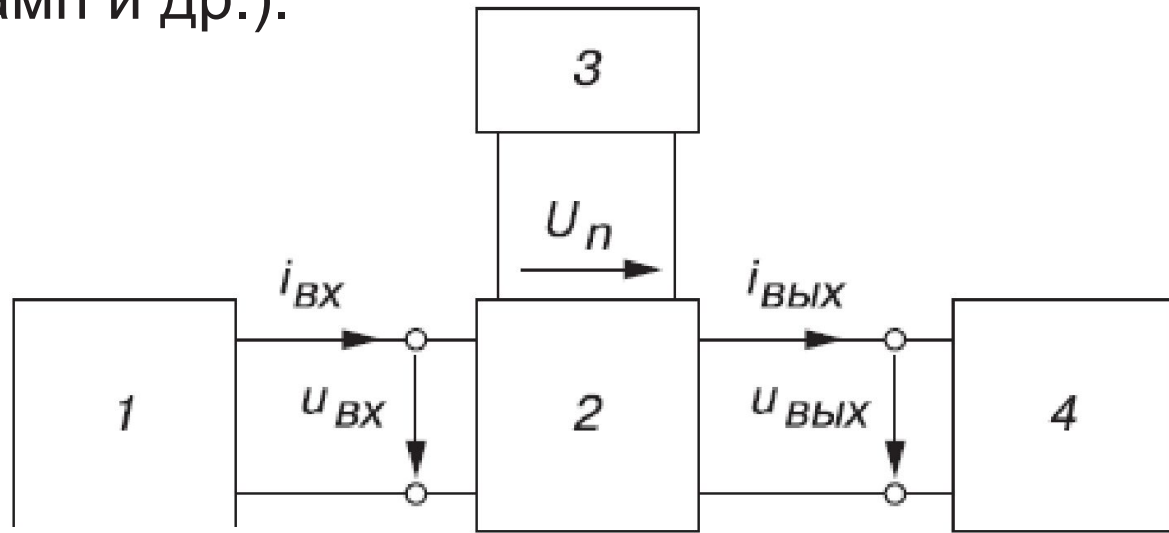
ТРАНЗИСТОРЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ;

ЭМИТТЕРНЫЙ (ИСТОКОВЫЙ) ПОВТОРИТЕЛЬ;

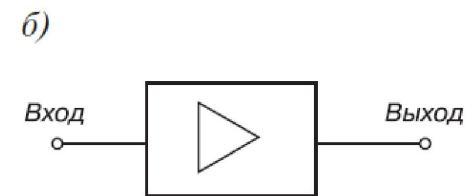
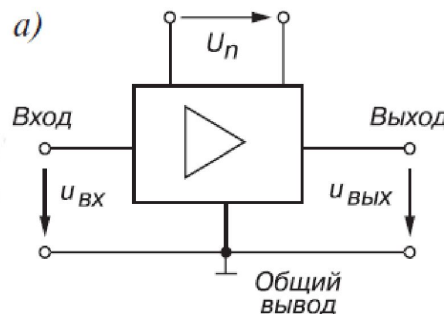
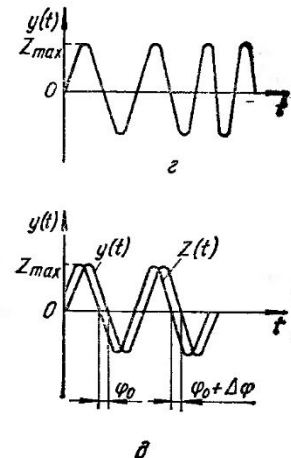
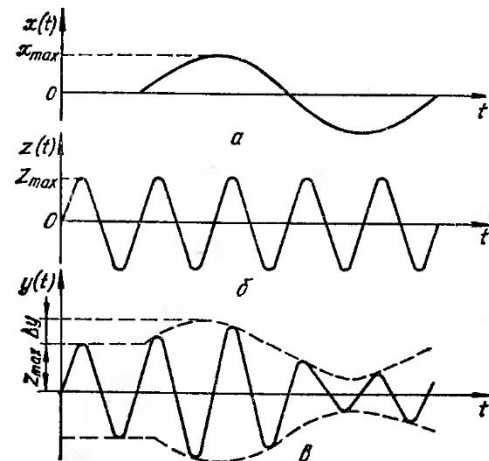
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ;

ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ)

Усилитель — устройство, увеличивающее мощность (напряжение, ток) входного сигнала за счет энергии внешнего источника питания (модулирование напряжения источника питания входным управляющим воздействием) **посредством усилительных элементов** (полупроводниковых приборов, электронных ламп и др.).



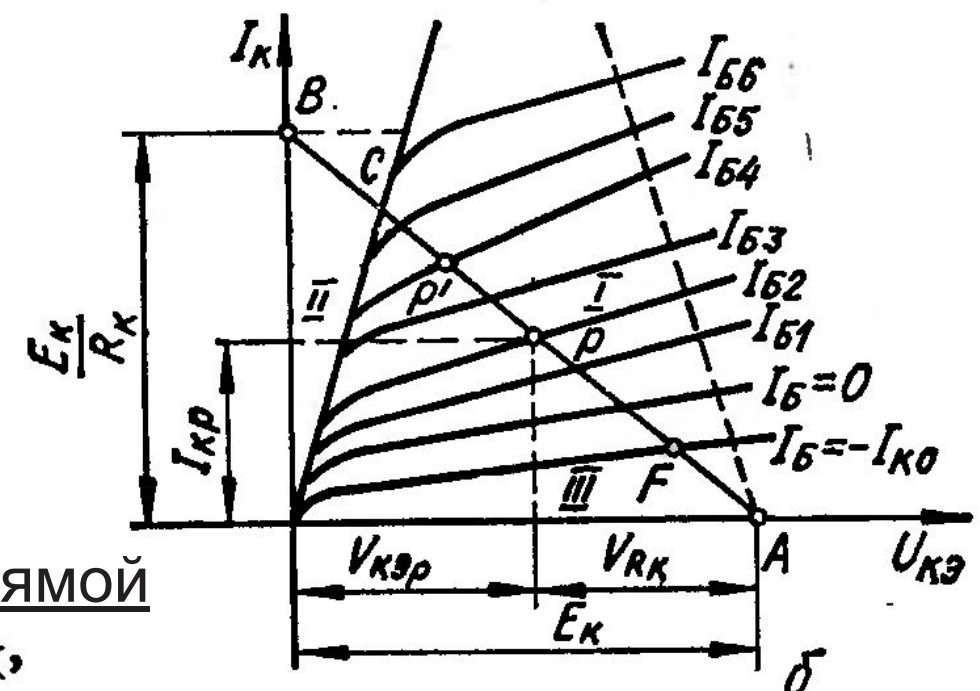
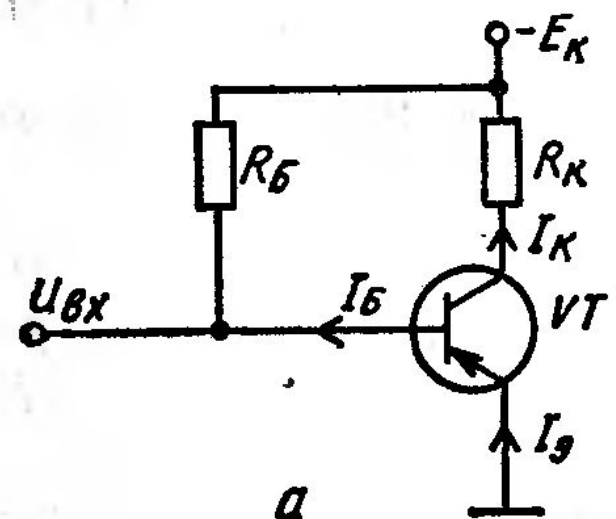
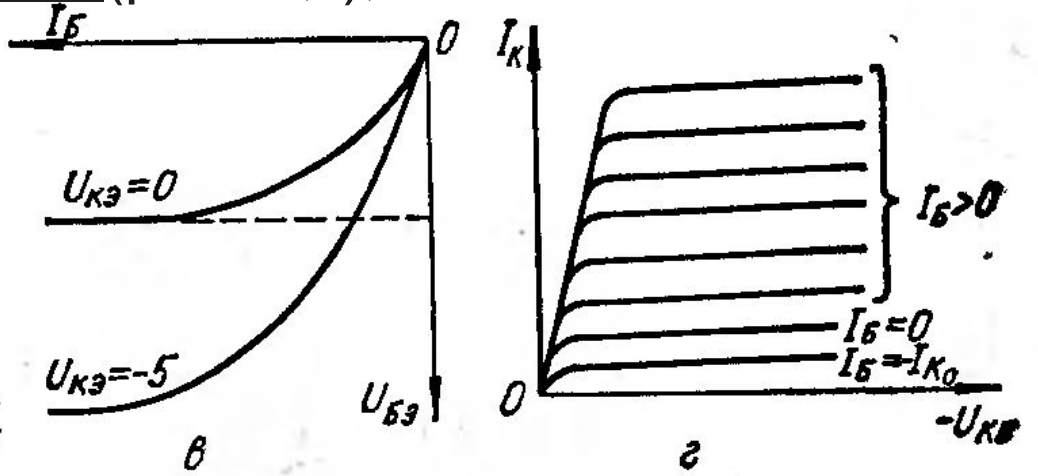
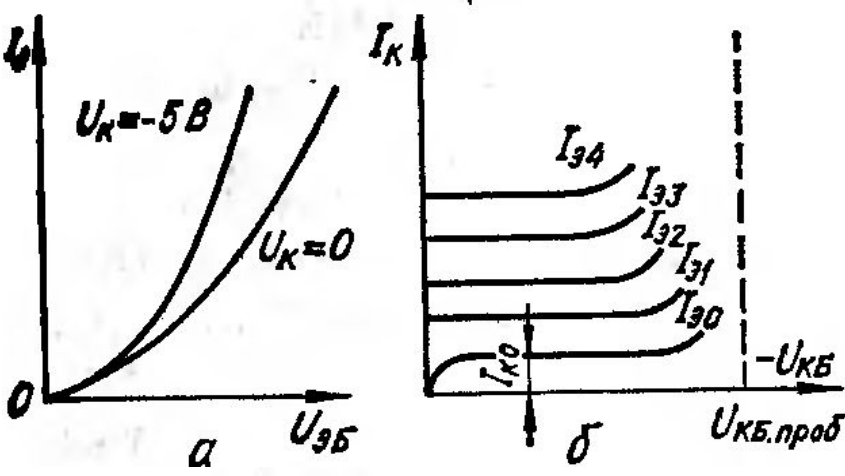
3 — источник энергии постоянного тока); 2 — усилительный элемент; 4 — нагрузка



Классификация усилителей

- ✓ **по усиливаемому параметру**: усилители напряжения (УН), тока (УТ), мощности (УР);
- ✓ **по назначению**: измерительные; для устройств теле и радиовещания; общепромышленного использования; операционные, используемые в аналоговых и аналого-цифровых устройствах;
- ✓ **по характеру усиливаемых сигналов**: усилители гармонических, импульсных и другой формы сигналов;
- ✓ **по частоте усиливаемых сигналов**: усилители постоянного тока (УПТ); усилители звуковой частоты (УНЧ, $f < 30$ кГц); усилители высокой частоты (УВЧ, $f < 300$ МГц); усилители сверхвысокой частоты (УСВЧ, $f < 300$ ГГц);
- ✓ **по ширине частотного спектра выходного сигнала**: широкополосные и узкополосные (резонансные);
- ✓ **по схеме включения транзисторов**: с общим эмиттером (ОЭ); с общей базой (ОБ); с общим коллектором (ОК); с общим истоком (ОИ); с общим стоком (ОС); с общим затвором (ОЗ);
- ✓ **по количеству каскадов усиления**: однокаскадные; многокаскадные (каскад предварительного усиления, промежуточные и выходной каскады);
- ✓ **по типу связи между каскадами и между окончательным каскадом и нагрузкой**: резистивная (гальваническая), ёмкостная, трансформаторная.

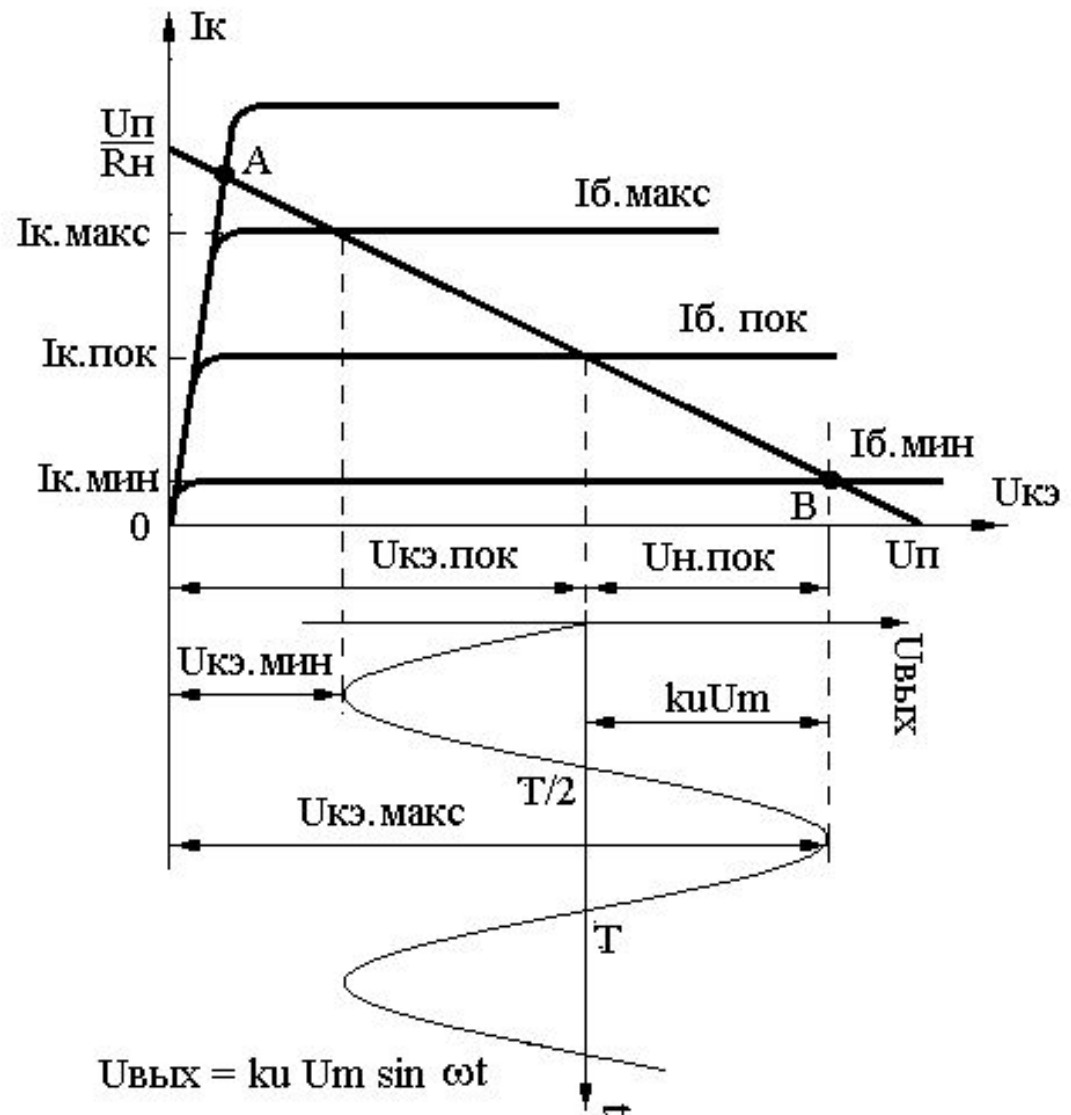
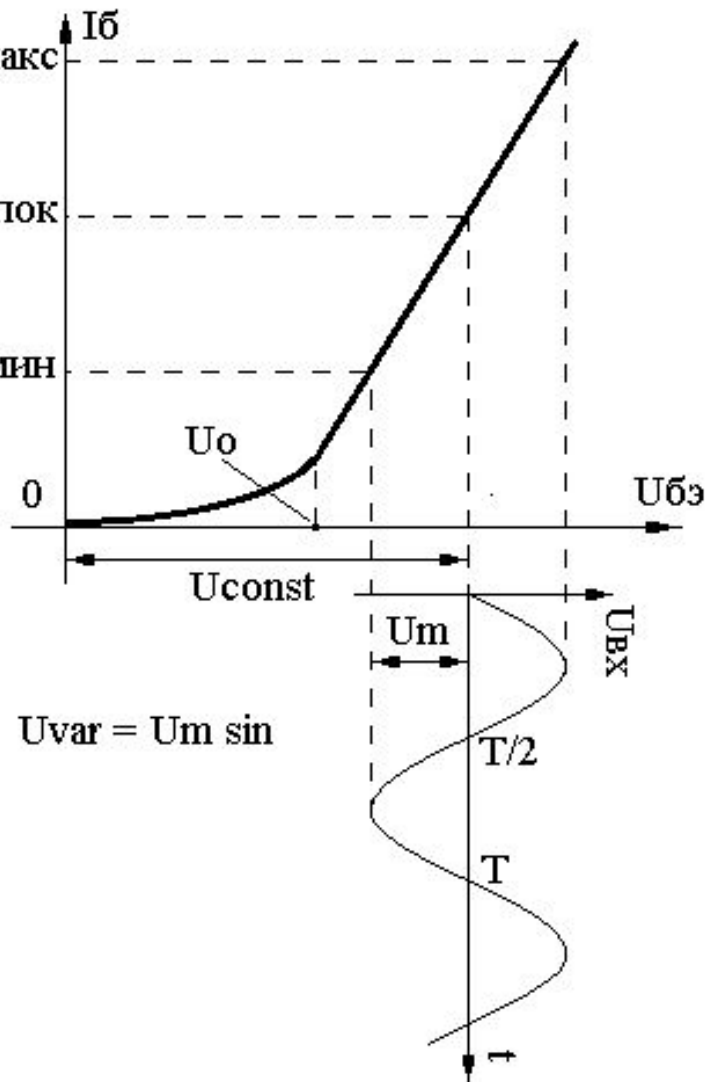
Вольт-амперные характеристики транзистора (ВАХ):
статические (без нагрузки в выходной цепи);
динамические;
входные (рис. а,в) и выходные (рис. б,г);

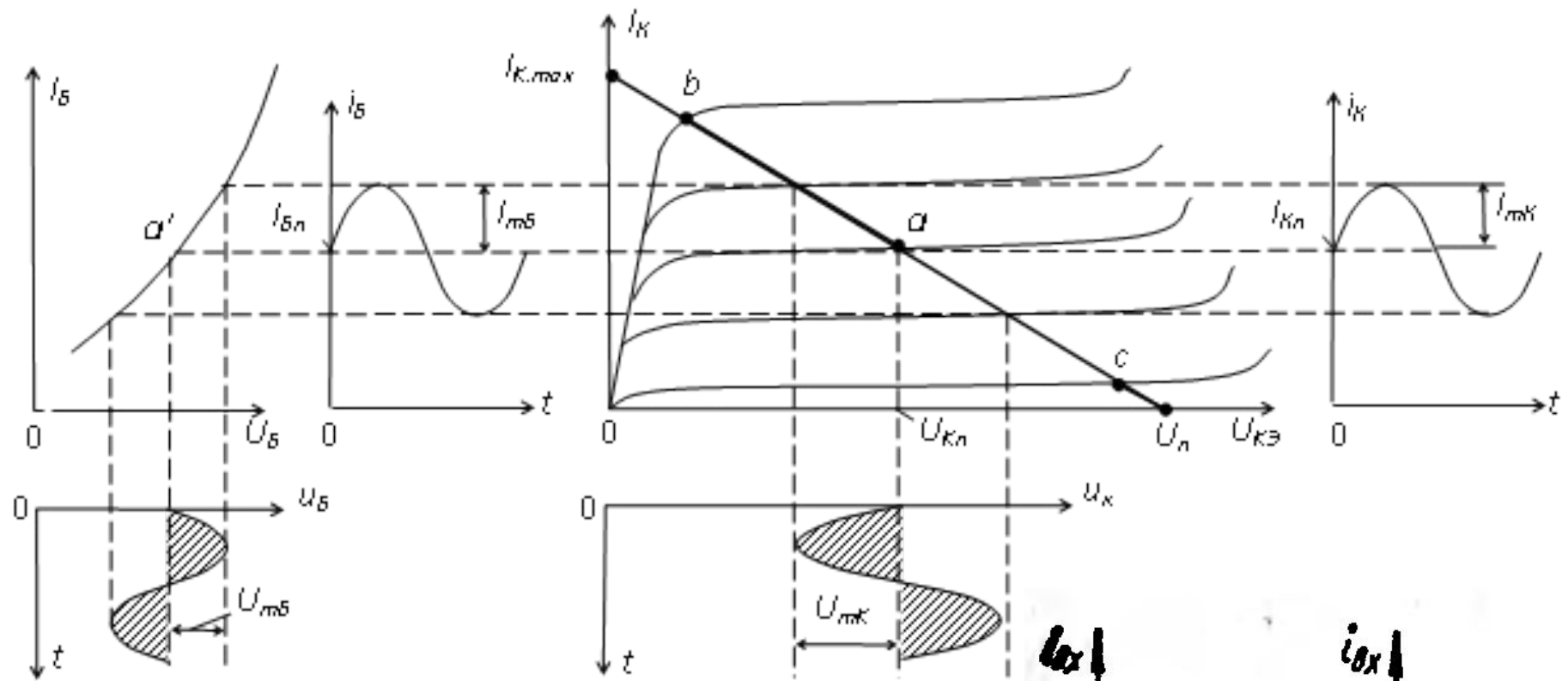


Уравнение нагрузочной прямой

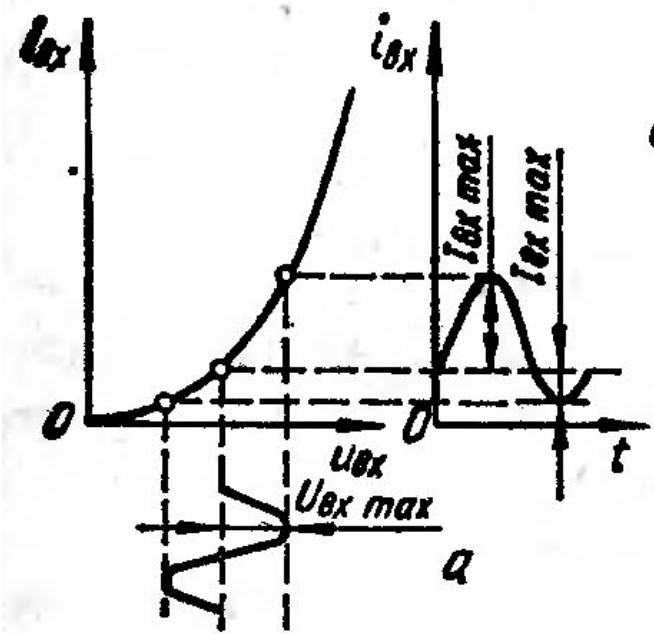
$$U_{КЭ} = E_{К} - I_{К}R_{К},$$

Входная а) и семейство выходных б) характеристик биполярного транзистора.





a



a

Работа усилителя

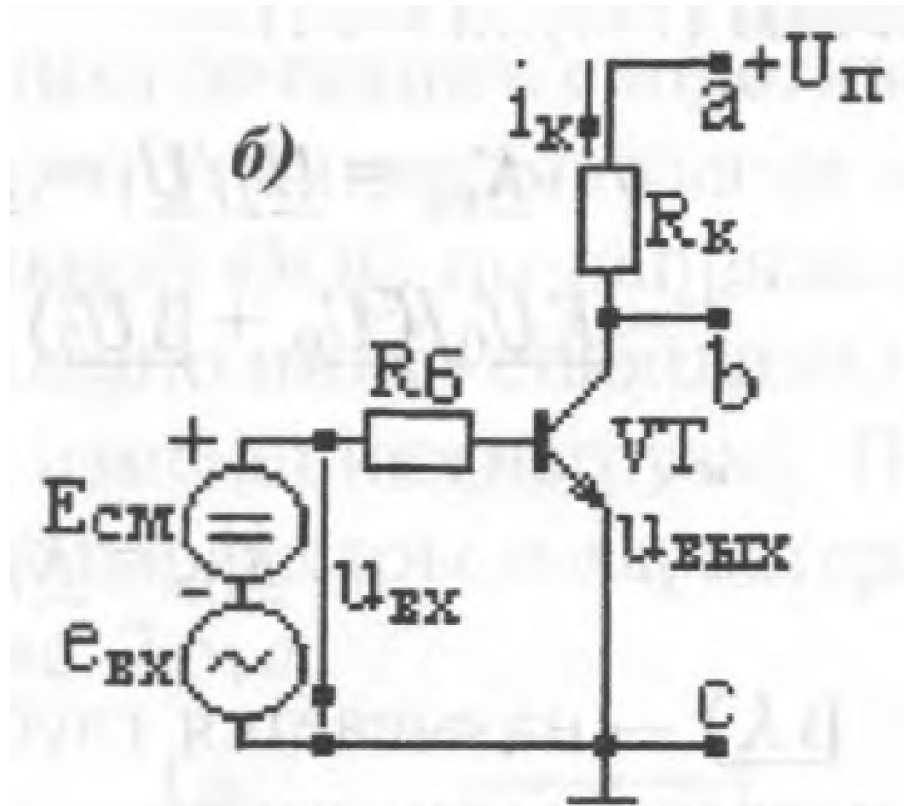
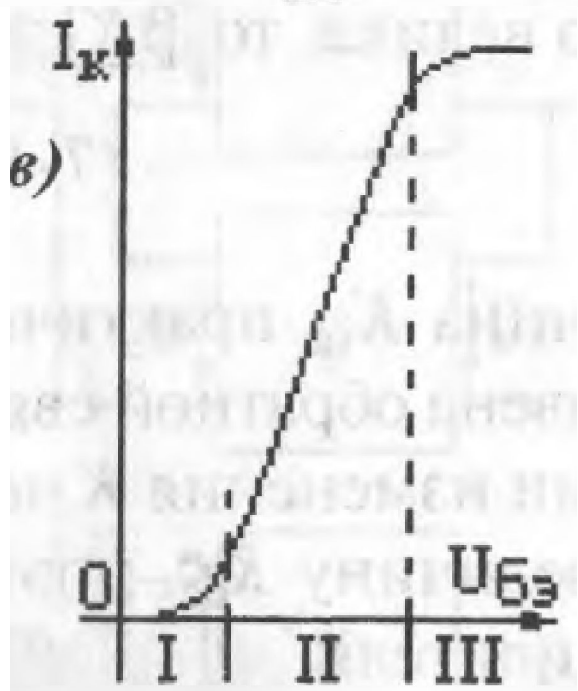
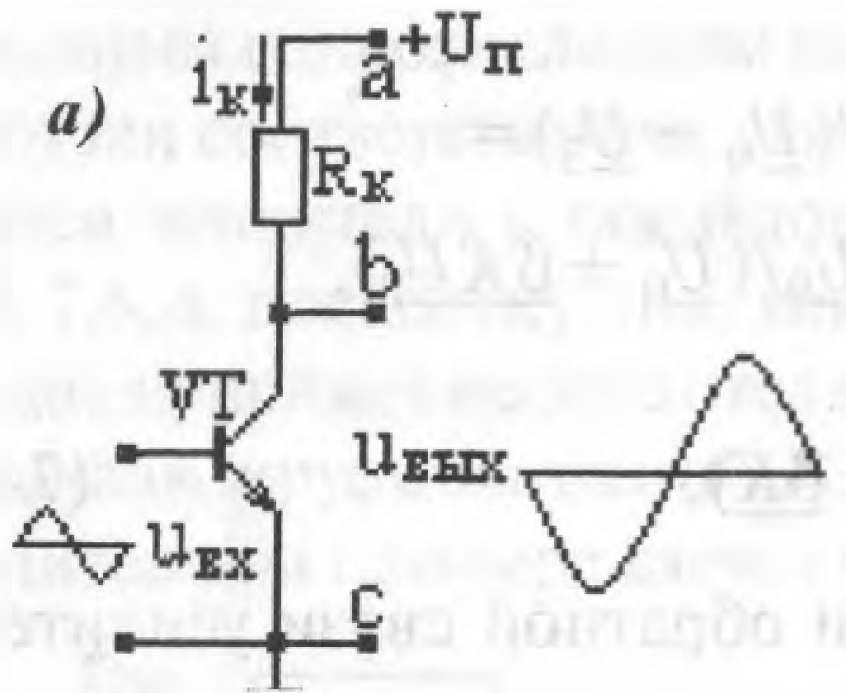
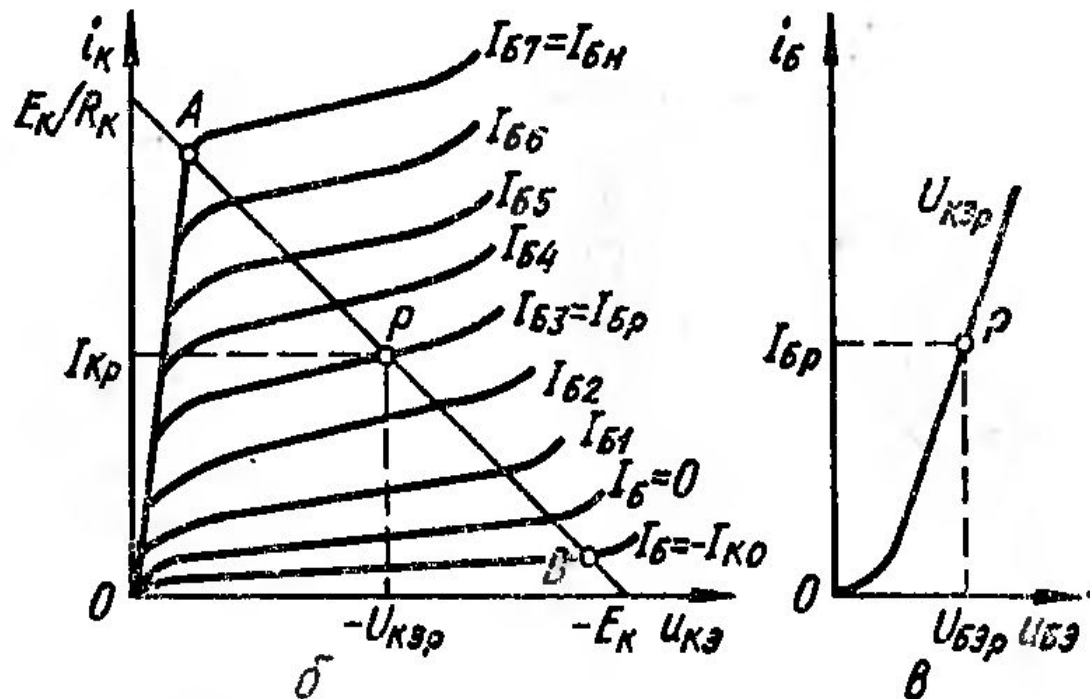
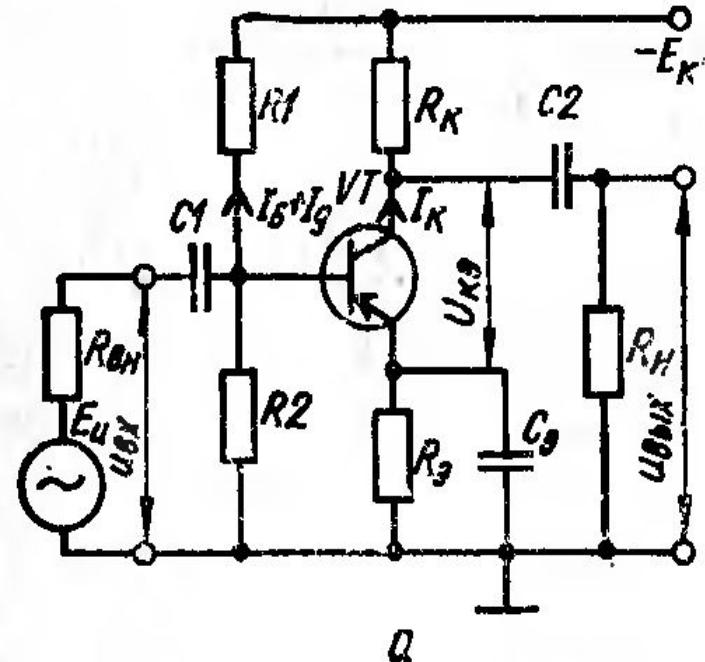


Схема с ОЭ



$$R_1 = \frac{E_K - U_{БЭр} - U_{RЭ}}{I_{д} + I_{Бр}} ;$$

$$R_2 = \frac{U_{БЭр} + U_{RЭ}}{I} ,$$

$I_{д} = (2 \dots 5) I_{Бр}$ — ток в цепи делителя.

Классы усиления

В зависимости от положения рабочей точки усилительного элемента на проходной (сквозной) динамической характеристике, различают следующие классы (режимы) усиления:

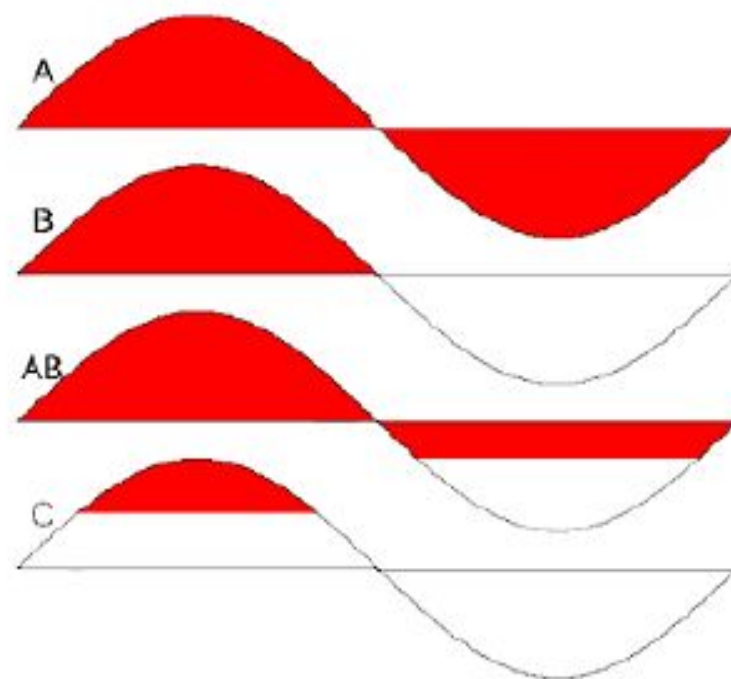
A, B, C, D + промежуточные.

Классы усиления принято характеризовать **углом отсечки** – Θ («theta»).

Угол отсечки равен половине интервала проводимости за период усилительного элемента и измеряется в угловых единицах (градусы, радианы).

Для задания класса усиления используются рассмотренные ранее динамические характеристики.

Далее будем упоминать проходную характеристику, подразумевая, что для задания класса усиления можно использовать любую из динамических характеристик (входная, сквозная, проходная).

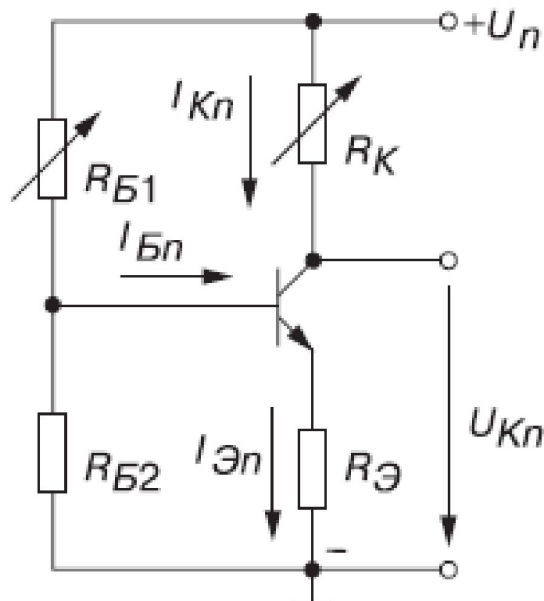
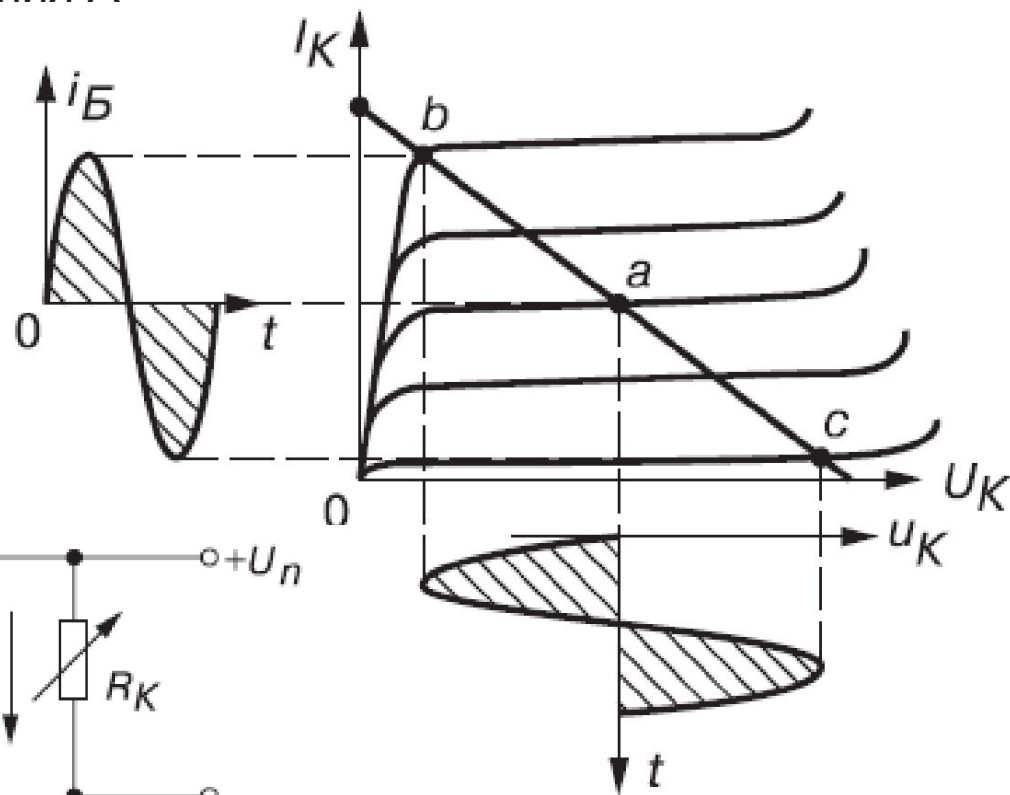


Режимы работы усилителей

Класс А характеризуется тем, что рабочую точку a выбирают посередине участка bc линии нагрузки

Основной недостаток класса усиления А — низкий КПД

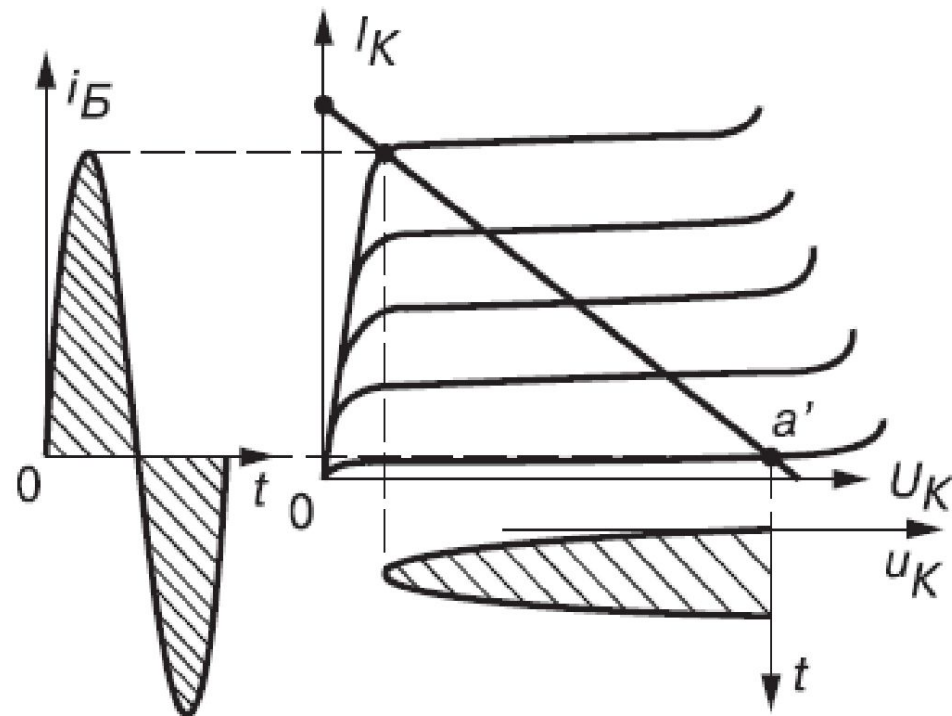
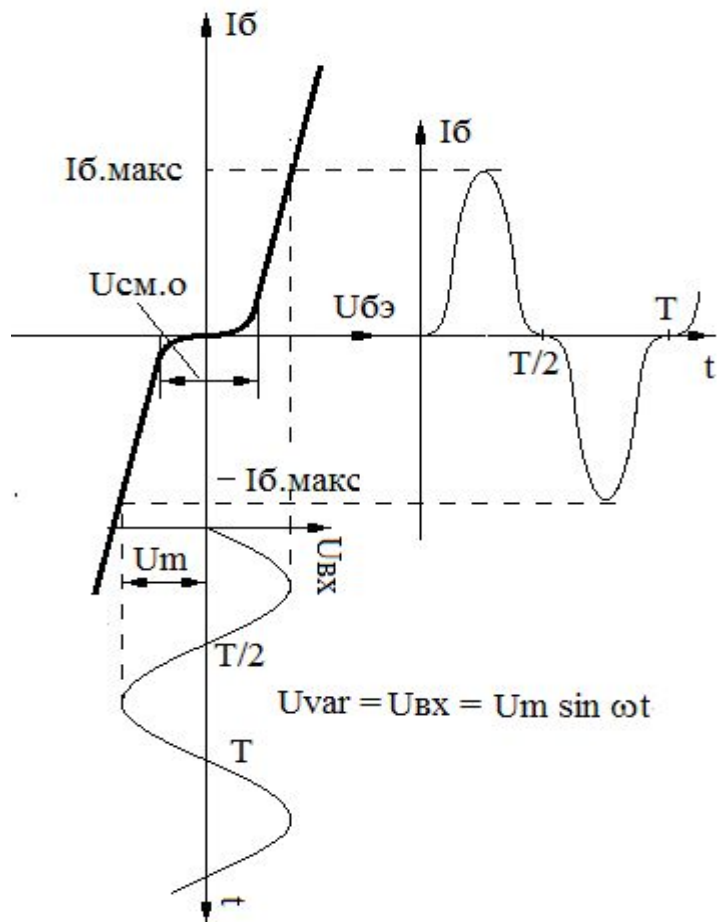
$$\eta = P_2 / P_n = U_{\text{вых}} I_{\text{вых}} / E_n I_n$$



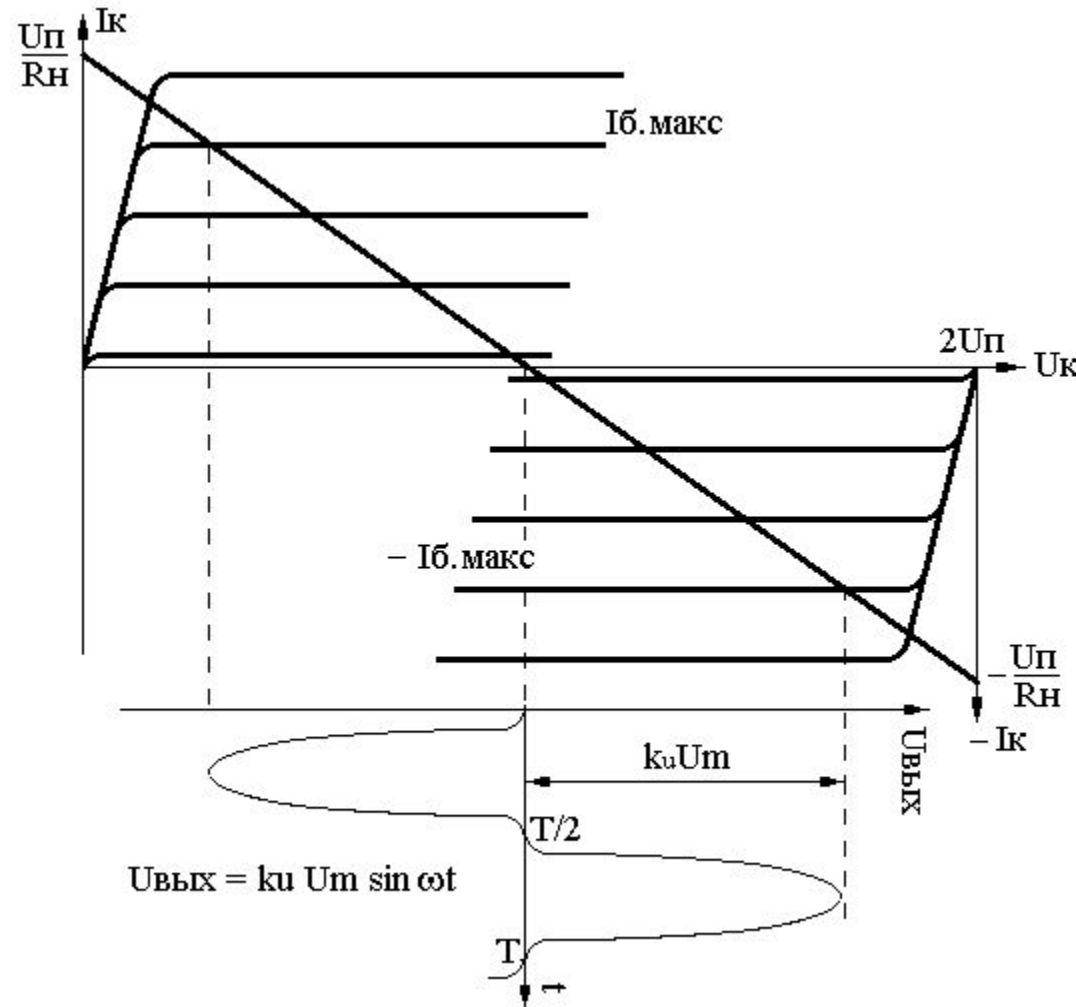
$$I_{Kn} = (U_n - U_{Kn}) / R_K,$$

где $U_{Kn} = U_{KЭ} + R_Э I_{Эn}$.

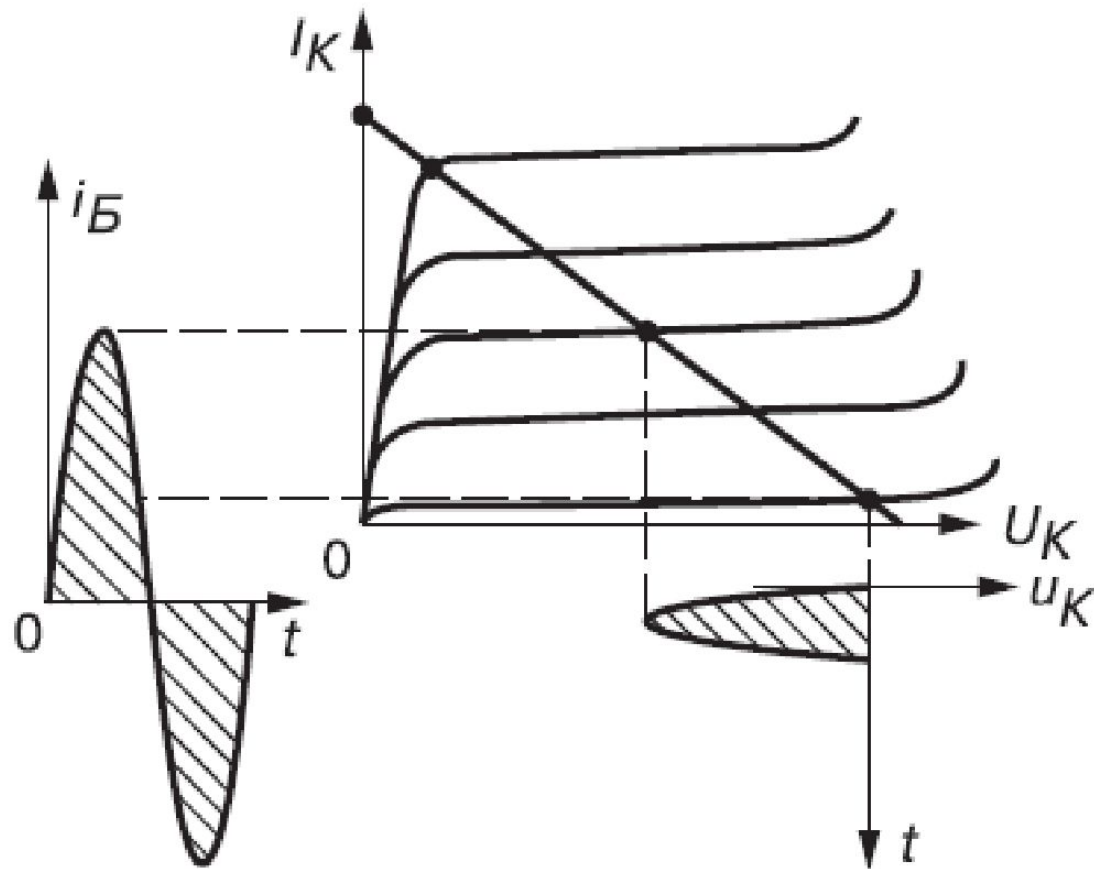
Для работы **усилителя в режиме В** рабочую точку a' устанавливают на пересечении линии нагрузки и выходной характеристики транзистора при $I_{Бн} = 0$. В этом режиме переменные составляющие тока $i_{вых}$ и напряжения $u_{вых}$ возникают лишь в положительные полупериоды тока базы i_B . При синусоидальном входном напряжении (токе) выходное напряжение u_K имеет форму полусинусоид, т. е. нелинейные искажения очень большие. Этот режим часто используют в двухтактных усилителях мощности. КПД усилителя, работающего в режиме В, может достигать 0,8.



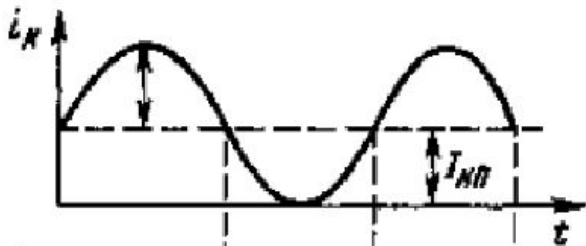
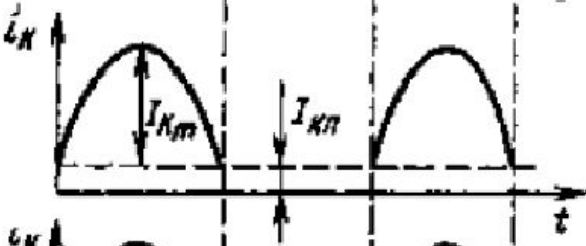

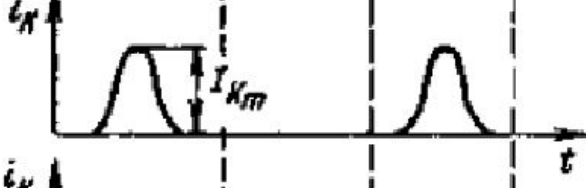
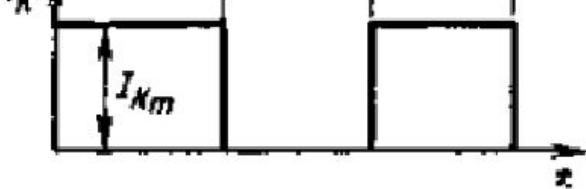
Режим усиления, при котором ток коллектора протекает больше половины периода действия входного переменного напряжения, называется режимом усиления класса «АВ».



В режиме С рабочая точка выбирается за точкой отсечки a' и ток i_k (напряжение u_k) в транзисторе возникает только в течение некоторой части положительной полуволны входного тока базы i_b (рис. 3.11, в). В этом режиме усиления возникают очень большие искажения усиливаемого напряжения (тока), но КПД устройства может быть очень высоким и приближаться к единице. Режим С используют в избирательных усилителях и автогенераторах, которые благодаря наличию колебательных контуров или других частотно зависимых звеньев выделяют лишь основную гармонику из несинусоидального напряжения u_k .



Основные параметры усилителей различных классов усиления

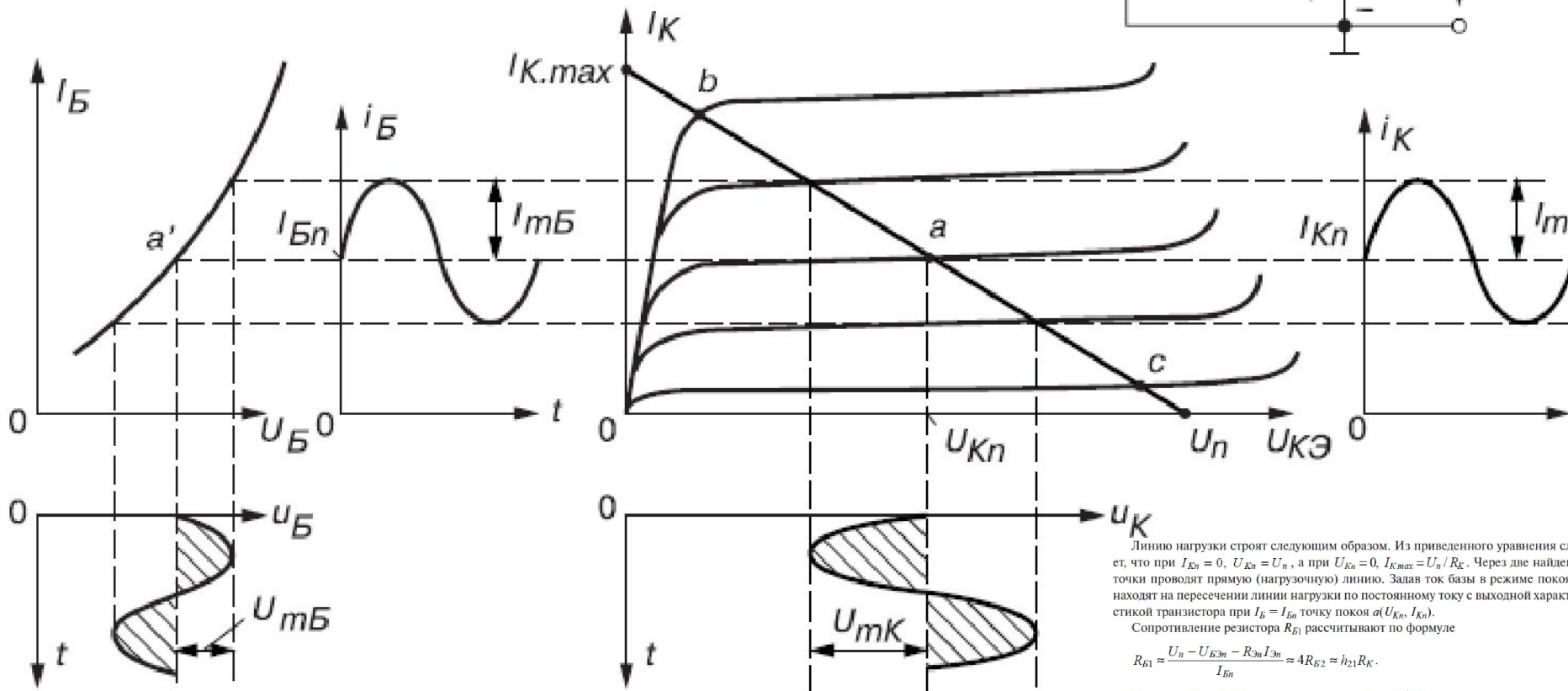
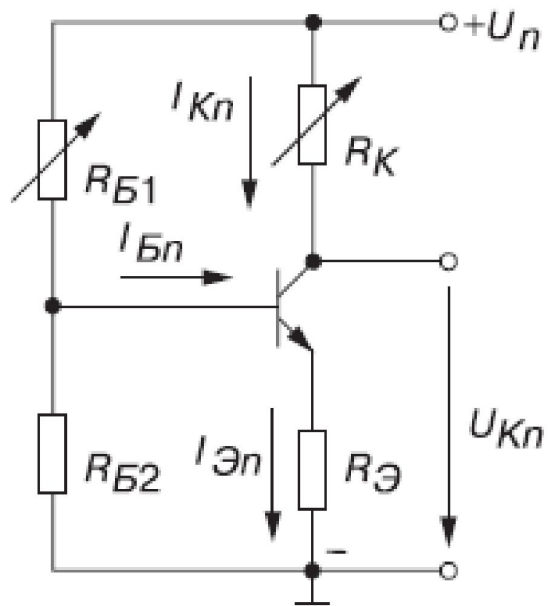
Класс усиления	Напряжение смещения	Ток покоя транзистора $I_{кп}$	Зависимость тока от времени	Примечание
А	> 0	$I_{бп} h_{21Э}$		$I_{к м} < I_{к п}$
АВ	> 0	$I_{бп} h_{21Э}$		$I_{к м} < I_{к п}$ $I_{к м} < U_{п} / R_k$
В	$= 0$	$I_{к пач}$		$I_{к м} \leq U_{п} / R_k$
С	< 0	$I_{к о}$		$I_{к м} \leq U_{п} / R_k$
D	$\neq 0$	$I_{к о}$		$I_{к м} = U_{п} / R_k$

Для удобства анализа работы усилителя отдельно рассматривают его схемы замещения по постоянному и переменному току

В режиме работы усилителя по *постоянному току* для получения наименьших нелинейных искажений усищаемого сигнала рабочую точку *a* выбирают посередине рабочего участка *bc* линии нагрузки по постоянному току, описываемой уравнением

$$I_{Кн} = (U_n - U_{Кн}) / R_K,$$

где $U_{Кн} = U_{КЭ} + R_Э I_{Эн}$.

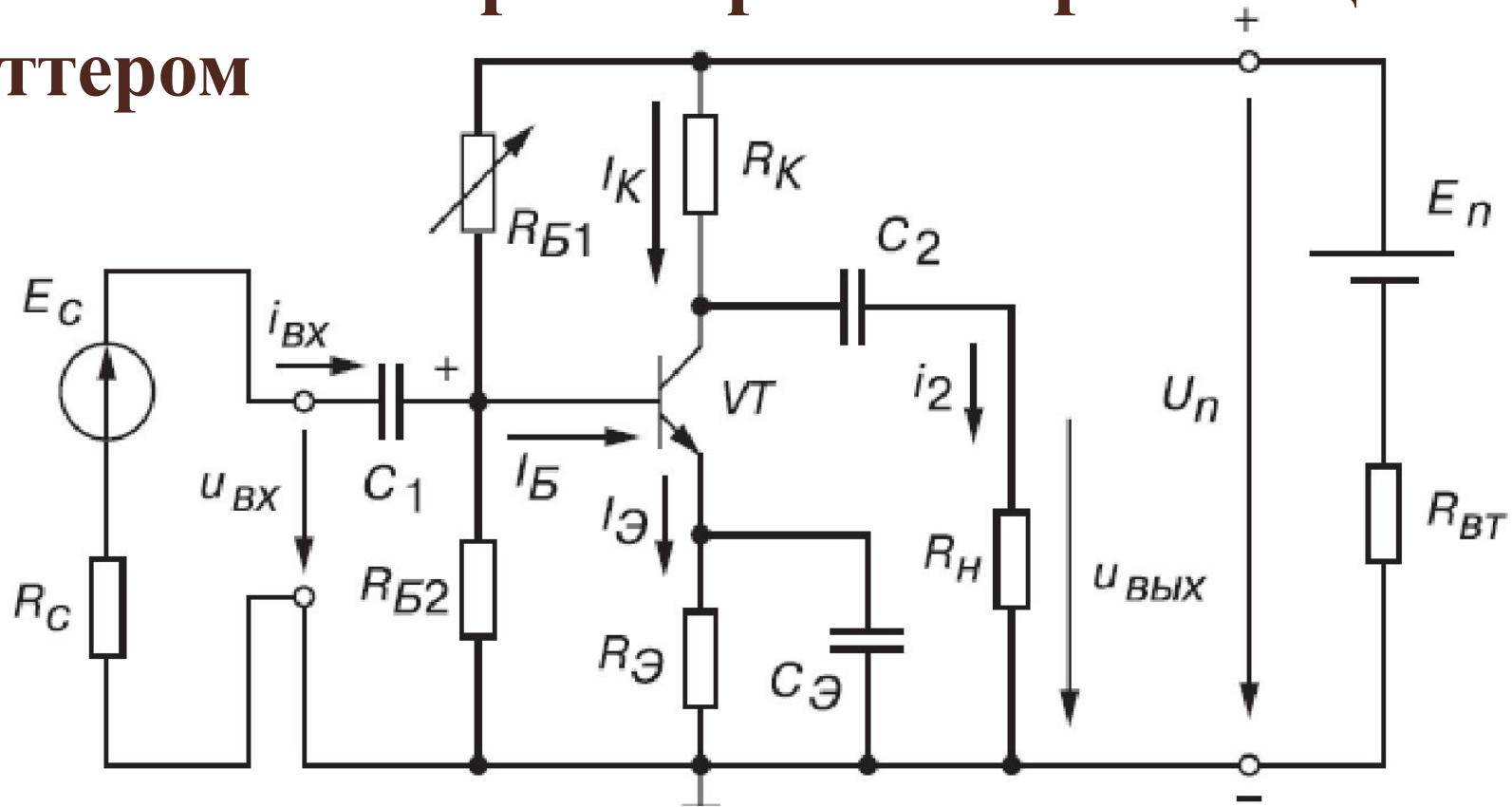


Линию нагрузки строят следующим образом. Из приведенного уравнения следует, что при $I_{Кн} = 0$, $U_{Кн} = U_n$, а при $U_{Кн} = 0$, $I_{Кнmax} = U_n / R_K$. Через две найденные точки проводят прямую (нагрузочную) линию. Задав ток базы в режиме покоя находят на пересечении линии нагрузки по постоянному току с выходной характеристикой транзистора при $I_B = I_{Бн}$ точку покоя *a* ($U_{Кн}$, $I_{Кн}$).
Сопrotивление резистора R_{B1} рассчитывают по формуле

$$R_{B1} = \frac{U_n - U_{Бн} - R_{Эн} I_{Эн}}{I_{Бн}} \approx 4R_{B2} \approx h_{21} R_K.$$

При этом $U_{Бн} = 0,3$ В для германиевых и $U_{Бн} = 0,65$ В для кремниевых транзисторов.

Схема на биполярном транзисторе с общим эмиттером



E_c , R_c и E_n , R_{em} — источники входного сигнала и питания транзистора с соответствующими внутренними сопротивлениями; $u_{вх}$ — напряжение входного сигнала;

$R_{Б1}$ и $R_{Б2}$ — резисторы делителя напряжения питания U_n (обычно напряжение $U_n = 10-30$ В), предназначенные для установки тока базы I_B транзистора (по постоянному току), т. е. рабочей точки (точки покоя) на линии нагрузки;

$R_Э$ — резистор обратной отрицательной связи транзистора VT по постоянному току, подбором сопротивления которого обеспечивается температурная стабилизация его режима усиления. Так, при увеличении температуры возрастают постоянные составляющие токов коллектора I_K и эмиттера $I_Э$ и происходит падение напряжения $R_Э I_Э$. В результате напряжение $U_{БЭ}$ уменьшается, что вызывает уменьшение тока базы I_B , и, следовательно, тока I_K , стабилизируя его;

$C_Э$ — конденсатор большой ёмкости (десятки микрофарад), шунтирующий сопротивление резистора $R_Э$ по переменному току, что исключает ослабление усиливаемого сигнала по переменному току цепью обратной связи;

$R_К$ — нагрузочный резистор, сопротивление которого ограничивает ток коллектора I_K транзистора VT ;

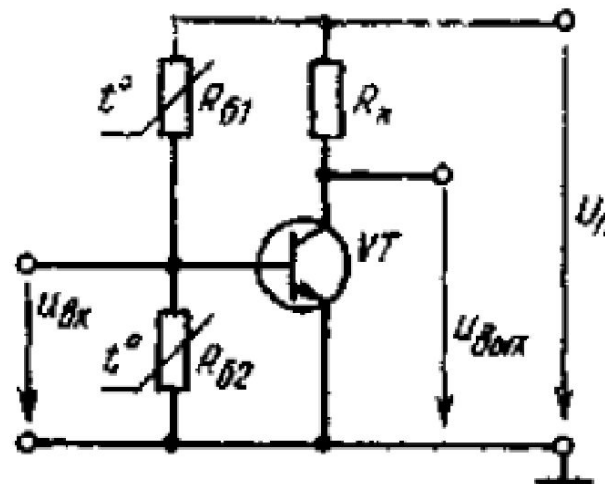
Основные параметры каскада усиления по схеме с ОЭ сильно зависят от внешних возмущающих воздействий: изменение температуры окружающей среды, вызывающей, во-первых, изменение обратного тока коллекторного перехода, во-вторых, изменение напряжения эмиттерного перехода транзистора, и, в-третьих, изменение его коэффициента передачи тока, изменение напряжения питания, изменение сопротивления нагрузки и т. п. Эти изменения принято характеризовать понятием — дрейф нуля усилителя.

Дрейфом, нуля наз. изменение выходного напряжения или тока усилителя, не связанное с воздействием входного сигнала, а обусловленное изменением режимов работы его элементов вследствие воздействия различных внешних дестабилизирующих факторов.

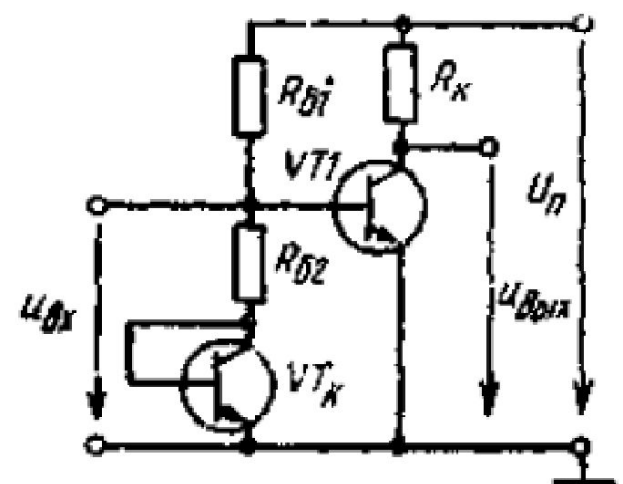
Существуют три основных метода стабилизации режима работы транзисторного каскада: термокомпенсация; параметрическая стабилизация; введение цепей отрицательной обратной связи.

Метод термокомпенсации базируется на том, что внешними конструктивными и схемотехническими решениями стараются исключить воздействие на транзисторный каскад нежелательных возмущений.

Метод параметрическая стабилизация



а)



б)

Введение цепей отрицательной обратной связи.

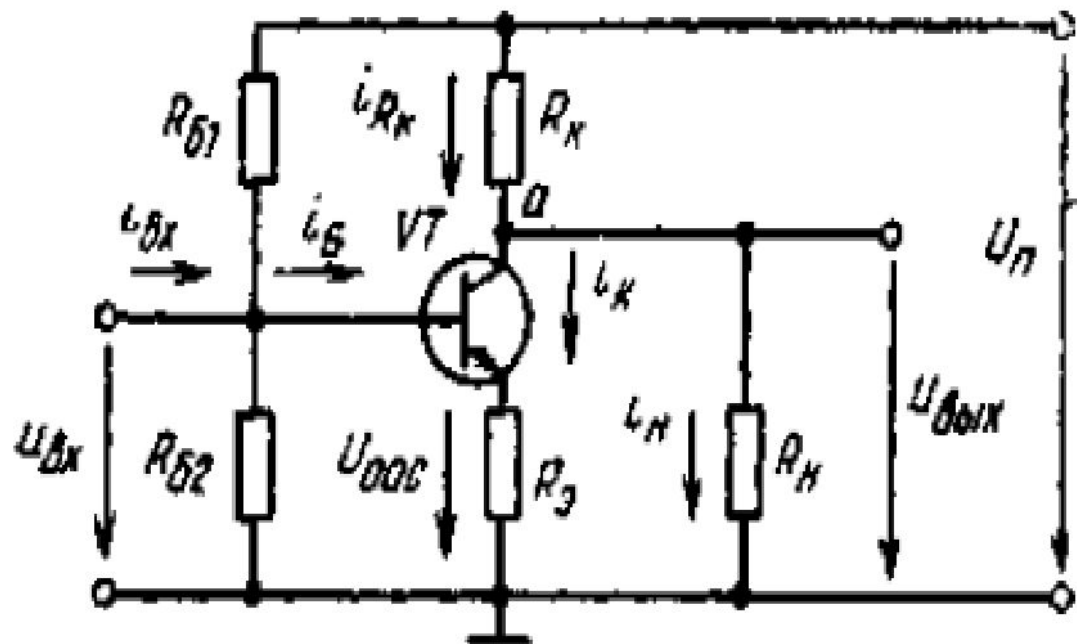
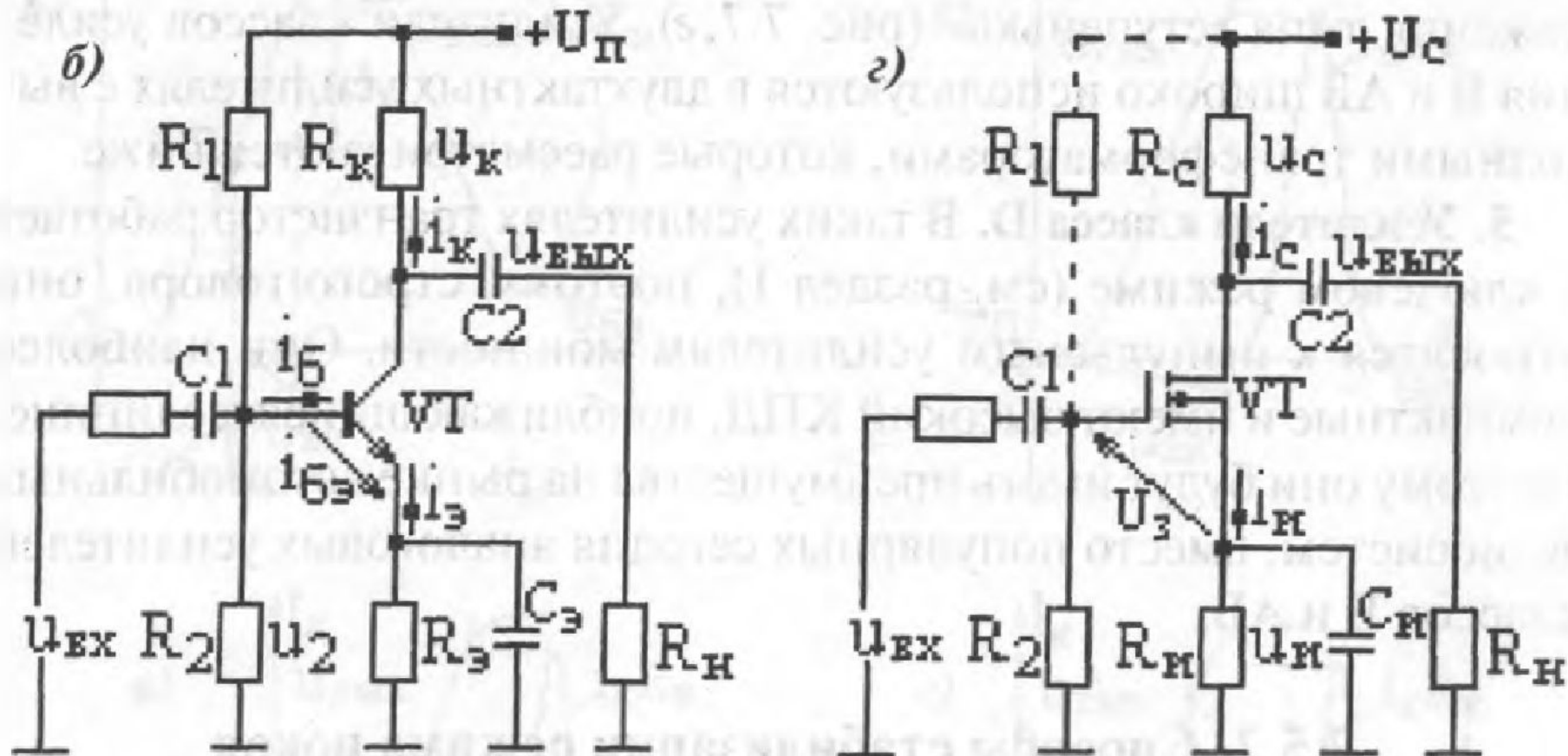


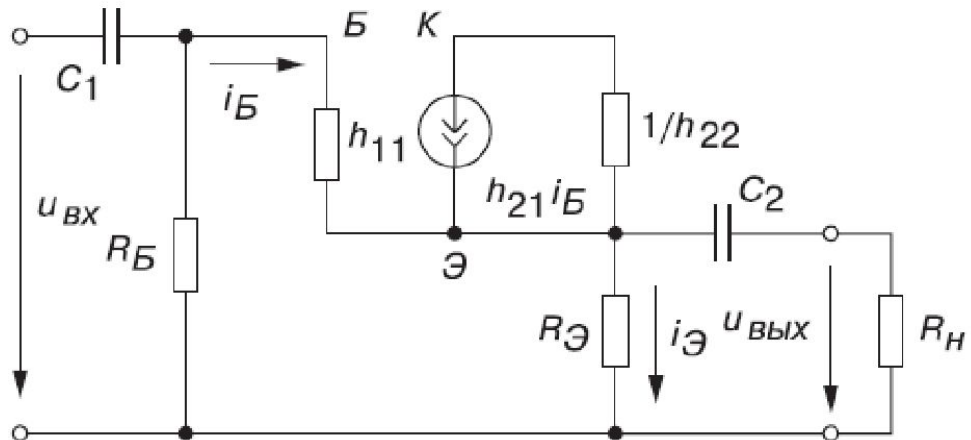
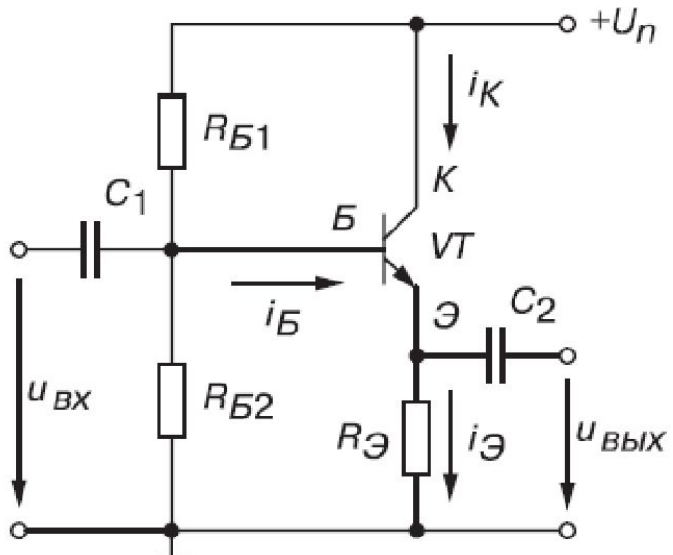
Рис. 6.7. Транзисторный каскад с целью последовательной ООС по току нагрузки

Полевой транзистор, как известно, *управляется по входной цепи напряжением*, а не током. Поэтому, строго говоря, здесь не обязателен делитель напряжения R/R_2 , как в усилителе с биполярным транзистором. Достаточно резисторы $R_{\text{н}}$ и R_2 (рис. 7.8,г). При этом резистор $R_{\text{н}}$ обеспечивает последовательную ООС по току нагрузки, что приводит к стабилизации ТП. Резистор R_2 при этом выполняет роль *цепи смещения* (падение напряжения на $R_{\text{н}}$ с отрицательным знаком передаётся на затвор транзистора VT через общую шину). Он выбирается достаточно большим (порядка 1 МОм). Поскольку же ток затвора полевого транзистора пренебрежимо мал, то напряжение на R_2 близко к нулю.



Эмиттерный (истоковый) повторитель

В каскаде, собранном на биполярном транзисторе с общим коллектором (эмиттерном повторителе), выходное напряжение $u_{вых}$ (через разделительный конденсатор C_2) снимается с резистора $R_э$, включенного в цепь эмиттера



При отсутствии сигнала $u_{вх}$ на входе в цепи базы протекает ток покоя

$$I_{Bн} = U_n / \left[\left(R_{B1} + \frac{(R_{Bэ} + R_э)R_{B2}}{R_{Bэ} + R_э + R_{B2}} \right) \cdot \frac{R_{B2}}{R_{Bэ} + R_э + R_{B2}} \right]$$

Значения сопротивлений резисторов R_{B1} и R_{B2} выбирают такими, чтобы рабочая точка в режиме покоя находилась примерно посередине рабочего участка входной характеристики транзистора VT .

При подаче переменного входного сигнала $u_{вх}$ появляется переменная составляющая эмиттерного тока $I_э$, которая создает на резисторе $R_э$ выходное напряжение $u_{вых} = R_э i_э$.

Составим систему уравнений эмиттерного повторителя (рис. 3.9, б) при $R_H \gg R_э$. В схеме замещения резисторы базовой цепи R_{B1} и R_{B2} учтены резистивным элементом $R_Б = R_{B1} R_{B2} / (R_{B1} + R_{B2})$.

Усилитель постоянного тока должен усиливать как постоянную, так и переменную составляющие входного сигнала, из-за чего возникает ряд сложных проблем.

Во-первых, как было показано ранее, постоянное напряжение U_{CONST} , обеспечивающее режим работы каскада по постоянному току, формирует на его выходе напряжение $U_{КЭ.ПОК} \neq 0$. Поэтому при отсутствии полезной составляющей входного напряжения ($U_{ВХ} = 0$) на выходе усилителя формируется некоторое постоянное напряжение, которое может трактоваться как его выходной сигнал (нарушение условия $U_{ВХ} = 0 \rightarrow U_{ВЫХ} = 0$).

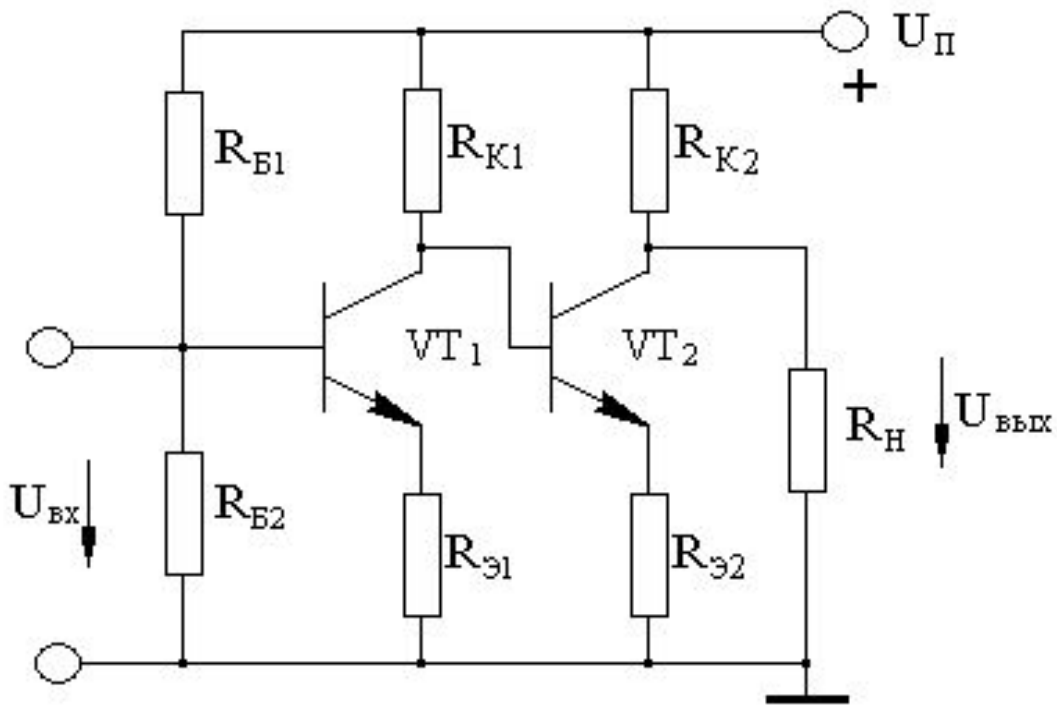
Во-вторых, если усилитель содержит несколько каскадов (рис.5.9), то для его работы должно выполняться условие:

$$U_{КЭ.ВТ1} + U_{R_{Э1}} = U_{БЭ.ВТ2} + U_{R_{Э2}}.$$

Так как из-за нелинейности входной характеристики транзистора $\Delta U_{КЭ.ВТ1} > \Delta U_{БЭ.ВТ2}$ то $\Delta U_{R_{Э2}} > \Delta U_{R_{Э1}}$, и глубина ООС в каждом последующем каскаде больше, чем в предыдущем. Соответственно коэффициент передачи каждого последующего каскада меньше, чем в предыдущем. Поэтому получение больших коэффициентов усиления в таких усилителях не возможно.

В-третьих, напомним, что под действием внешних возмущений (например, температуры) ток покоя транзистора изменяется, что приводит к изменению постоянной составляющей выходного напряжения каскада.

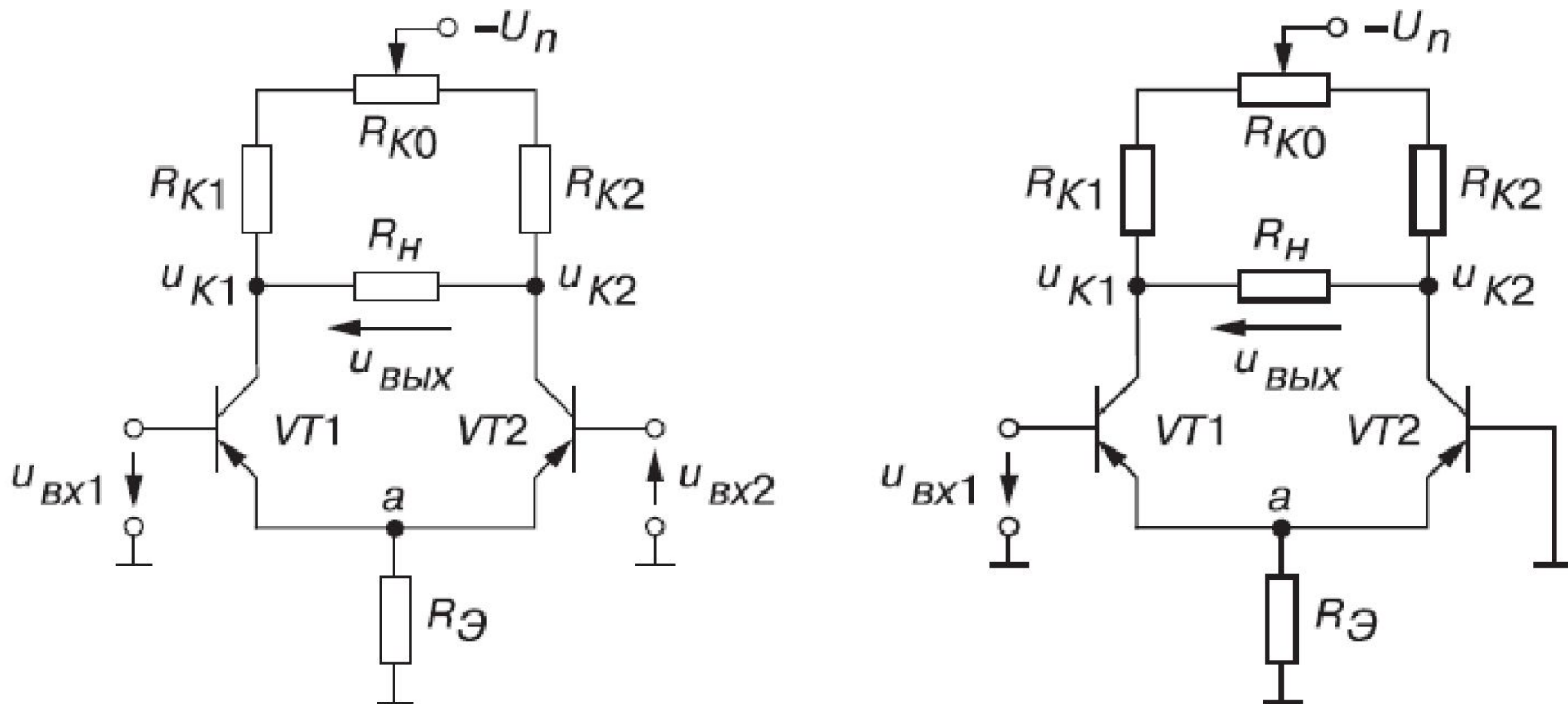
Изменения выходного напряжения или тока, не связанные с изменением входного сигнала, а обусловленные изменением режима работы элементов вследствие воздействия различных внешних дестабилизирующих факторов, называется дрейфом нуля усилителя.

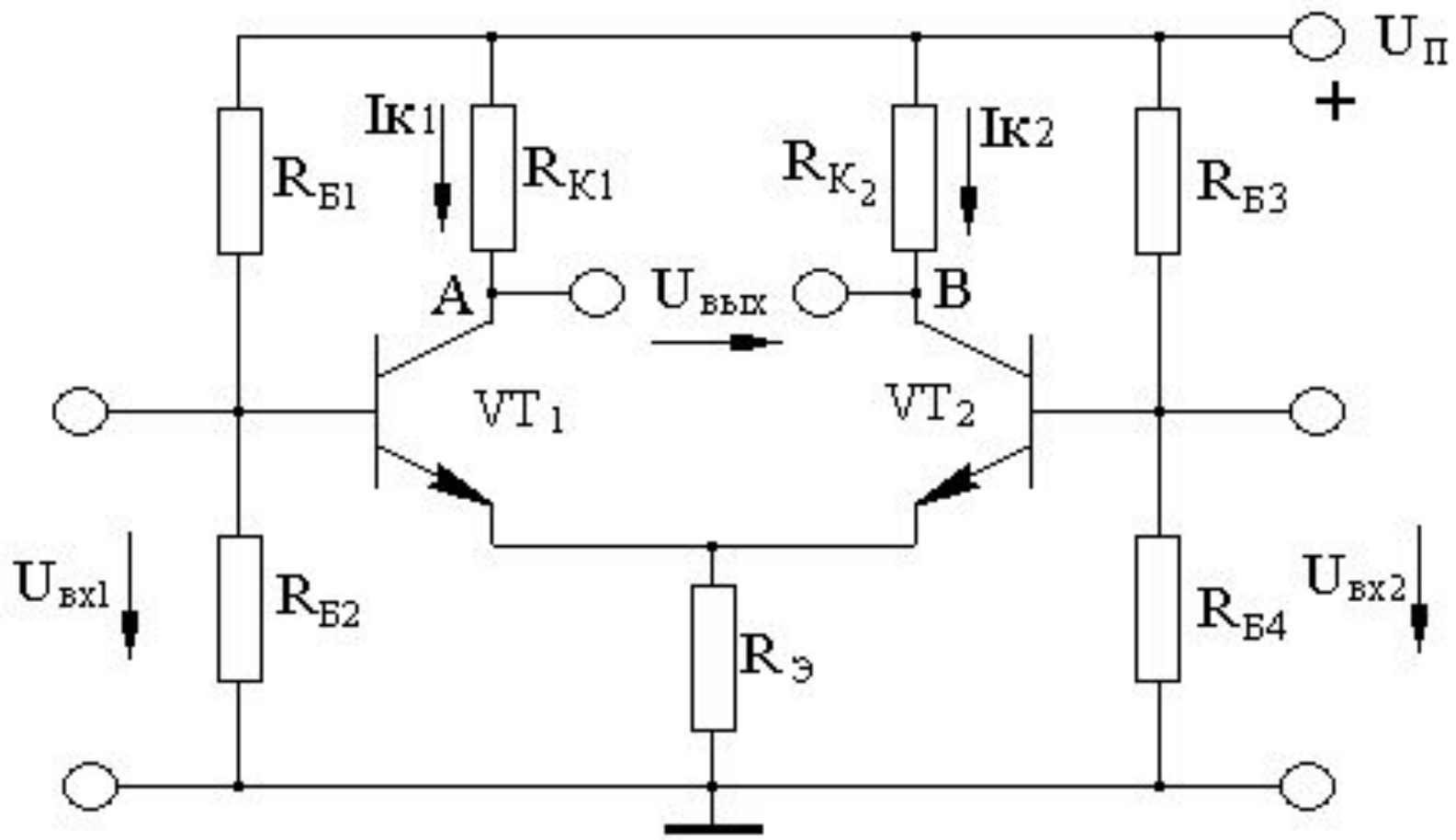
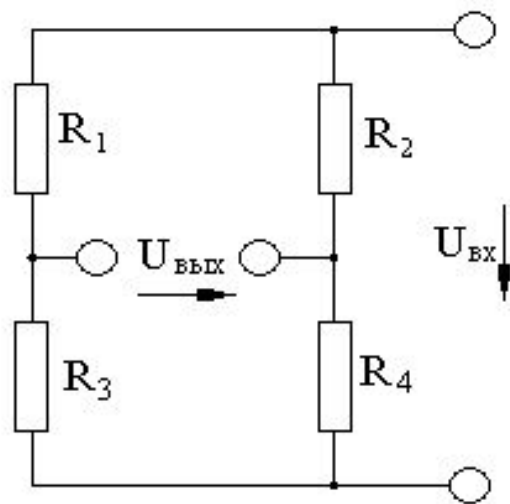


Именно дрейф нуля является основной проблемой, возникающей при проектировании усилителя постоянного тока. Решение этой проблемы достигается применением мостовых схем усилителя, построенных на двух идентичных каскадах. Напомним, что в мостовой схеме (Рис.5.10.а), при выполнении условия баланса ($R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$), изменение выходного напряжения не зависит от изменения входного. Именно этот принцип используется при построении так называемых дифференциальных каскадов усиления

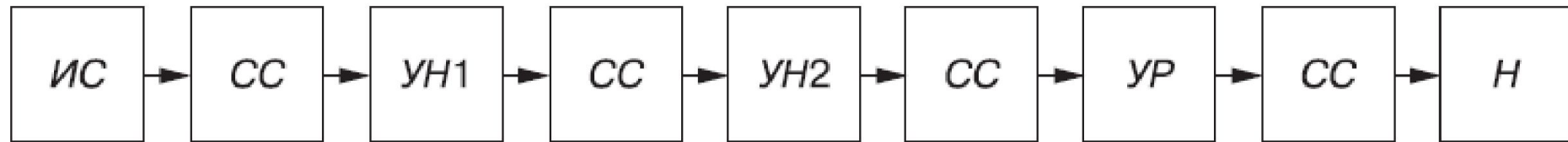
Дифференциальный усилитель

Дифференциальный усилитель — это балансный (мостовой) усилитель постоянного тока с параллельным включением транзисторов с одинаковыми характеристиками, в котором коллекторные сопротивления R_{K1} и R_{K2} и внутренние сопротивления транзисторов $VT1$ и $VT2$ образуют плечи моста. Резистор R_{K0} служит для балансировки каскада (установки нуля). Цепи смещения транзисторов не показаны

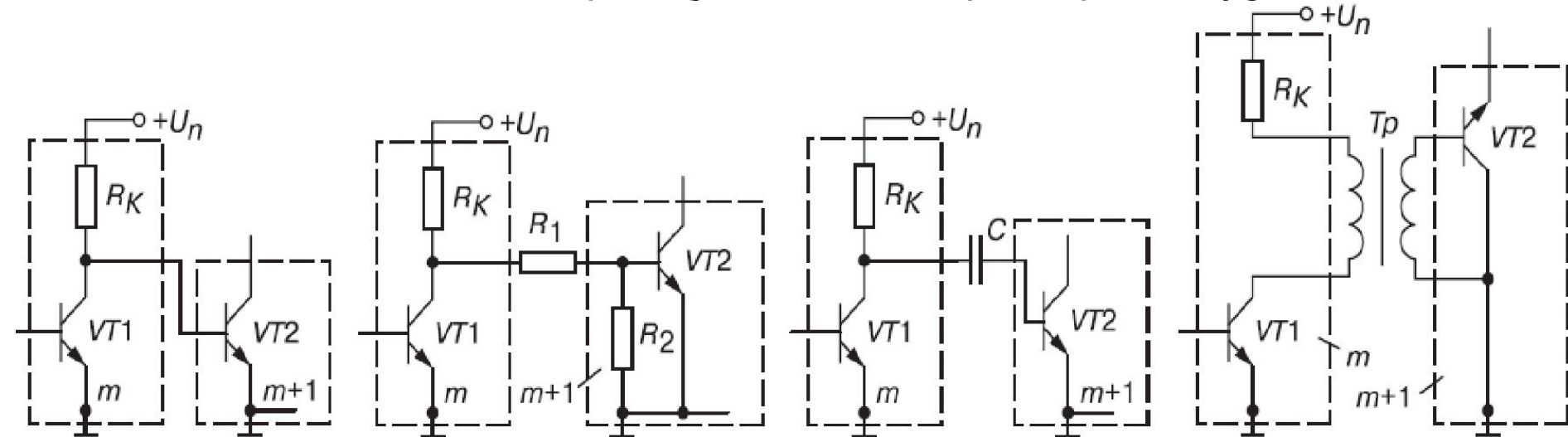




Каскадное (последовательное) соединение усилителей используют для получения заданных высоких коэффициентов усиления по напряжению, току и мощности, которых невозможно достигнуть с помощью одного усилительного каскада



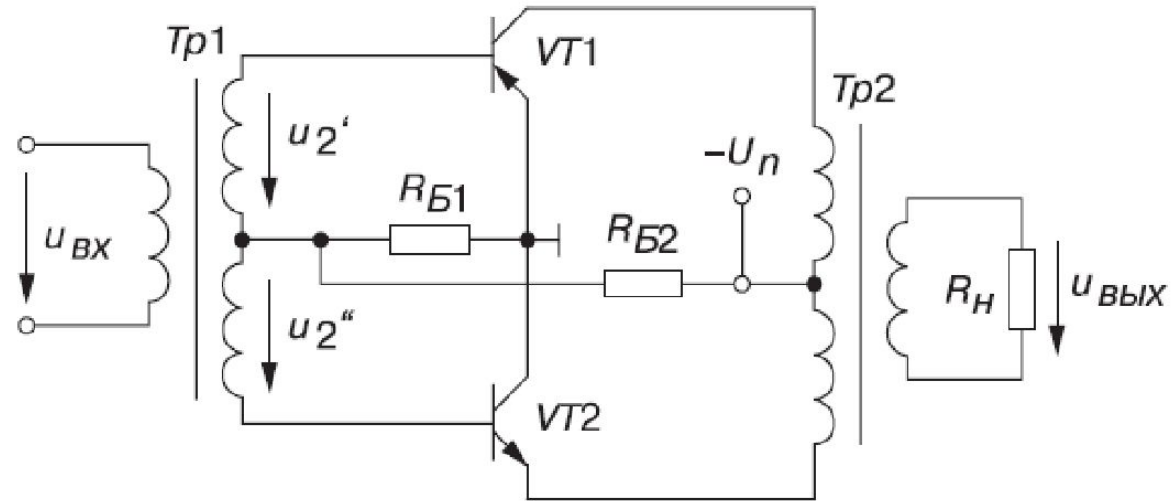
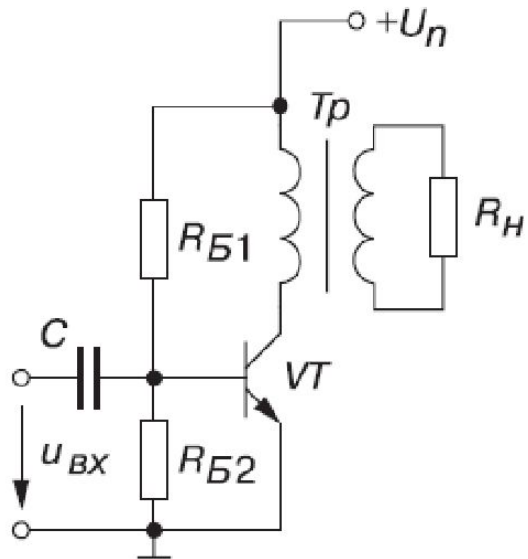
ИС - источник сигнала; УН1 и УН2 - усилители напряжения; СС - схемы связи; УР - усилитель мощности; Н - нагрузка



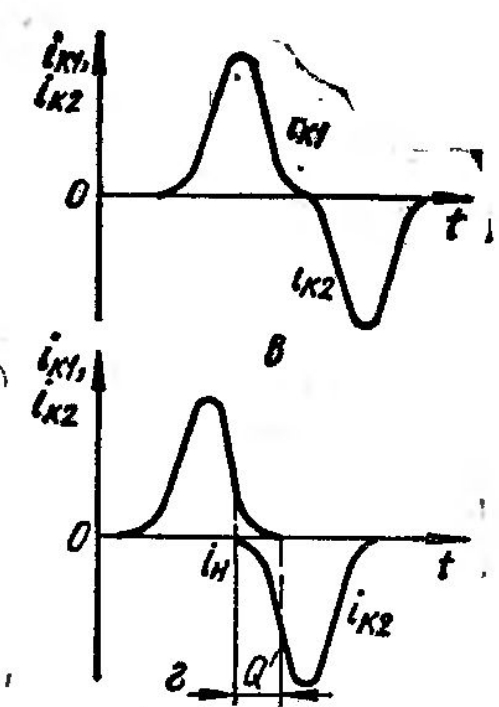
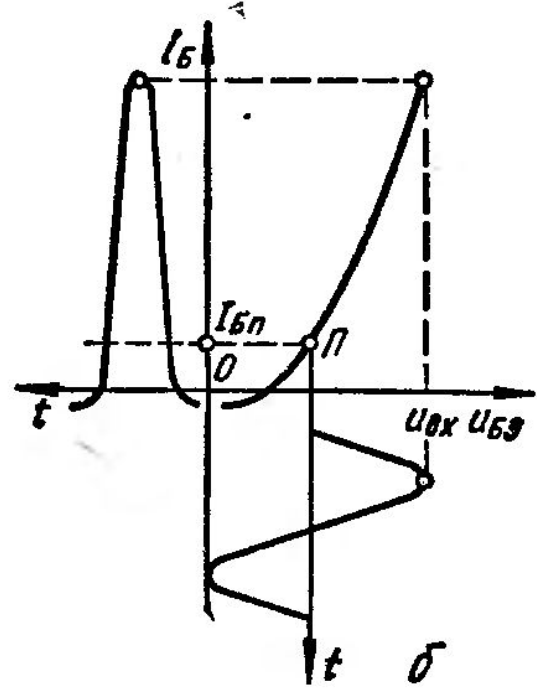
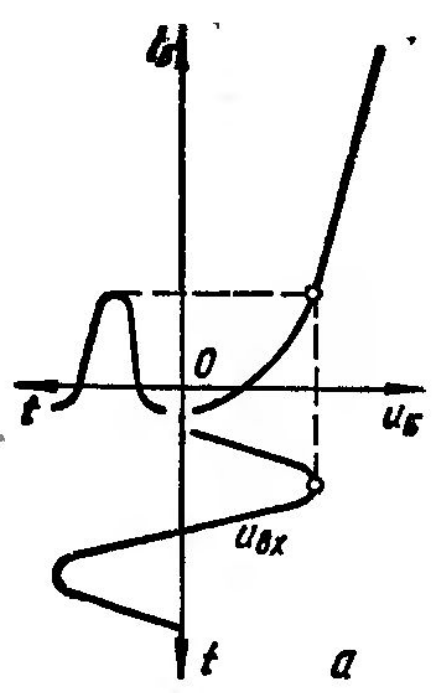
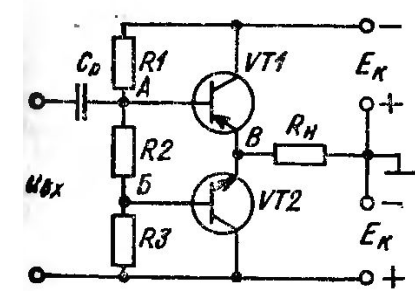
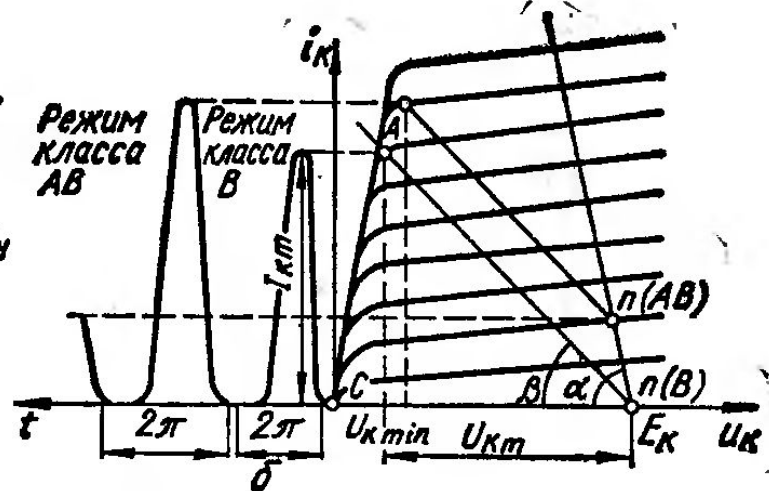
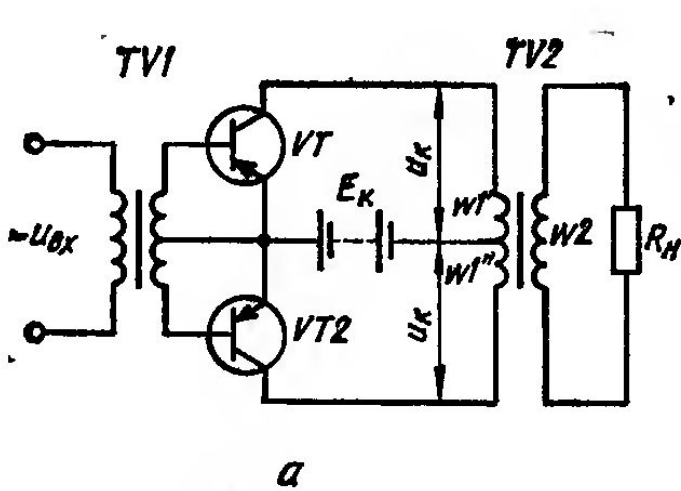
При каскадном соединении применяют различные схемы связи между каскадами, назначение которых состоит в согласовании напряжений, соответствующих режимам покоя предыдущего и последующего усилителей. При этом должны выполняться соотношения

$$U_{\text{вых.}m1} = U_{\text{вх.св.}m}, \quad U_{\text{вых.св.}m} = U_{\text{вх.}m2} \quad K_u = K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot \dots \cdot K_{un}$$

Усилители мощности предназначены для отдачи максимальной мощности в заданную нагрузку при допустимых нелинейных и частотных искажениях. Они содержат один или несколько каскадов усиления. Выходной (оконечный) каскад работает в режиме больших сигналов и, следовательно, потребляет большую мощность от источника питания. Он должен иметь достаточно высокий КПД.



$$n = \frac{w_1}{w_2} \sqrt{\frac{R_H}{\eta_{mp} R_{вых}}}$$

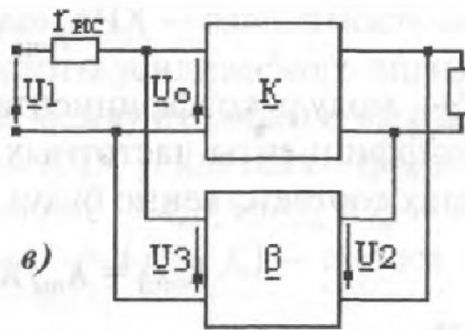
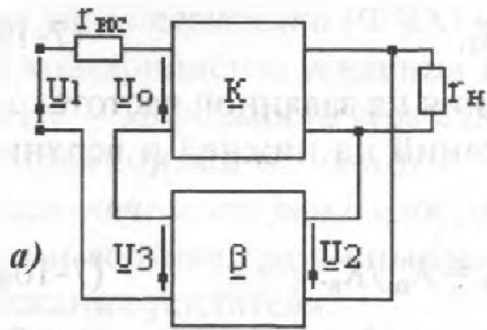


Обратные связи в усилителях

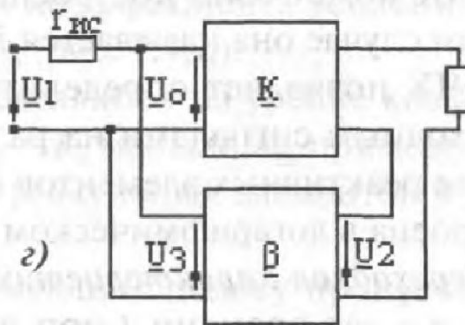
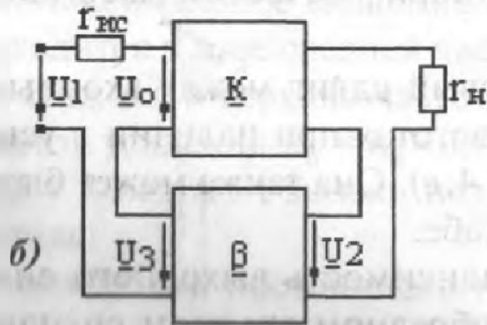
Обратной связью (ОС) называют цепь, по которой часть энергии с выхода усилителя возвращается на

его вход. Следовательно, ОС делает систему замкнутой и воздействует на все параметры и характеристики усилителя, а потому являются эффективным средством для управления им.

Различают отрицательную (ООС) и положительную (ПОС) ОС. При ООС входной сигнал и сигнал обратной связи находятся *в противофазе*, поэтому она уменьшает входной сигнал, что в свою очередь уменьшает выходной. При ПОС, наоборот, фазы входного сигнала и сигнала обратной связи *совпадают*, поэтому она



увеличивает по напряжению (а) и по току (г).



Четырёхполюсник K представляет собой усилитель с коэффициентом передачи (усиления) K при отсутствии звена ОС, который, как очевидно из рис. 7.5, а, равен

$$K = \underline{U}_2 / \underline{U}_0. \quad (7-11)$$

Четырёхполюсник β является звеном ОС с коэффициентом ОС усилителя β , который равен (рис. 7.5, а)

$$\beta = \underline{U}_3 / \underline{U}_2. \quad (7-12)$$

Коэффициент усиления усилителя, охваченного ОС

$$K = \underline{U}_2 / \underline{U}_1. \quad (7-13)$$

Из рис. 7.5, а, очевидно, что

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_1 - \underline{U}_3 \text{ или } \underline{U}_1 = \underline{U}_0 + \underline{U}_3. \quad (7-14)$$

С учётом (7-1)...(7-14)

$$\begin{aligned} K_{oc} &= \underline{U}_2 / \underline{U}_1 = \underline{K} \underline{U}_0 / (\underline{U}_0 + \underline{U}_3) = \\ &= \underline{K} \underline{U}_0 / (\underline{U}_0 + \beta \underline{U}_2) = \underline{K} \underline{U}_0 / (\underline{U}_0 + \beta \underline{K} \underline{U}_0), \end{aligned}$$

то есть

$$K_{oc} = \underline{K} / (1 + \beta \underline{K}), \quad (7-15)$$

где $(1 + \beta \underline{K})$ — называется глубиной обратной связи усилителя, а $\beta \underline{K}$ — петлевым усилением

Если глубина обратной связи достаточно велика, то $|\beta \underline{K}| \gg 1$ и

$$K_{oc} \approx 1 / \beta. \quad (7-15, a)$$

при глубокой ООС величина K_{oc} практически зависит только от коэффициента передачи звена обратной связи (β) и не зависит от K , то есть изменения K не будут оказывать существенного влияния на величину K_{oc} , поэтому ООС стабилизирует выходное напряжение усилителя. Петля — замкнутый контур: цепь ОС (местная, общая) + часть усилителя между точками усиления

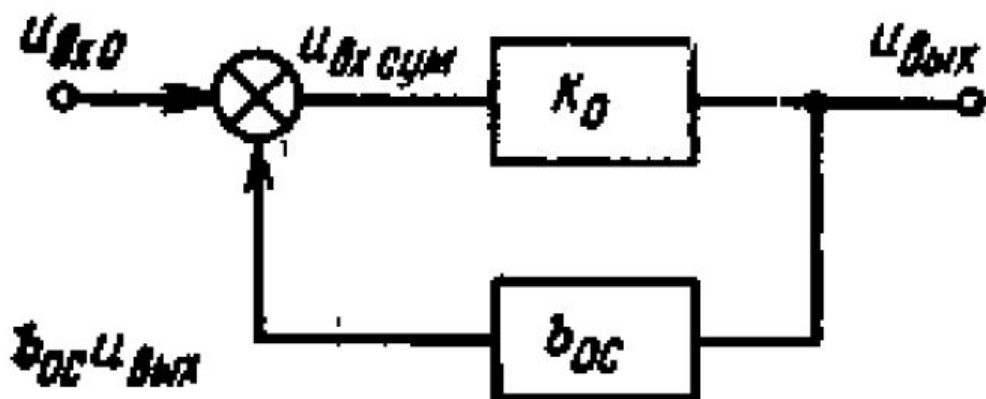


Рис. 5.21. Обобщенная структурная схема усилительного устройства с цепью обратной связи

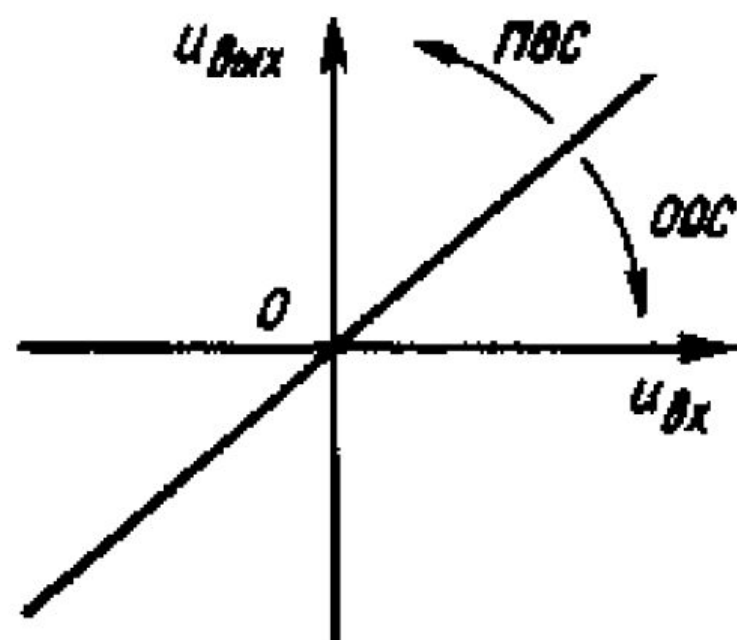
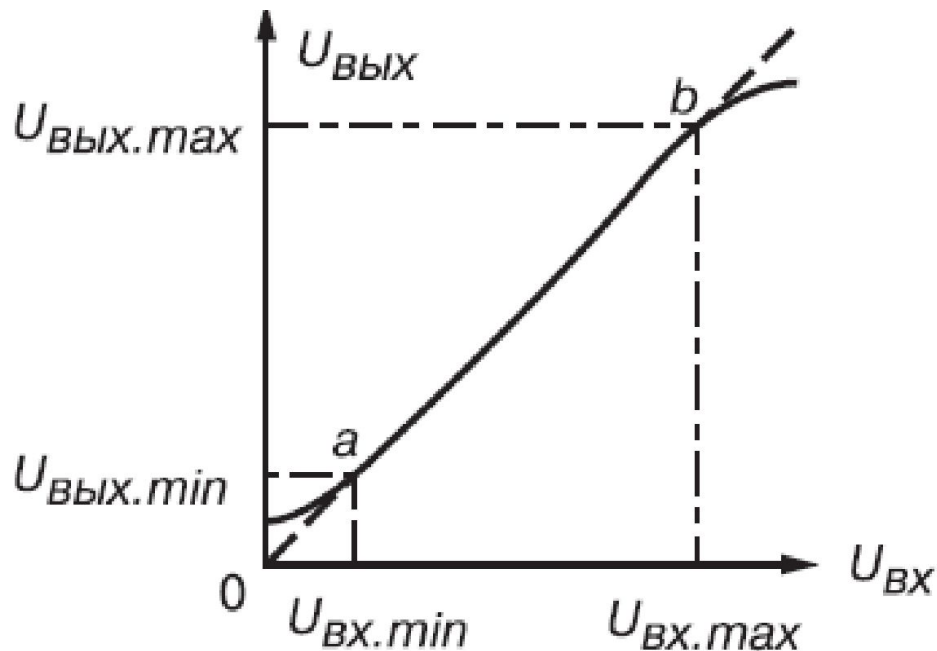


Рис. 5.22. Изменение передаточной характеристики усилительного устройства при введении различных цепей обратной связи

Параметры и характеристики усилителей

Амплитудная характеристика —

зависимость амплитуды (или действующего значения) выходного сигнала от амплитуды (или действующего значения) входного синусоидального сигнала, т. е. $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$.



Динамический диапазон усиления

$$D = U_{\text{вх. макс.}} / U_{\text{вх. мин.}}$$

$$D = U_{\text{вх. макс.}} / U_{\text{вх. мин.}}$$

Коэффициент усиления по напряжению на этом участке

$$K_u = \frac{U_{\text{вых. макс.}} - U_{\text{вых. мин.}}}{U_{\text{вх. макс.}} - U_{\text{вх. мин.}}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}}$$

Коэффициент усиления — отношение установившихся значений выходного и входного сигналов усилителя. В зависимости от типа усиливаемой величины различают коэффициенты усиления:

по напряжению $K_U = \Delta U_2 / \Delta U_1$;

по току $K_I = \Delta I_2 / \Delta I_1$;

по мощности $K_P = \Delta P_2 / \Delta P_1$,

где U_1, U_2, I_1, I_2 — действующие напряжения и токи.

Так как $\Delta P_1 = \Delta U_1 \Delta I_1$ и $\Delta P_2 = \Delta U_2 \Delta I_2$, то коэффициент усиления по мощности $K_P = K_U K_I$.

Коэффициент усиления по напряжению на этом участке

$$K_u = \frac{U_{\text{вых.max}} - U_{\text{вых.min}}}{U_{\text{вх.max}} - U_{\text{вх.min}}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}}.$$

При каскадном соединении нескольких усилительных устройств произведение их коэффициентов усиления определяет общий коэффициент усиления системы, т. е.

$$K_{\text{общ}} = K_1 K_2 \dots K_n. \quad (5.1)$$

В общем случае коэффициенты усиления являются комплексными величинами, что отражает наличие фазовых искажений усиливаемого сигнала.

В электронике и автоматике широко используют логарифмические единицы оценки коэффициента усиления, который выражается в децибелах. Тогда коэффициент усиления по мощности

$$K_P \text{ [дБ]} = 10 \lg (P_2/P_1) = 10 \lg K_P. \quad (5.2)$$

Поскольку мощность пропорциональна квадрату тока или напряжения, для коэффициентов усиления по току и напряжению можно записать соответственно:

$$K_I \text{ [дБ]} = 20 \lg (I_2/I_1) = 20 \lg K_I;$$

$$K_U \text{ [дБ]} = 20 \lg (U_2/U_1) = 20 \lg K_U.$$

Логарифмическая мера оценки удобна при анализе многокаскадных усилителей. Действительно, общий коэффициент усиления многокаскадного усилителя при переходе к логарифмическим единицам измерения определяется в отличие от (5.2) суммой коэффициентов усиления отдельных каскадов, т. е. $K_{\text{общ}} \text{ [дБ]} = K_1 \text{ [дБ]} + K_2 \text{ [дБ]} + \dots + K_n \text{ [дБ]}$.

Введение ООС в усилителях уменьшает его коэффициент усиления и расширяет его полосу пропускания, **ПОС** – увеличивает коэффициент усиления и сужает его полосу пропускания

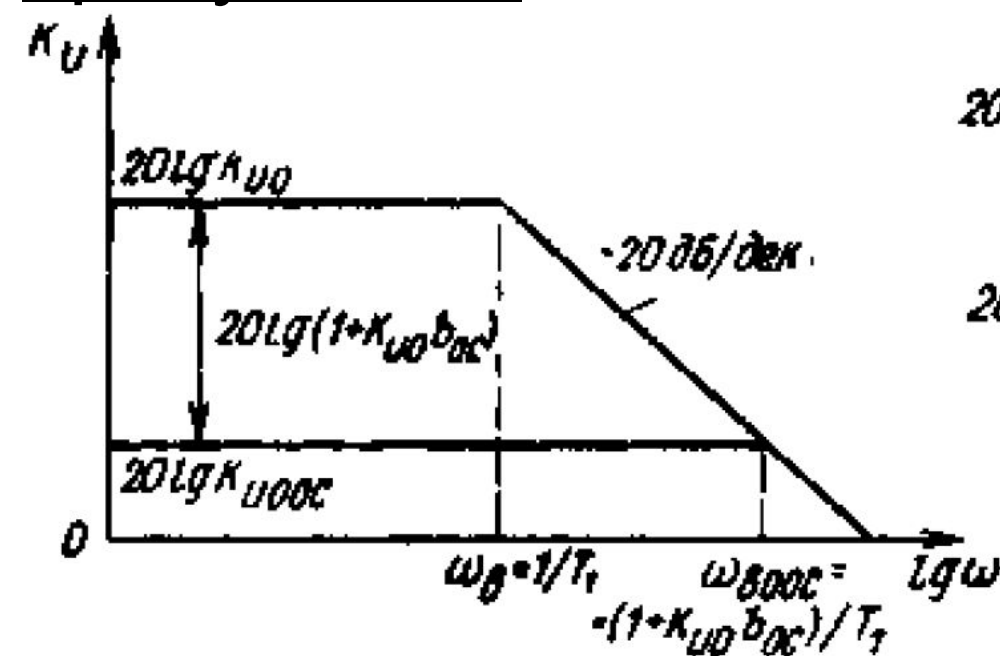


Рис. 5.25. Изменение ЛАЧХ усилителя при введении цепи ООС

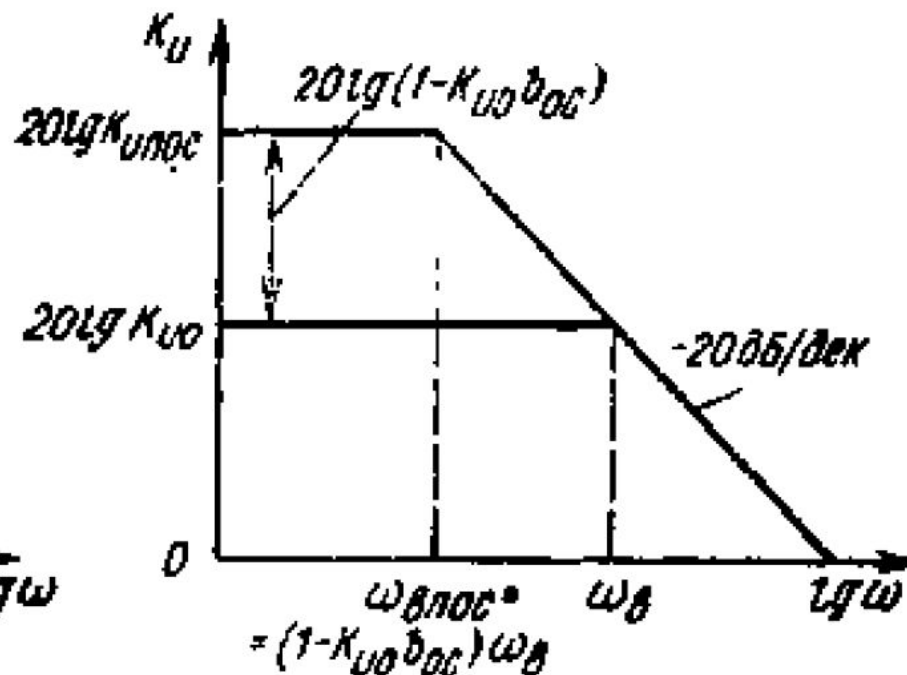


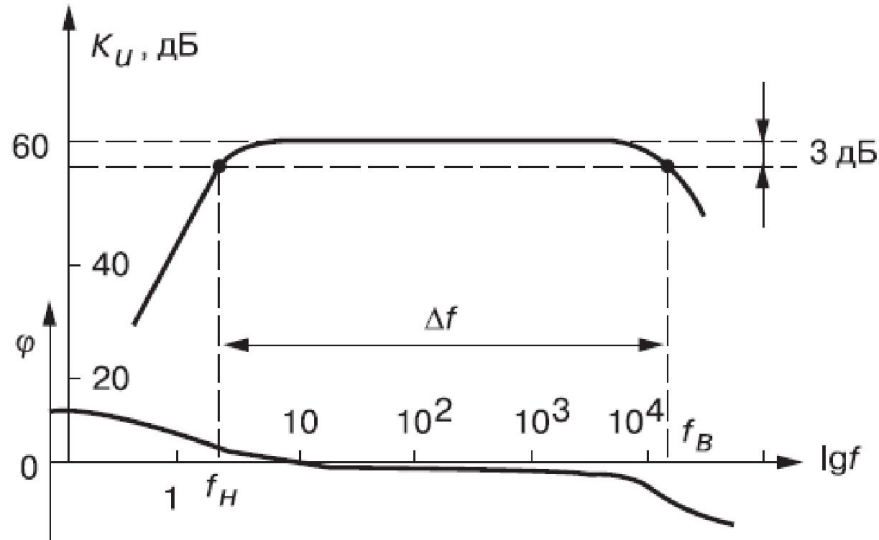
Рис. 5.26. Изменение ЛАЧХ усилителя при введении цепи ПОС

Амплитудночастотная

характеристика (АЧХ) — это зависимость коэффициента усиления, например, по напряжению K_u от частоты f входного сигнала

Фазочастотная

характеристика (φ) — зависимость угла сдвига фаз между выходным и входным напряжениями усилителя от частоты f . Фазовые искажения в усилителе отсутствуют, когда фазовый сдвиг линейно зависит от частоты



Полоса пропускания усилителя определяет диапазон частот f (или ω), в пределах которой коэффициент усиления на средней частоте не снижается ниже $1/\sqrt{2} \approx 0,707$ (3 дБ) своего уровня: $f = f_B - f_H$, где f_B и f_H — верхняя и нижняя частоты среза АЧХ усилителя

Уровень шума — это отношение напряжения шумов U_w в режиме покоя (приведенного к входу усилителя) к максимальному значению выходного напряжения $U_{вых.мах}$ в децибелах:

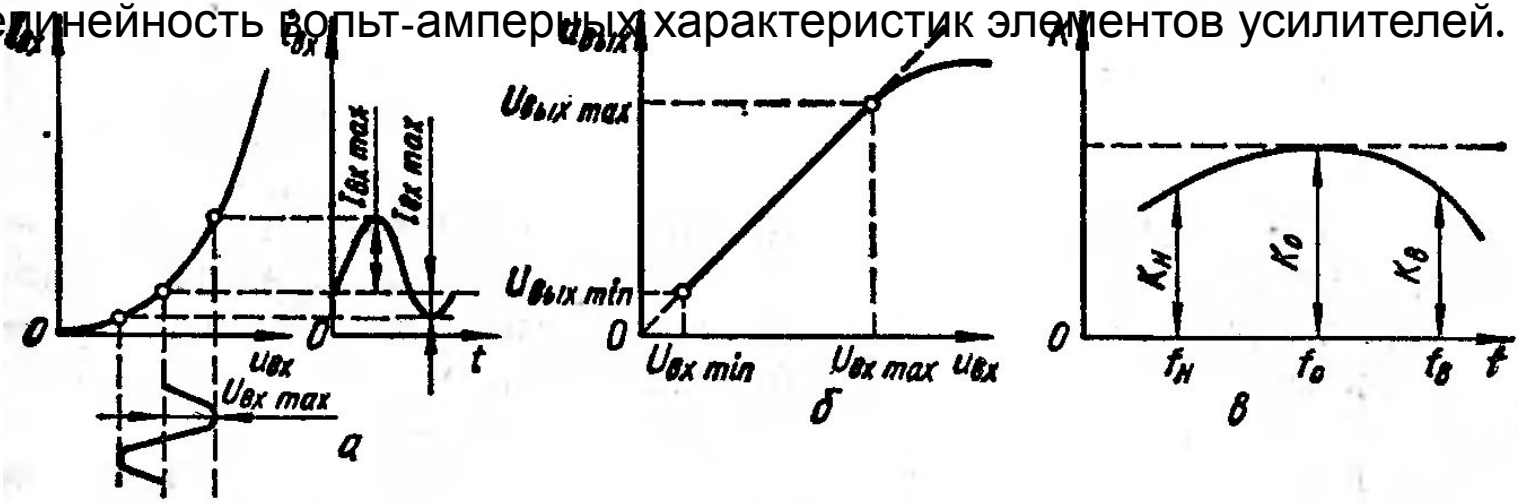
$$K_{ш} = 20 \lg(U_w / U_{вых.мах}).$$

Коэффициент нелинейных искажений

$$K_{н.л.} = \frac{\sqrt{U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \dots}}{U_{m1}},$$

Точность воспроизведения формы усиливаемого сигнала. В реальном усилителе сигнал на выходе, кроме временной задержки Δt , которая не вносит изменений в форму входного сигнала, содержит **нелинейные и линейные искажения.**

Основными факторами, обуславливающими **нелинейные** искажения является нелинейность вольт-амперных характеристик элементов усилителей.



Для **многоступенчатого** усилителя общий коэффициент нелинейных искажений принимается равным **сумме коэффициентов нелинейных искажений отдельных каскадов**

Коэффициент нелинейных искажений

$$K_{н.и.} = \frac{\sqrt{U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \dots}}{U_{m1}}$$

нелинейные искажения зависят от амплитуды входного сигнала $U_{вх}(f)$ и не связаны с его частотой, т. е. для уменьшения искажения формы выходного сигнала входной сигнал должен быть низкоуровневым. В многоступенчатых усилителях нелинейные искажения в основном появляются в предоконечных каскадах, на вход

Линейные искажения в усилителях, в основном, объясняются зависимостью коэффициента передачи по току α и реактивных сопротивлений элементов схемы от частоты. Принято оценивать характер линейных искажений по амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристикам усилителя. АЧХ показывает зависимость модуля коэффициента усиления от частоты входного сигнала (рис. 6.2, в). Идеальная АЧХ параллельна оси частот. Реально гармоники входного сигнала усиливаются усилителем не одинаково, так как реактивные сопротивления элементов схемы по-разному зависят от частоты и в сумме дают искажение формы и амплитуды входного сигнала. Частотные искажения характеризуются коэффициентом частотных искажений

$$M = \frac{K_0}{K_f},$$

где K_0 — модуль коэффициента усиления на средней частоте; K_f — модуль коэффициента усиления на заданной частоте. В многокаскадных усилителях суммарный коэффициент частотных искажений усиления равен произведению коэффициентов частотных искажений каскадов

Количественно частотные искажения оцениваются коэффициентом частотных искажений M , численно равным отношению коэффициента усиления в области средних частот для амплитудно-частотной характеристики к коэффициенту усиления на заданной частоте

$$M = K_U(\omega_{cp})/K_U(\omega).$$

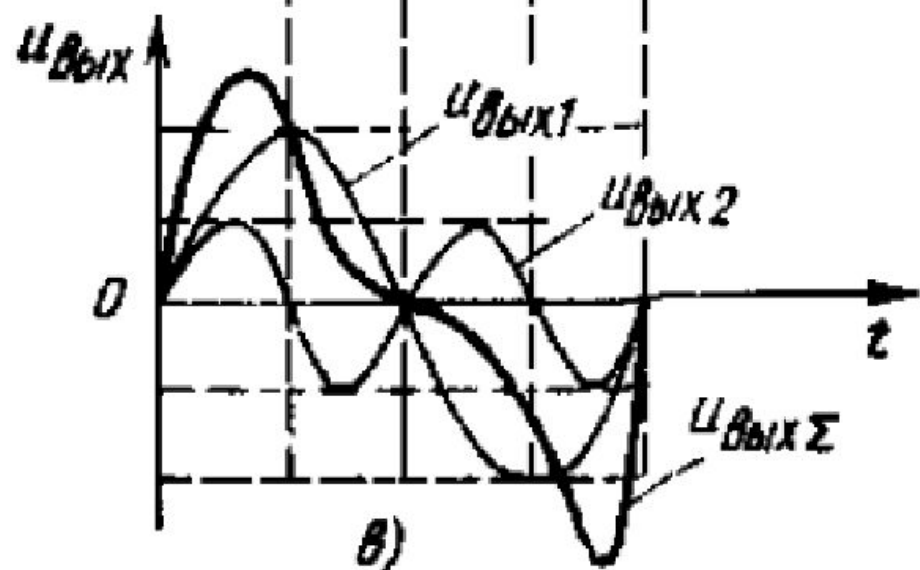
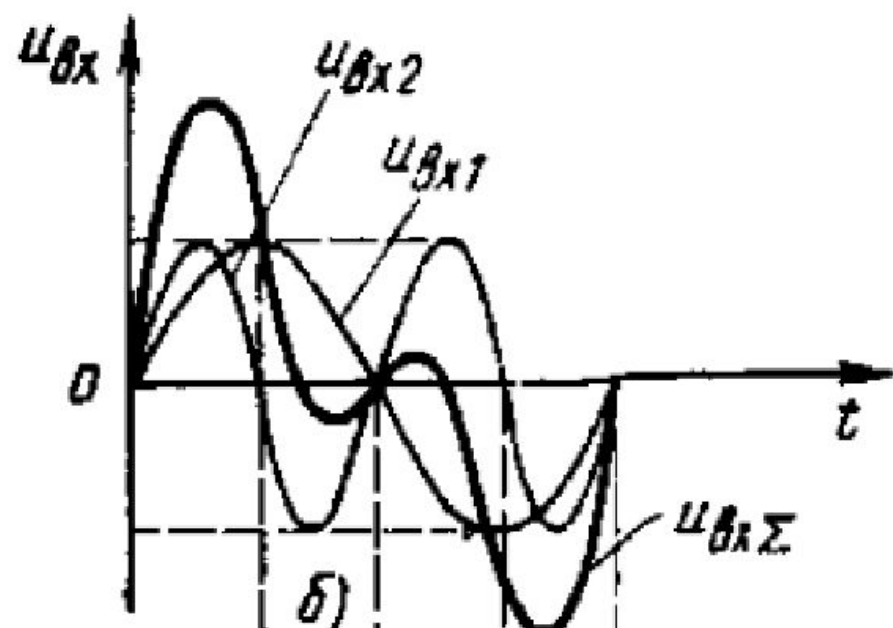
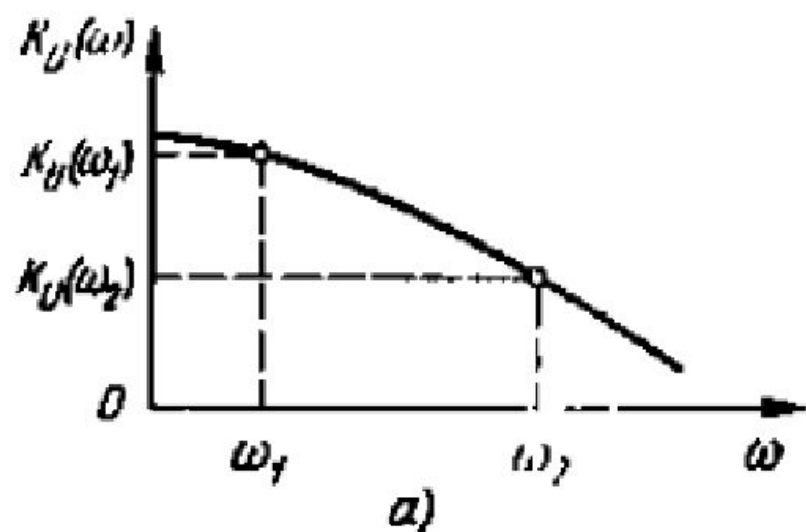


Рис. 57. Возникновение частотных искажений в усилителе
 а — амплитудно-частотная характеристика усилителя, б — входные сигналы усилителя, в — выходные сигналы усилителя

Фазовые искажения не вносят изменений в спектральный состав и соотношение гармоник сигнала. Поскольку спектральные составляющие входного сигнала приобретают в усилителе различный фазовый сдвиг, то, суммируясь на выходе, они вызывают искажение формы сигнала. Фазовые искажения отсутствуют, когда фазовый сдвиг линейно зависит от частоты. Большим частотным искажениям соответствуют большие фазовые искажения и наоборот.

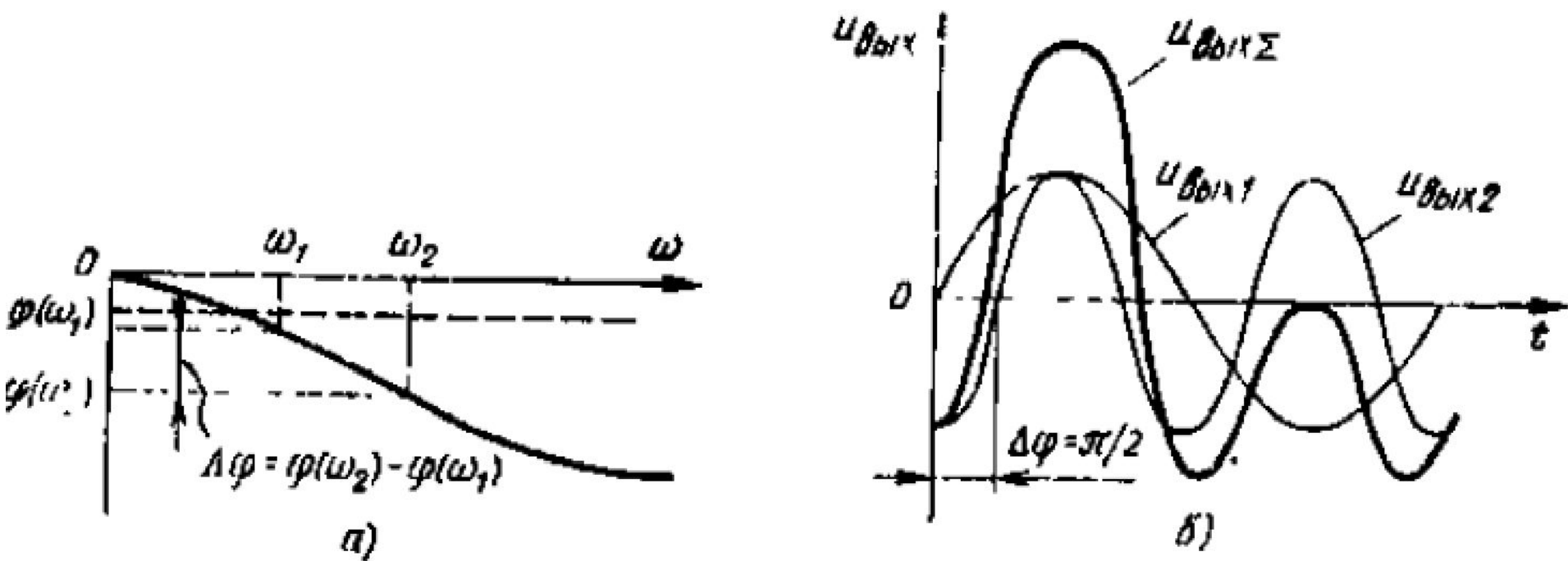


Рис. 58. Возникновение фазовых искажений в усилителе:

а — фазо-частотная характеристика усилителя; б — выходные сигналы усилителя

Введение ООС в усилителях уменьшает его
нелинейные искажения на глубину ОС
 $(1 + K_{\text{об}} \nu_{\text{ос}})$, ПОС - увеличивает

Введение ООС в усилителях увеличивает
его входное сопротивление на глубину ОС
 $(1 + K_{\text{об}} \nu_{\text{ос}})$ уменьшает

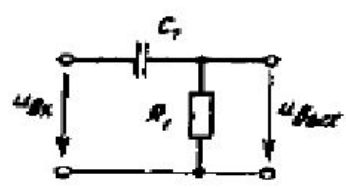
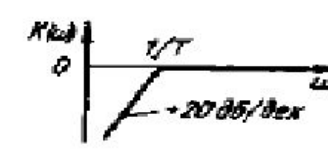
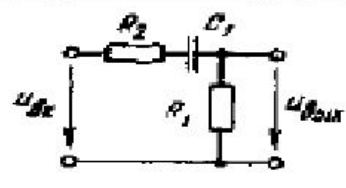
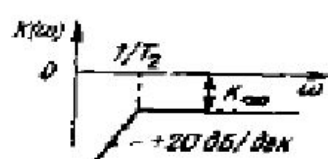
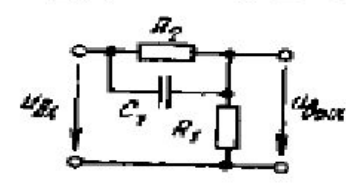
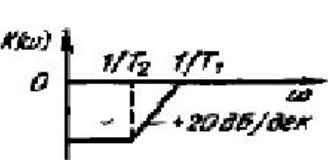
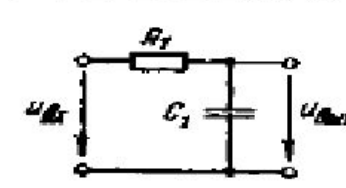

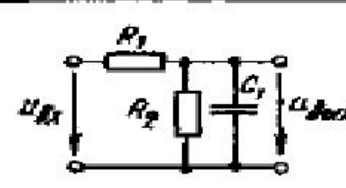
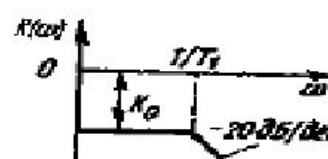
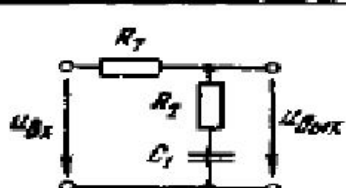
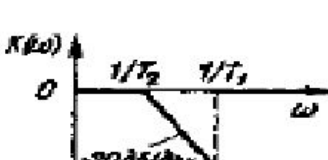
Входное и выходное сопротивления усилителя:

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = R_{\text{вх}} + jX_{\text{вх}}; \quad \underline{Z}_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}} = R_{\text{вых}} + jX_{\text{вых}}.$$

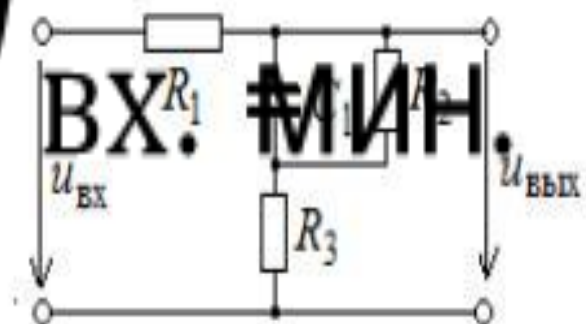
Выходная мощность при сопротивлении нагрузки R_H

$$P_{\text{вых}} = R_H I_{\text{вых}}^2.$$

Реальные цепи и соответствующие им $W(p)$ и ЛАЧХ

Звено	$W(p)$	Связь постоянной времени с параметрами	ЛАЧХ
	$\frac{T_1 p}{T_1 p + 1}$	$T_1 = R_1 C_1$	
	$\frac{T_1 p}{T_2 p + 1}$	$T_1 = R_1 C_1$ $T_2 = (R_1 + R_2) C_1$ $K_\infty = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$	
	$K_0 \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}$	$K_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ $T_1 = R_1 C_1$ $T_2 = \frac{R_1 R_2 C_1}{R_1 + R_2}$	
	$\frac{1}{T_1 p + 1}$	$T_1 = R_1 C_1$	
	$\frac{K_0}{T_1 p + 1}$	$K_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ $T_1 = \frac{R_1 R_2 C_1}{R_1 + R_2}$	
	$\frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}$	$T_1 = R_2 C_1$ $T_2 = (R_1 + R_2) C_1$ $K_\infty = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	

$$D = U_{\text{ВХ. макс.}} / U$$



$$U_{\text{ВХ. макс.}} / U_{\text{ВХ. МИ}}$$

