

УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

6.3.1. Назначение и классификация усилителей

Усилитель — это устройство, усиливающее мощность электрических сигналов за счет энергии источника электропитания.

По *роду работы* усилители подразделяют на:

- линейные (пропорциональные), у которых сигнал на выходе пропорционален входному сигналу (рис. 6.30, а);
- релейные, у которых форма сигнала на выходе отличается от формы входного сигнала, при этом выходной сигнал появляется лишь при достижении входным сигналом заданного уровня (рис. 6.30, б).

В зависимости от назначения различают усилители:

- тока;
- напряжения;
- мощности.

По *характеру спектра сигналов* усилители подразделяют на:

- усилители постоянного тока (УПТ) — усиливают электрические сигналы постоянного тока, а также переменного частотой от долей герца до нескольких килогерц;
- усилители низкой частоты (УНЧ) — от 10 Гц до 20 кГц; широкополосные усилители (ШУ) — от единиц герца до десятков мегагерц;
- избирательные усилители (ИУ) — усиливают электрические сигналы только одной частоты.

Связь между каскадами усилителя может быть:

- реостатно-емкостной (*RC*-связь) — применяется в УНЧ и ШУ;
- трансформаторной — применяется в УНЧ и ИУ;
- гальванической — применяется в УПТ (только с помощью резисторов).

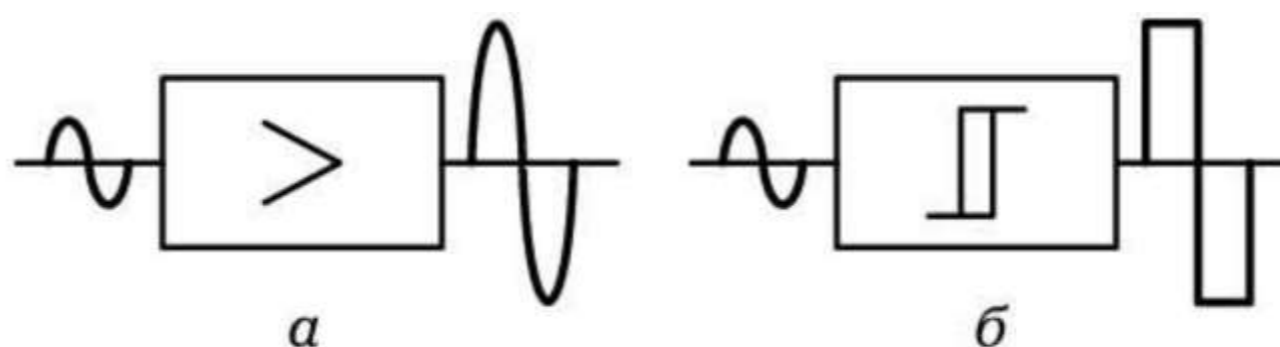


Рис. 6.30. Линейный (а) и релейный (б) усилители

6.3.2. Параметры и характеристики усилителя

Одним из основных параметров, характеризующих усилительные свойства усилителя, является *коэффициент усиления*.

Различают коэффициент усиления по напряжению $K_u = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}$ - отношение переменной составляющей напряжения на выходе к переменной составляющей напряжения на входе, а также коэффициенты усиления по току K_I и по мощности K_P - отношения выходных и входных токов и мощностей.

Коэффициент усиления многокаскадных усилителей равен произведению коэффициентов усиления каждого из каскадов: $K = \prod K_n$ -

Свойства усилителей также оцениваются:

- *амплитудной характеристикой* $U_{ВУХ} = f(U_{ВХ})$, которую снимают при средней частоте (рис. 6.31, а). Точка А соответствует $U_{ВХ} = 0$, когда на выходе $U_{ВУХ} = U_{ВХ}$ (напряжение шума); точка В — $U_{ex min}$; отрезок ВС соответствует линейному диапазону работы усилителя и определяет коэффициент усиления на средней частоте $K_0 = tg \alpha$; точка D — максимальному напряжению на входе, при котором нелинейные искажения не превышают заданного уровня (например, 5%);

- *частотной характеристикой* $K/K_0 = \psi(f)$, которая снимается в линейном диапазоне при неизменном входном сигнале и обычно изображается в логарифмическом масштабе (рис. 6.31, б). Частотная характеристика показывает, что постоянным отношение K/K_0 остается только в определенной области частот. Диапазон между нижней (f_n) и верхней (f_v) частотами определяет полосу пропускания усилителя $\Delta f = f_v - f_n$, которая находится на уровне 0,7 от максимального отношения K/K_0 .

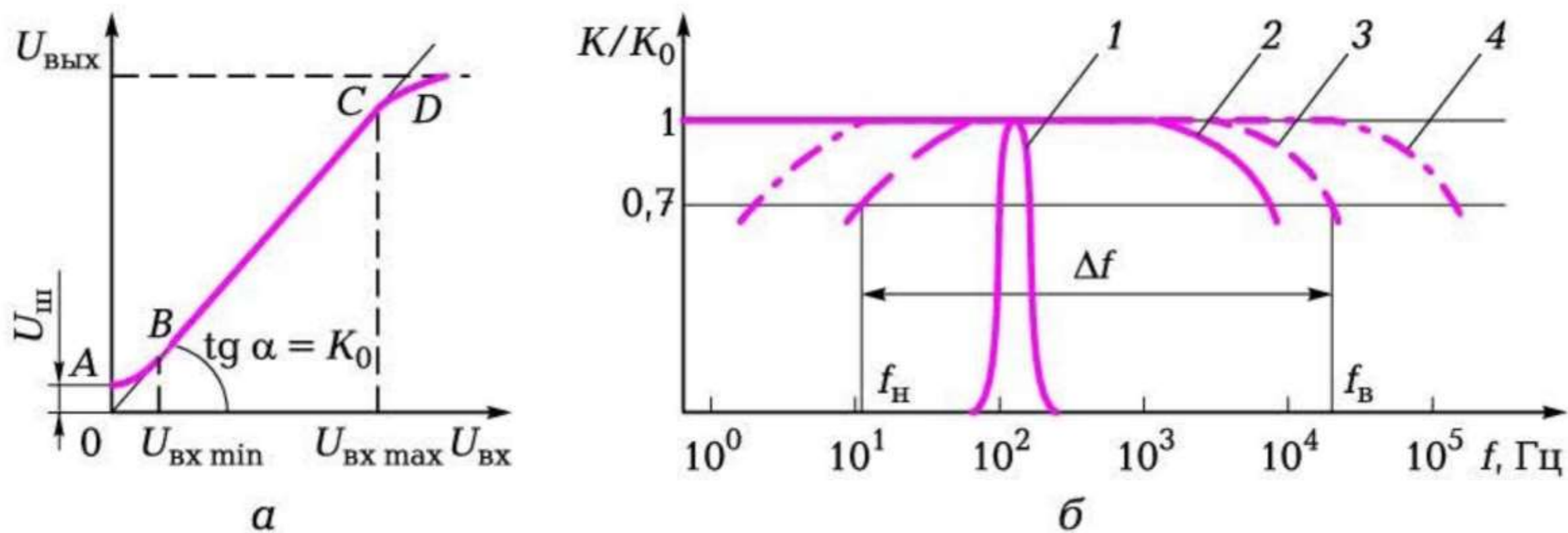


Рис. 6.31. Характеристики усилителя: а — амплитудная; б — частотные для ИУ (кривая 1), УПТ (2), УНЧ (3) и ШУ (4)

6.3.3. Принцип и режимы работы усилителя

❖ Основными элементами полупроводникового усилителя (рис. 6.32, а) являются:

- транзистор T — активный элемент с управляемой ВАХ, способный усиливать электрические сигналы U_c ;
- нагрузка R_K , включаемая последовательно с активным элементом;
- источник питания E_K (как правило, постоянного тока).

На рис. 6.32, б приведена эквивалентная схема замещения усилителя, в которой транзистор T представлен нелинейным резистором R_T . Анализ такой схемы можно выполнить, используя ВАХ транзистора и опрокинутую ВАХ нагрузки (Рисунок 6.32, в). Последняя строится по двум точкам: холостого хода ($I_K = 0$; $U_{\text{ВЫХ}} = E_K$ — точка В) и короткого замыкания ($I_K = I_{K3} = E_K / R_K$; $U_{\text{ВЫХ}} = 0$ — точка А).

❖ В зависимости от амплитуды входного сигнала и положения рабочей точки на нагрузочной прямой АВ усилитель может работать:

● в *линейном* режиме (класс А) — рабочая точка находится в средней части нагрузочной прямой и $2I_{\text{вх max}} \leq (I_{6н} - I_{6о})$. При $U_c = 0$ напряжение на выходе $U_{\text{ВЫХ}} = (U_{\text{ВЫХ.п}} = E_K / 2$. Рабочая точка находится посередине нагрузочной прямой (в точке покоя P_{II}). Появление на входе усилителя гармонического сигнала, изменяющегося по синусоидальному закону, заставляет рабочую точку перемещаться от точки P_{II} вначале, например, вверх по нагрузочной прямой, а затем на такое же расстояние от точки P_{II} вниз по нагрузочной прямой. При этом выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ вначале убывает (стремится к нулю), а затем на такую же величину возрастает (стремится к E_K). Таким образом, на выходе усилителя появляется гармонический сигнал, усиленный по сравнению с сигналом на входе в K раз. Данный режим является основным для усилителей напряжения. КПД в этом режиме около 25%;

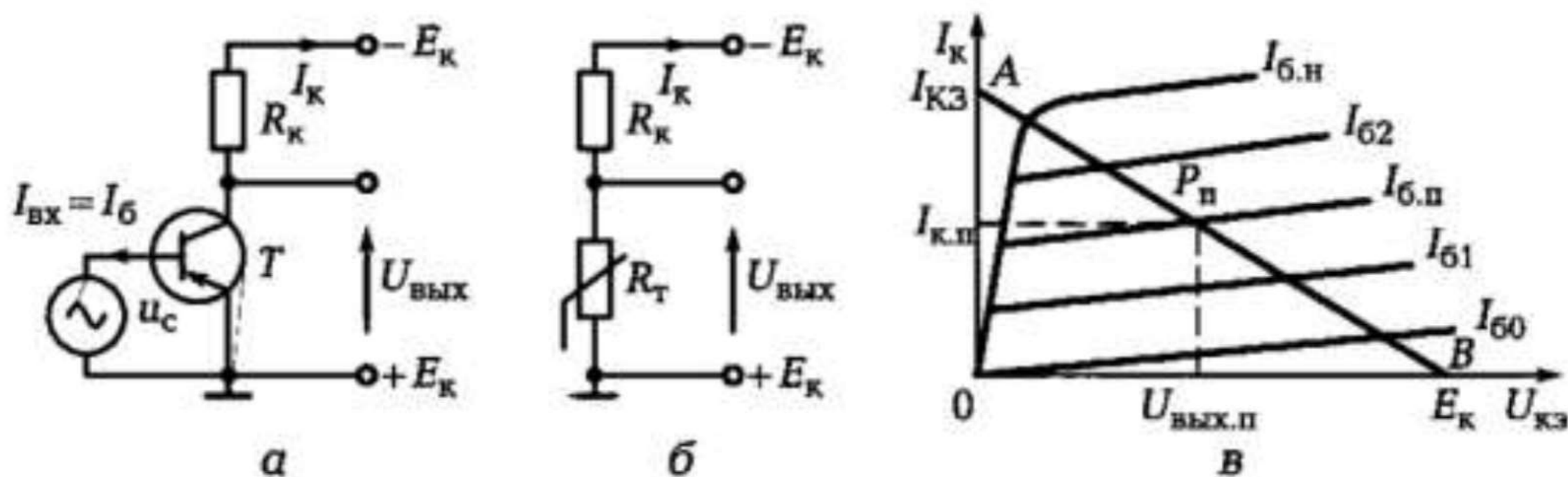


Рис. 6.32. Иллюстрации к пояснению работы усилителя: а — электрическая схема усилителя; б — схема замещения; в — ВАХ транзистора опрокинутая ВАХ и нагрузки

● в режиме *отсечки* (класс В), когда рабочая точка находится в нижней части нагрузочной прямой (совпадает с точкой В), а $I_{\text{вх max}} \leq (I_{6н} - I_{6о})$. В этом случае транзистор работает как диод, пропуская ток в одном направлении и не пропуская в обратном. На выходе транзистора формируются сигналы, аналогичные сигналам на выходе

однополупериодного выпрямителя. КПД в этом режиме около 70 %. *Данный режим используется в двухтактных усилителях мощности;*

в *ключевом* режиме (класс D), когда $I_{вхмах} \gg (I_{бн} - I_{бо})$. В этом случае транзистор работает попеременно то в режиме отсечки, то в режиме насыщения. Сопротивление его изменяется соответственно от бесконечности до нуля, а выходное напряжение — от E_k до нуля. Выходной сигнал имеет прямоугольную форму. КПД в данном режиме около 95%.

Используется этот режим в импульсных устройствах автоматики.

Пусть в исходном состоянии $I_b = I_{б.н}$. Тогда $I_k = I_{к.п}$ и $U_{ввых} = E_k - I_{к.п} R_k$. Увеличение тока базы I_b приводит к увеличению тока коллектора I_k , а следовательно, к увеличению $U_{Rk} = I_k R_k$ и уменьшению $U_{ввых} = E_k - I_k R_k$. Уменьшение тока базы I_b ведет к уменьшению и соответственно к увеличению $U_{ввых}$. Таким образом, напряжения на входе и выходе изменяются в противофазе.

Как же зафиксировать рабочую точку P на нагрузочной прямой в нужном месте? Требующийся для этого ток базы может обеспечить автономный источник, включенный между базой и эмиттером (см. рис. 6.12, а). Однако основное применение нашли схемы с использованием единого коллекторного источника питания E_k .

- ❖ Фиксация рабочей точки в этом случае может быть выполнена двумя способами:
 - изменением потенциала базы с помощью базового делителя;
 - изменением тока базы за счет включения резистора в цепь базы.

Базовый делитель $R_{б1} - R_{б2}$ включают параллельно источнику E_k (рис. 6.33, а). Это позволяет получить на базе транзистора потенциал относительно корпуса, изменяющийся от 0 до $-E_k$ в зависимости от соотношения сопротивлений резисторов $R_{б1}$ и $R_{б2}$. Рабочая точка в этом случае может быть расположена на нагрузочной прямой в любом месте между точками A и B (см. рис. 6.32, в).

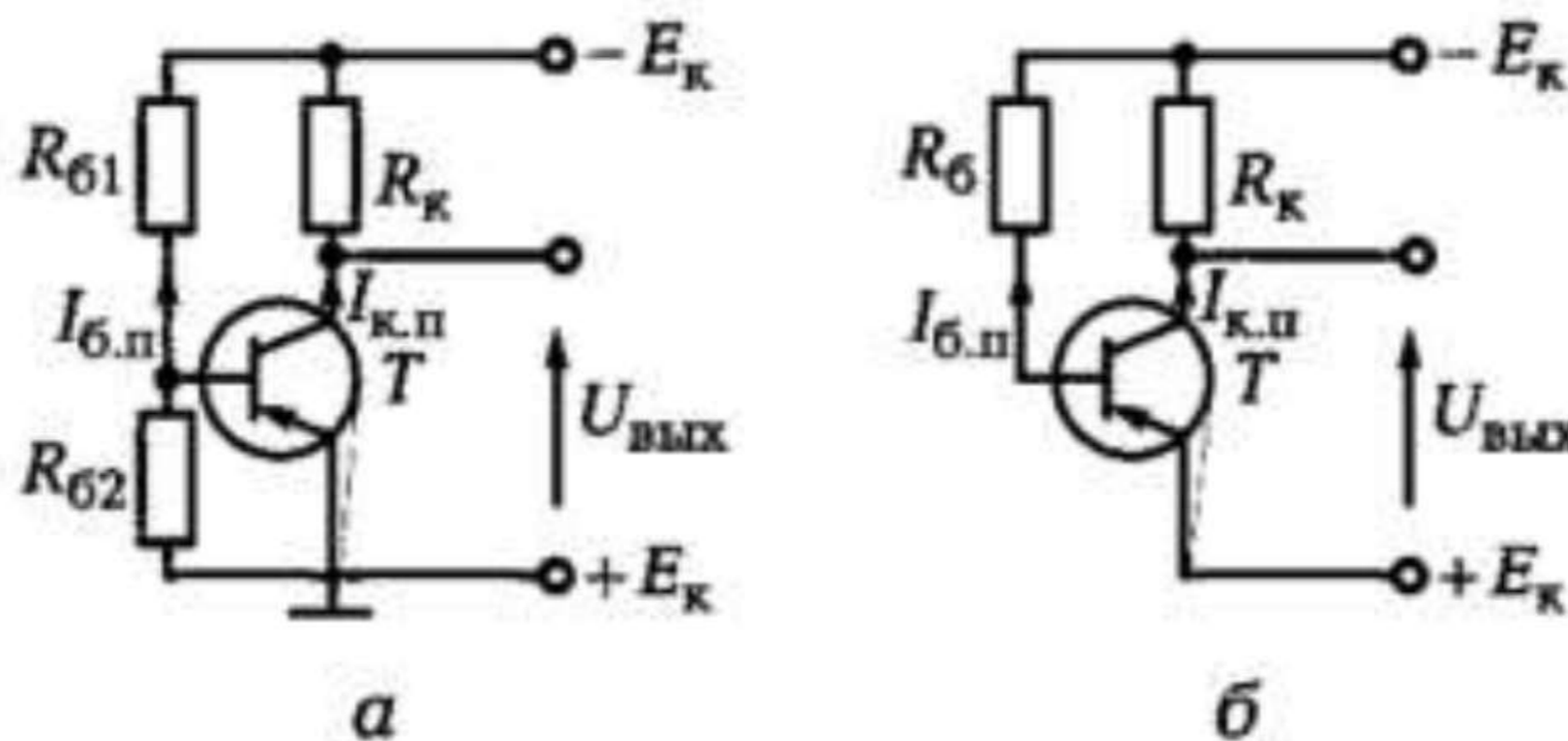


Рис. 6.33. Схемы фиксации рабочей точки: а — с помощью базового делителя, б — с помощью тока базы

Ток базы покоя $I_{б.п}$ обеспечивается также включением резистора R_b между базой транзистора и зажимом $-E_k$ (рис. 6.33, б). Изменение сопротивления резистора R_b позволяет изменять ток базы.

6.3.4. Обратная связь в усилителях

❖ Недосток транзистора — одного из основных элементов усилителя — существенная зависимость характеристик от температуры. Это требует применения в усилителях специальных схем термостабилизации за счет введения обратной связи (ОС) по постоянным составляющим тока или напряжения. *Обратной связью* в усилителе называется воздействие части выходного сигнала на вход усилителя.

Обратная связь может быть последовательной (рис. 6.34, а) и параллельной (рис. 6.34, б), причем как по постоянной составляющей сигнала, так и по переменной.

Коэффициент передачи цепи ОС определяется по формуле $\beta = U_{ос}/U_{ввых}$, т.е. представляет собой отношение напряжения $U_{ос}$, подаваемого на вход усилителя, к выходному напряжению усилителя $U_{ввых}$. Он показывает, какая часть выходного сигнала передается на вход усилителя.

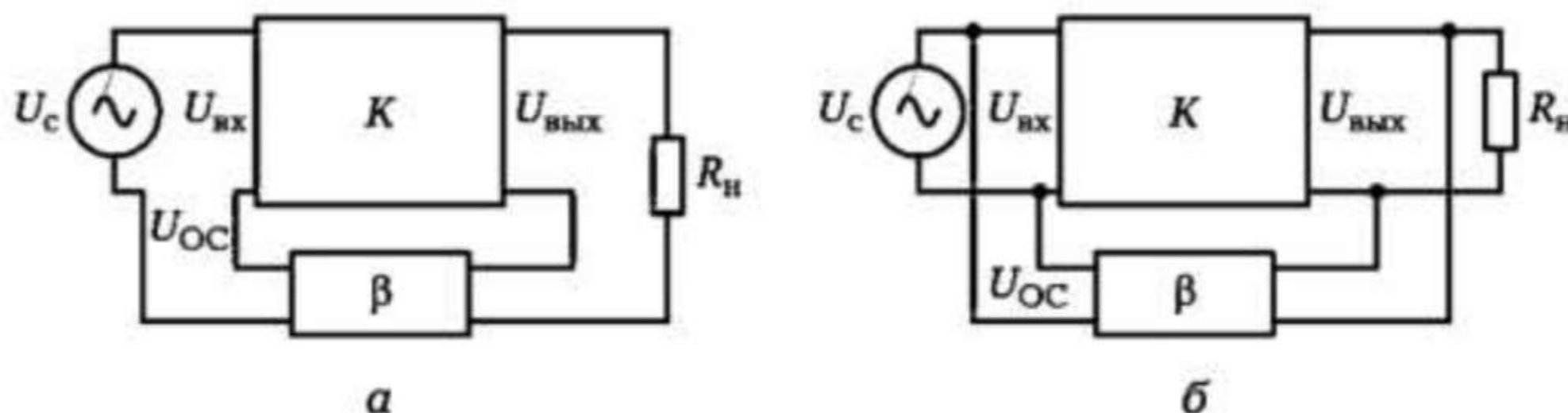


Рис. 6.34. Обратная связь в усилителях: а — последовательная; б — параллельная

❖ Если сигнал ОС на вход подается в фазе с входным сигналом ($\beta > 0$), то ОС положительна, если в противофазе ($\beta < 0$) — отрицательна.

Обратная связь оказывает влияние на коэффициент усиления усилителя.

В усилителе без ОС коэффициент усиления

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{с}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$$

При наличии положительной ОС ($\beta > 0$) напряжение на входе усилителя $U_{\text{вх}} + U_{\text{ос}}$. Тогда коэффициент усиления усилителя с положительной обратной связью

$$K_{\text{ОС}} = \frac{K}{1 - \beta K}$$

Положительная ОС вызывает увеличение коэффициента усиления усилителя. При $\beta K = 1$ обратная связь называется критической, так как в этот момент $K_{\text{ос}} \rightarrow \infty$, т. е. усилитель даже при $U_{\text{ВХ}} = 0$ имеет $U_{\text{ВЫХ}} \neq 0$, а следовательно, переходит в режим самовозбуждения (генерации).

В усилителях положительная ОС не применяется, она используется лишь в автогенераторах.

При наличии отрицательной обратной связи ($\beta < 0$) напряжение на входе усилителя $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{с}} - U_{\text{о}}$.

Отсюда

$$K_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{с}}} = \frac{K}{1 + \beta K}$$

❖ Отрицательная обратная связь (ООС) вызывает уменьшение коэффициента усиления усилителя, что позволяет повысить устойчивость его работы, т.е. исключить самовозбуждение в различных эксплуатационных условиях (при изменении напряжения питания, температуры окружающей среды, замене элементов в случае их выхода из строя и т.д.). Наличие ООС дает возможность уменьшить выходное сопротивление усилителя и увеличить его входное сопротивление, что также является положительным фактором.

Введение ООС по постоянному току позволяет повысить стабильность работы усилителя при изменении температуры окружающей среды.

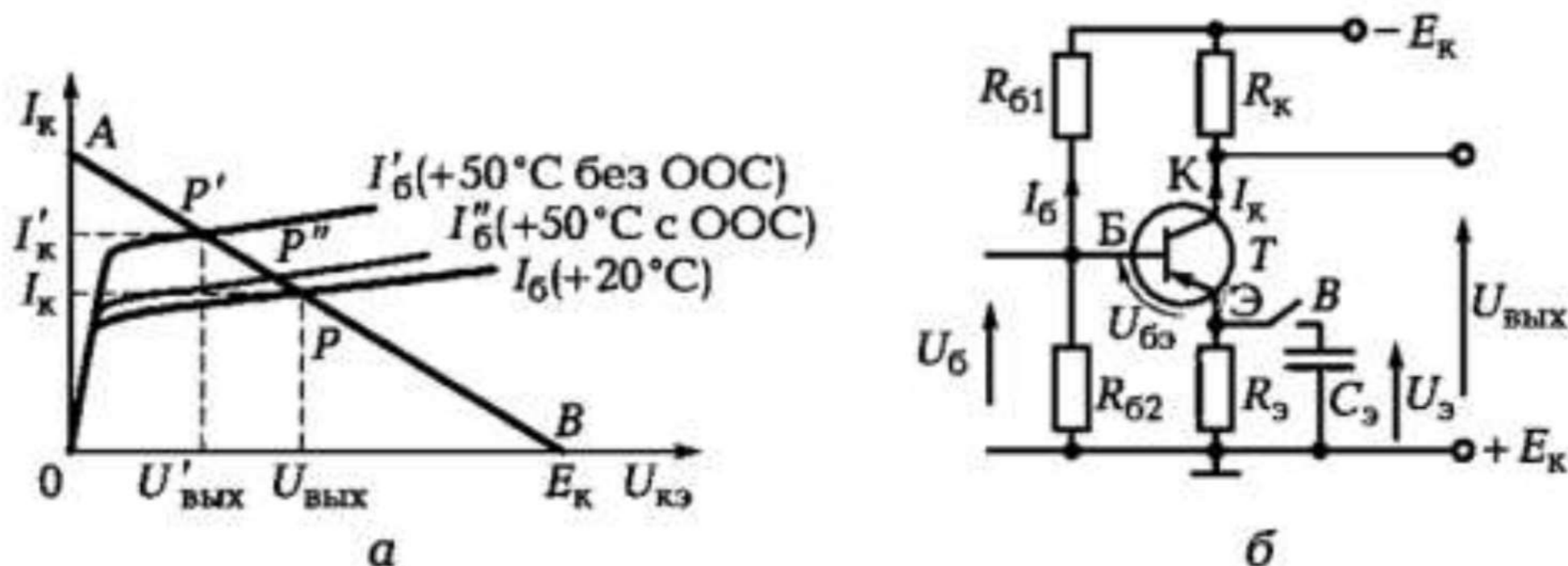


Рис. 6.35. Вольт-амперные характеристики, поясняющие принцип термостабилизации (а), и схема усилителя с термостабилизацией (б)

В схеме, показанной на рис. 6.35, б, ООС обеспечивается как по постоянному току, так и по переменному. Цепь ООС по постоянному току является цепью термостабилизации. Обратная связь по переменному току применяется для повышения устойчивости усилителя.

Если по каким-либо причинам ООС по переменному току не нужна (схема работает устойчиво, а коэффициент усиления K и так мал), то резистор R_3 шунтируют конденсатором C_3 , через который проходит переменная составляющая тока эмиттера. Для шунтирования резистора R_3 служит выключатель B .

На нижней граничной частоте $f_{\text{н}}$ емкостное сопротивление конденсатора должно быть на порядок меньше сопротивления резистора R_3 . Емкость шунтирующего конденсатора определяется выражением

$$C_3 = \frac{10 \dots 20}{2\pi f_{\text{н}} R_3}$$

6.3.6. Многокаскадные усилители напряжения

Рассмотренные однокаскадные усилители имеют, как правило, коэффициент усиления по напряжению в пределах нескольких десятков. Однако во многих устройствах промышленной электроники часто требуется гораздо больший коэффициент усиления (до нескольких сотен и даже тысяч). В этом случае применяются многокаскадные усилители, общий коэффициент усиления которых равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K = K_1 K_2 \dots K_n.$$

Отдельные каскады между собой могут быть соединены посредством реостато-емкостной (RC), трансформаторной или гальванической связи.

Усилители с RC -связью. Многокаскадные усилители с RC -связью (рис. 6.36) получили наибольшее распространение в усилителях напряжения. Связь между каскадами в них осуществляется за счет разделительных конденсаторов и базовых делителей.

Конденсатор C_{p1} , отделяет переменную составляющую выходного напряжения первого каскада от постоянной составляющей коллекторного питания, т.е. напряжение $C_{вых1}$ поступает на вход следующего каскада через конденсатор C_{p1} .

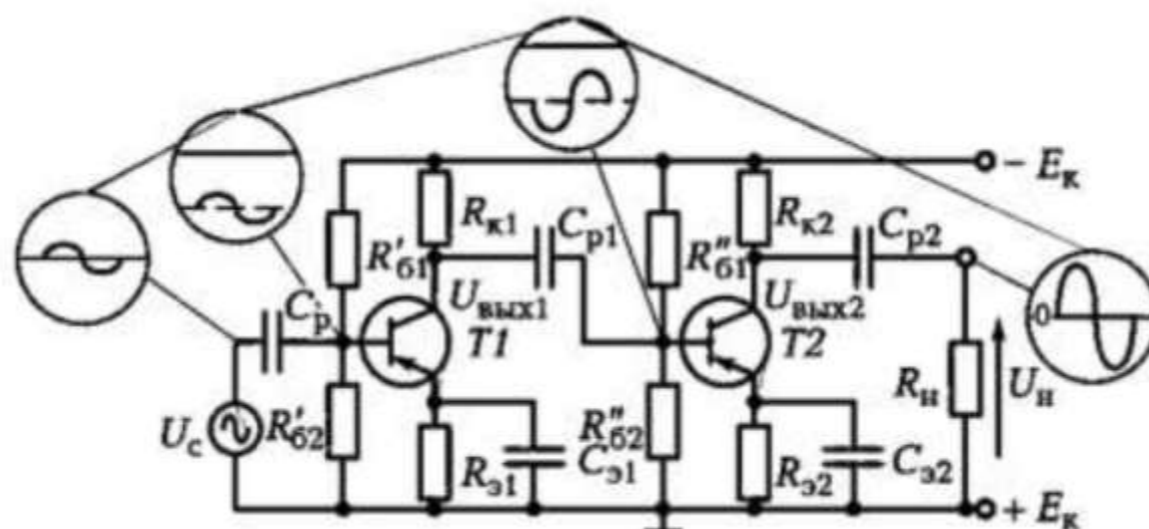


Рис. 6.3В. Схема двухкаскадного усилителя с RC -связью между каскадами

Конденсатор C_{p2} не пропускает постоянную составляющую на выход усилителя (в нагрузку R_n), а конденсатор C_p исключает влияние выходного сопротивления источника сигнала на входную цепь усилителя. Форма сигнала в отдельных точках усилителя представлена на выносках в окружностях.

Усилители с трансформаторной связью. В данных усилителях напряжения связь между каскадами осуществляется с помощью трансформатора (рис. 6.37).

При отсутствии входного напряжения $U_{вх}$ по первичным обмоткам трансформаторов $Tr2$ и $Tr3$ проходят постоянные коллекторные токи транзисторов соответственно $T1$ и $T2$. Во вторичных обмотках трансформаторов напряжение равно нулю (трансформатор не передает постоянное напряжение во вторичную обмотку).

Если ко входу подводится переменное напряжение, то во вторичной обмотке трансформатора $Tr1$ также появляется переменное напряжение, передаваемое на вход первого каскада. В первичной, а значит, и вторичной обмотках трансформатора $Tr2$ в свою очередь появляется переменное напряжение, которое передается на вход следующего каскада, и т. д.

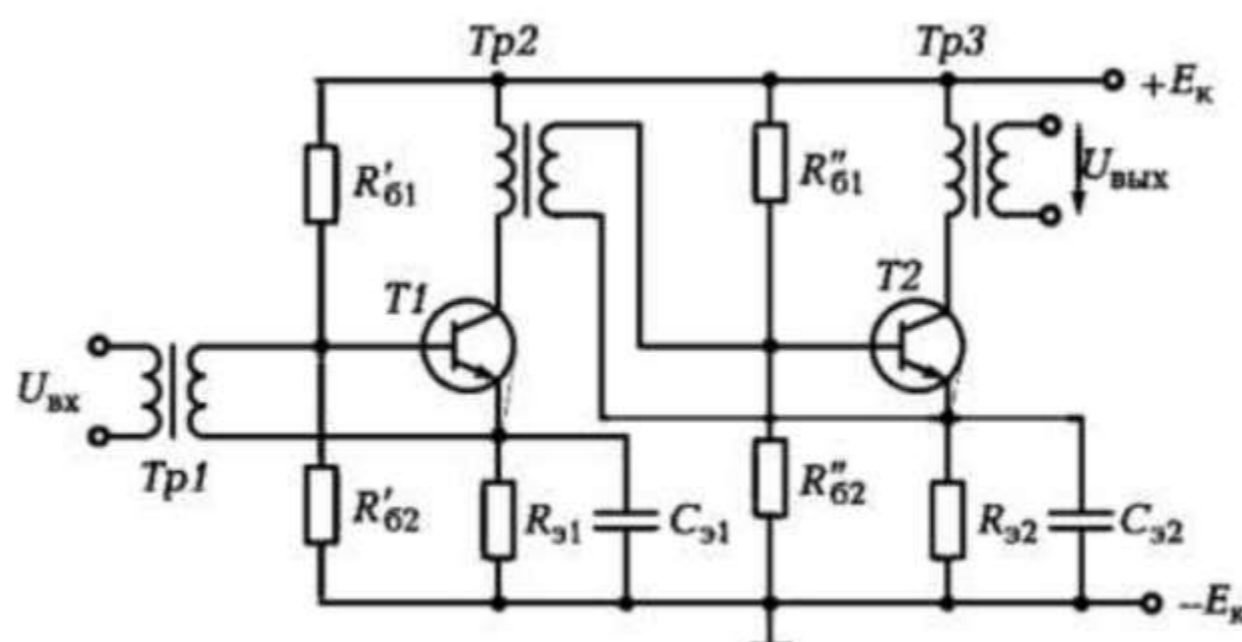


Рис. 6.37. Схема усилителя с трансформаторной связью

Благодаря применению трансформатора постоянная составляющая коллекторного питания не попадает на вход следующего каскада.

Усилители с гальванической связью. В тех случаях, когда необходимо усиливать сигналы частотой в доли герца, использование реактивных элементов в цепях связи между каскадами невозможно (емкость C должна быть очень большой). В цепи связи в этом случае используют резисторы. Построенные по такому принципу усилители называются усилителями с гальванической связью. Они являются усилителями постоянного тока (УПТ).

Разделение постоянной и переменной составляющих в таких усилителях осуществляется *компенсационным методом* (при отсутствии сигнала на входе ток в нагрузке должен быть равен нулю). При этом используются балансные схемы УПТ, построенные по принципу четырёхплечего моста (рис. 6.38).

Нагрузка включается между коллекторами транзисторов $T1$ и $T2$, исполняющих роль двух плеч моста. Другими плечами моста являются коллекторные резисторы $R_{к1}$ и $R_{к2}$. Если потенциалы на коллекторах транзисторов $T1$ и $T2$ одинаковы (фа - фб), то ток в нагрузке отсутствует.

Резистор R_6 служит для балансировки схемы, т.е. для выравнивания потенциалов на коллекторах. Температурная стабилизация осуществляется за счет общего для обоих транзисторов резистора R_3 .

Входной сигнал ($U_{вх1}$) подается на базу транзистора $T1$; потенциал базы транзистора $T2$ постоянен и определяется делителем $R''_{б1} - R''_{б2}$. В этом случае в нагрузке появляется ток, пропорциональный амплитуде входного сигнала и имеющий такой же знак. Если на базу транзистора $T2$ подается входной сигнал $U_{вх2}$, то сигнал на выходе будет пропорционален разности входных сигналов:

$$U_{\text{вых}} = K_U (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}).$$

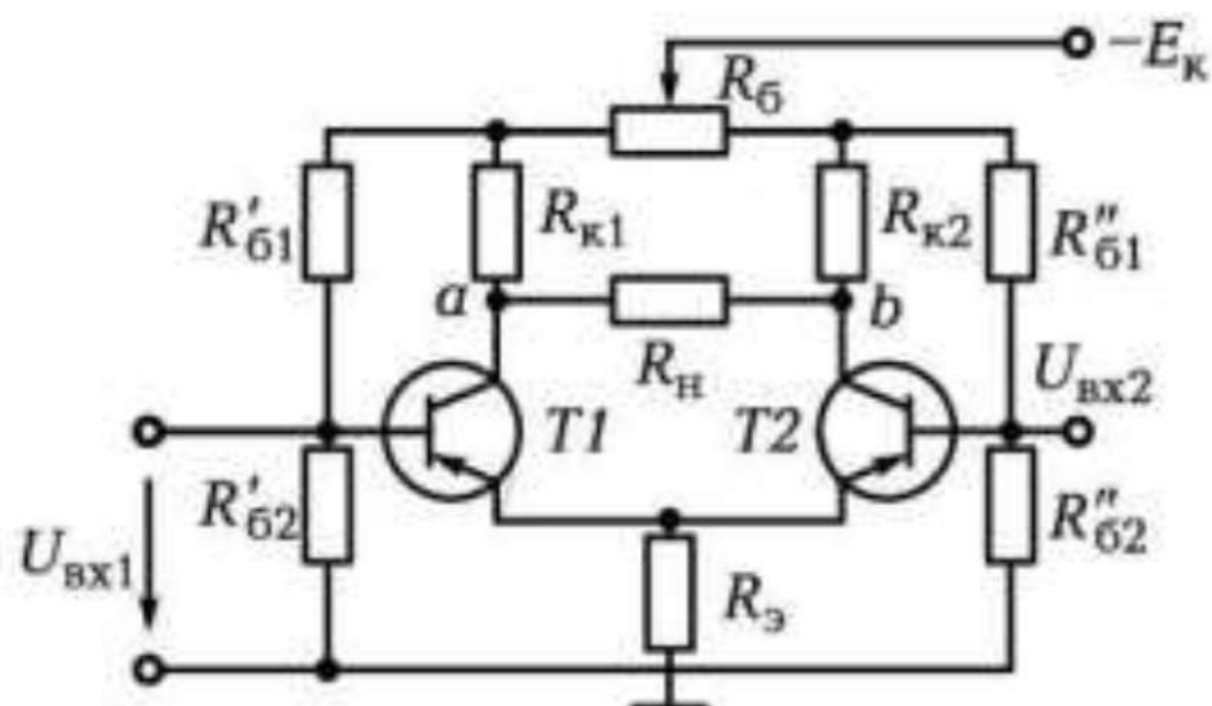


Рис. 6.38. Схема усилителя с гальванической связью

Усилитель с двумя входами называют *усилителем с дифференциальным входом*. Как правило, такой усилитель имеет несколько каскадов, что позволяет получить значительный коэффициент усиления.

6.3.7. Операционные усилители

Широкое применение в качестве усилителей постоянного тока получили операционные усилители, выполняемые на микросхемах.

❖ *Операционные усилители* — это усилители с очень высоким коэффициентом усиления (сотни тысяч),

имеющие два входа — прямой (+) и инверсный (-). Выходной сигнал пропорционален разности напряжений на этих входах.

Так как напряжение всегда передается по двухпроводной линии, то его можно подводить или к двум входам усилителя, или к одному из входов относительно нулевой точки усилителя. Выходной сигнал также снимается относительно этой нулевой точки. Если напряжение подается только на прямой вход (+), то $U_{\text{вых}} = K_U \cdot U_{\text{вх}}$, а если только на инверсный (-), то $= -K_U U_{\text{вх2}}$

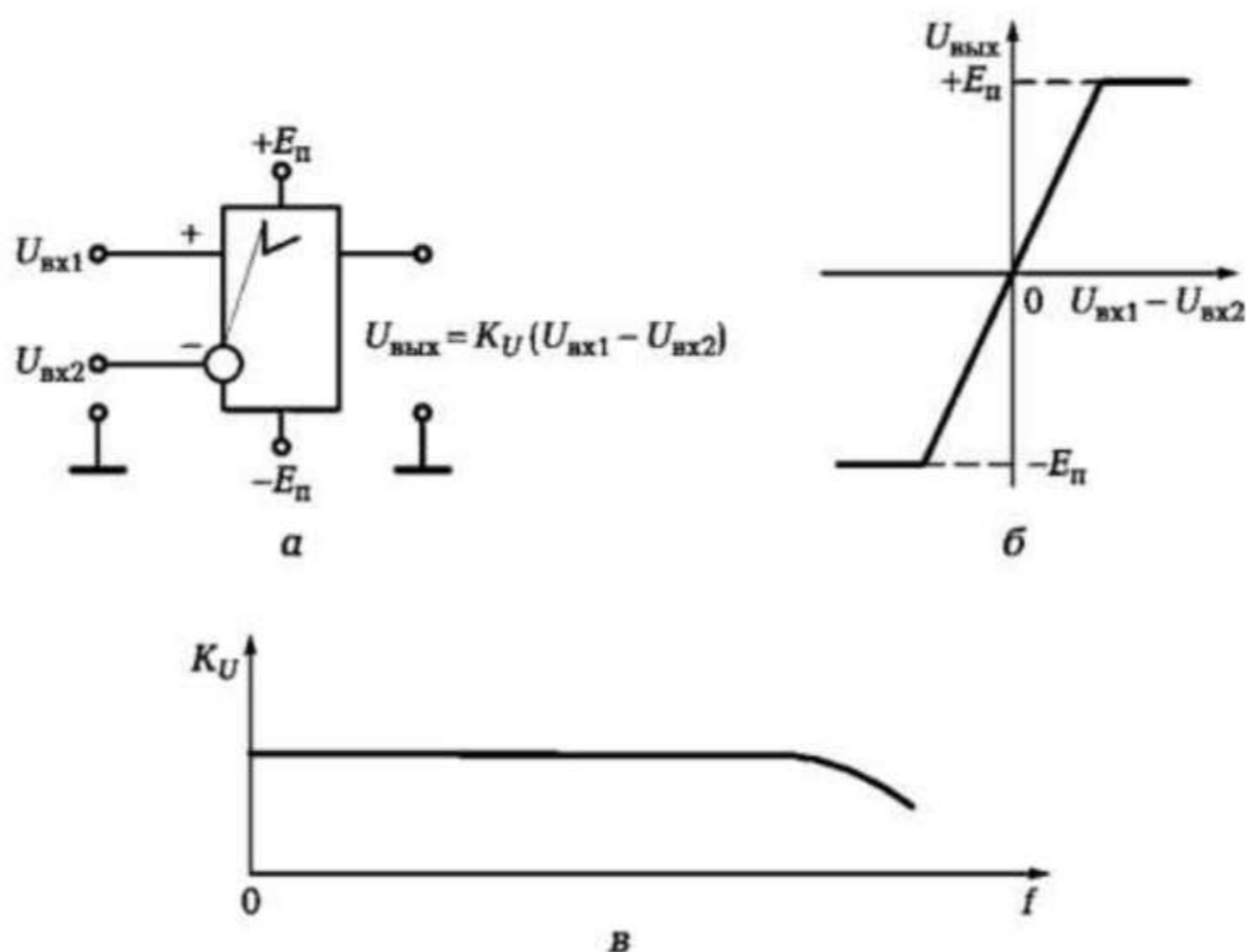


Рис. 6.39. Операционный усилитель:

a — условное изображение на схеме; $б$ — амплитудная характеристика; $в$ — частотная характеристика

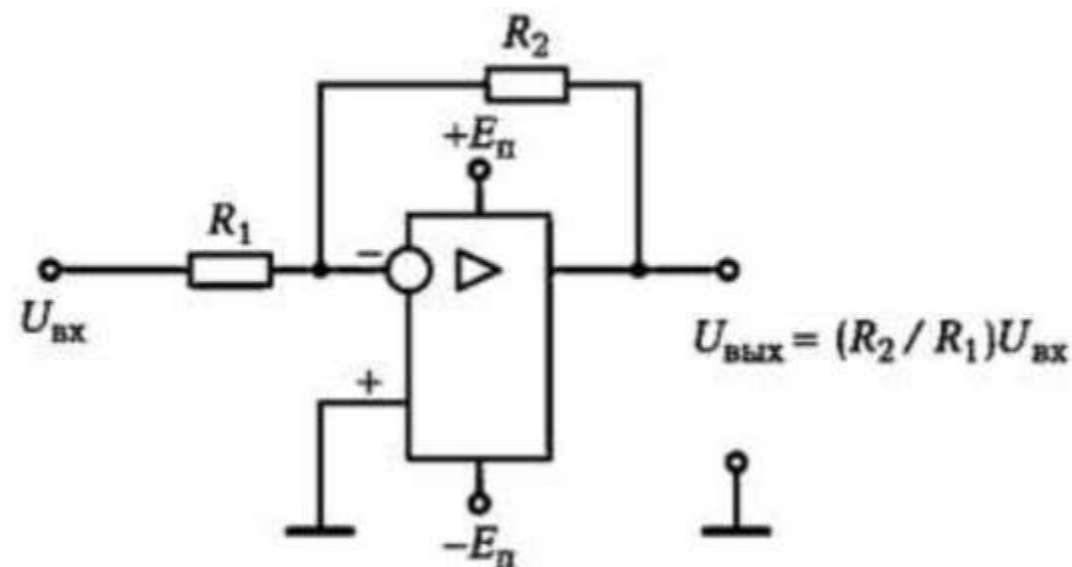


Рис. 6.40. Операционный усилитель с отрицательной обратной связью

На рис. 6.39 показаны условное изображение операционного усилителя на принципиальных схемах, его амплитудная и частотная характеристики. В зависимости от входного сигнала выходное напряжение операционного усилителя может быть как положительным, так и отрицательным, что обеспечивается питанием усилителя от двух источников напряжения $+E_{п}$ и $-E_{п}$. Когда выходное напряжение приближается к этим значениям, начинается насыщение усилителя, и его амплитудная характеристика искажается (рис. 6.39, б).

Операционный усилитель может применяться для усиления электрических сигналов, например от датчиков автоматических систем управления. В этом случае используется один из входов усилителя, как правило, инверсный. Другой вход усилителя (прямой) соединяется с корпусом. Поскольку коэффициент усиления операционного усилителя слишком высок, необходимы дополнительные меры для его уменьшения до нужного значения.

❖ Коэффициент усиления операционного усилителя можно легко регулировать, если ввести отрицательную обратную связь между выходом усилителя и его инверсным входом (рис. 6.40).

Изменение напряжения на выходе усилителя всегда противоположно по знаку изменению напряжения на инверсном входе, т. е. эти напряжения всегда находятся в противофазе. Подав часть напряжения с выхода на вход, можно частично подавить входной сигнал, уменьшив тем самым коэффициент усиления. Поэтому такая обратная связь и называется отрицательной. Нужный коэффициент усиления устанавливается за счет изменения сопротивления одного из резисторов в цепи обратной связи (обычно резистора R_2). Коэффициент усиления операционного усилителя с обратной связью $K_{oc} = R_2 / R_1$

6.3.8. Усилители мощности

Усилитель напряжения позволяет увеличить одновременно и мощность электрического сигнала. Однако в случае необходимости выделения на нагрузке значительной мощности применяются специальные схемы выходных каскадов усилителя напряжения. В них устанавливаются транзисторы, рассчитанные на большие токи и напряжения и способные рассеивать значительную мощность на коллекторе.

Для увеличения допустимой мощности рассеяния, а следовательно, выходной мощности должен быть обеспечен хороший отвод теплоты от коллекторного $p - n$ -перехода. С этой целью корпус транзистора надежно соединяют с корпусом усилителя (его массой), либо со специальным радиатором, способным хорошо рассеивать теплоту.

Поскольку сопротивление нагрузки, подключаемой к выходу усилителя мощности, обычно невелико (например, динамики с сопротивлением до 4 Ом), применяется трансформаторная связь, позволяющая за счет соответствующего коэффициента трансформации провести согласование малого сопротивления нагрузки с большим выходным сопротивлением усилителя.

Усилители мощности могут быть построены по одноконтурной и двухконтурной схемам.

Одноконтурная схема, при которой усилитель работает в режиме класса А (см. подразд. 6.3.3), применяется относительно редко из-за низкого КПД и возможности получения незначительной выходной мощности.

Этих недостатков лишены двухконтурные схемы усилителей мощности, работающих в режиме класса В (рис. 6.41, а). Их КПД достигает 70 %, мощность свыше 10 Вт, ток покоя при $U_{вх} = 0$ равен нулю, т.е. сердечник трансформатора не насыщен.

Для управления двухконтурными схемами усилителя мощности необходим фазоинверсный каскад, т. е. устройство, позволяющее подать на вход усилителя (базы транзисторов $T1$ и $T2$) одновременно два одинаковых по величине, но противоположных по фазе напряжения. В нашем случае таким устройством является входной трансформатор $Tr1$, вторичная обмотка которого имеет средний вывод.

Делитель напряжения $R_{б1} - R_{б2}$ обеспечивает требуемый режим работы транзисторов — режим класса В. Трансформатор $Tr2$ служит для согласования выходного сопротивления усилителя с низкоомной нагрузкой.

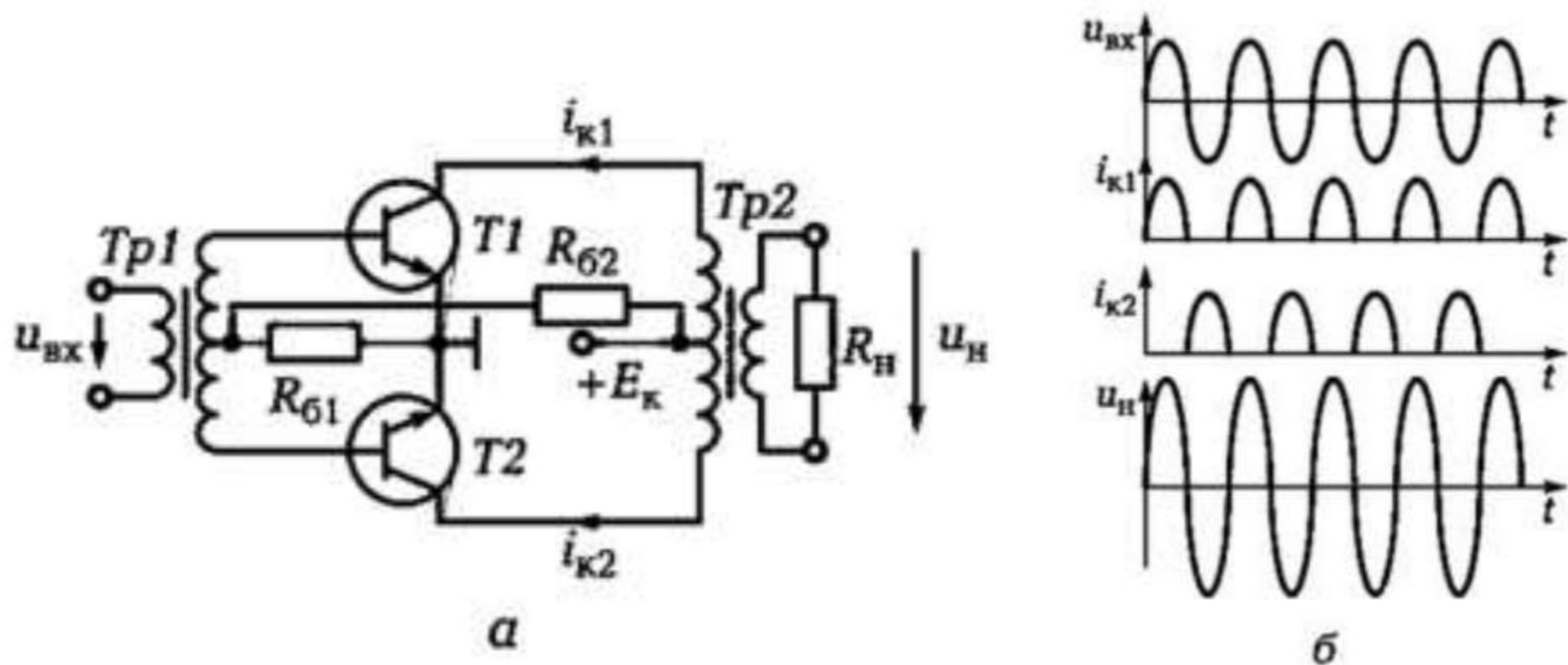


Рис. 6.41. Двухтактный усилитель мощности:
а — схема усилителя; б — временные диаграммы токов и напряжений

Работу усилителя можно проанализировать с помощью временных диаграмм, приведенных на рис. 6.41, б. Входной сигнал $U_{вх}$, подаваемый через трансформатор $Tr1$, поступает на базы транзисторов $T1$ и $T2$ в противофазе. Транзисторы работают в режиме класса В, поэтому если $T1$ во время полуволны входного напряжения пропускает коллекторный ток $i_{к1}$, то $T2$ закрыт и ток не пропускает. Во время следующей полуволны транзисторы меняются ролями: $T2$ проводит ток $i_{к2}$, а $T1$ закрыт. Токи $i_{к1}$ и $i_{к2}$ протекают через первичную обмотку трансформатора $Tr2$ в противоположных направлениях. В результате напряжение во вторичной обмотке пропорционально разности коллекторных токов $I_{к1} - I_{к2}$. Форма разностного тока, а следовательно, и форма напряжения на нагрузке u_n повторяют форму входного напряжения. При этом мощность сигнала на нагрузке может во много раз превышать мощность входного сигнала.

❖ В качестве усилителя мощности может также использоваться транзисторный усилитель, собранный по схеме с общим коллектором — **эмиттерный повторитель** (рис. 6.42).

Его коэффициент усиления по напряжению равен единице, фаза

выходного сигнала совпадает с фазой входного, выходной сигнал снимается с эмиттера (отсюда и название «эмиттерный повторитель»). В то же время коэффициент усиления по току, а значит, и по мощности может достигать значительной величины.

Входное сопротивление в такой схеме находится в пределах 0,5... 1 МОм (тогда как в схеме с общим эмиттером — 0,1... 1 кОм). Это позволяет подключать к входу усилителя электрические цепи с высоким выходным сопротивлением.

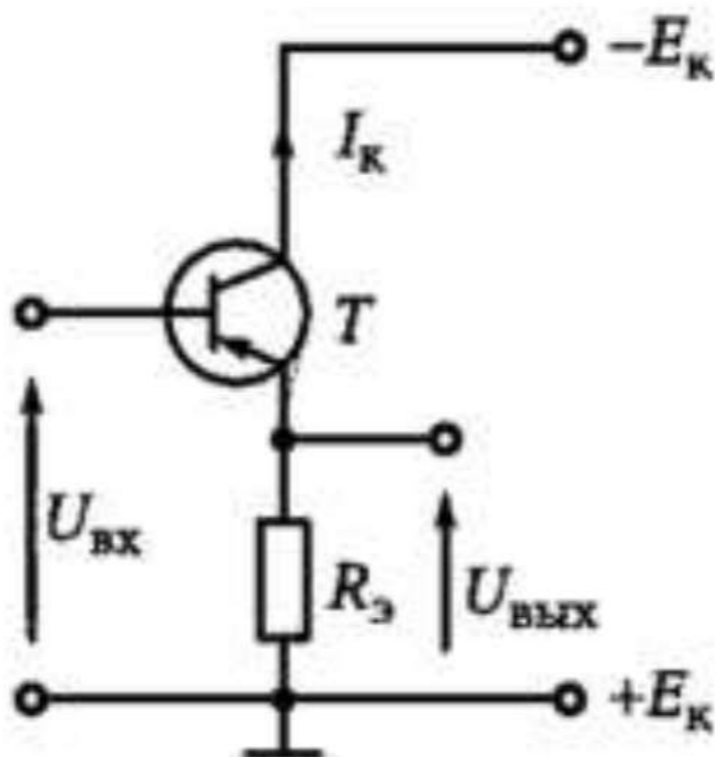


Рис. 6.42. Эмиттерный повторитель

В то же время выходное сопротивление усилителя невелико (единицы ом), что позволяет подключать к его выходу низкоомную нагрузку. В связи с этим эмиттерный повторитель применяется также в качестве согласующего элемента между высокоомным выходом усилителя и низкоомной нагрузкой.