

ЛЕКЦИЯ 1

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

Цель лекции:

Изучение усилителей электрических сигналов на транзисторах.

План лекции:

1. Классификация и усилителей.
2. Основные параметры и характеристики усилителей.
3. Принцип построения усилительных каскадов.
4. Обратные связи в усилителях.

Усилитель – это устройство, предназначенное для усиления входного электрического сигнала по напряжению, току или мощности за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала.

Усилитель преобразует энергию источника питания в энергию выходного сигнала по закону, определяемому входным управляющим воздействием. Это возможно с помощью управляемого нелинейного элемента - биполярного или полевого транзистора (БТ или ПТ).

По типу усиливаемой величины усилители делятся на усилители напряжения, тока и мощности. В общем случае любой электронный усилитель является усилителем мощности входного сигнала.

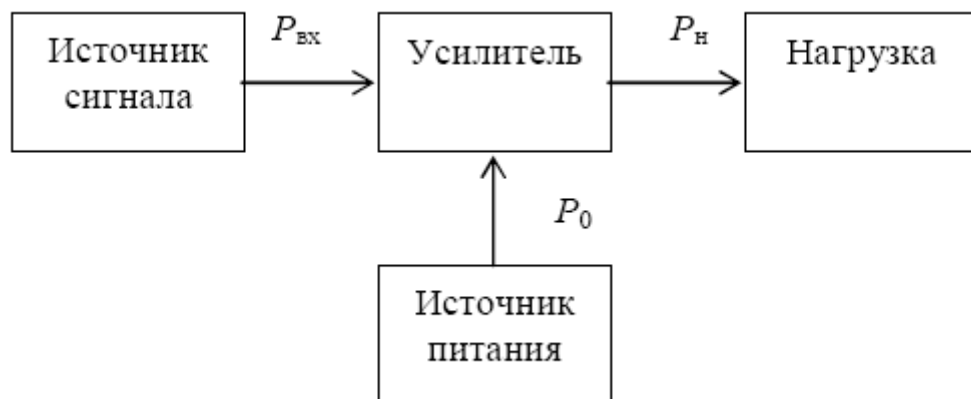


Рис. 1. Блок схема усилителя

По виду усиливаемого сигнала различают усилители гармонических колебаний и усилители импульсных сигналов. По диапазону усиливаемых частот усилители подразделяются на усилители постоянного тока (УПТ), операционные усилители (ОУ) и усилители переменного тока.

По способу связи между каскадами, а также источником сигнала и нагрузки различают усилители с: резистивно-емкостной (RC-); трансформаторной; непосредственной (гальванической) связью между каскадами.

Основные параметры и характеристики усилителя

Коэффициент усиления. Основными параметрами усилителя являются коэффициенты усиления по: напряжению $K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$, току

$K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}}$ и мощности $K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}} I_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}} I_{\text{ВХ}}} = K_U K_I$, где $I_{\text{ВХ}}$, $I_{\text{ВЫХ}}$,

$U_{\text{ВХ}}$, $U_{\text{ВЫХ}}$, $P_{\text{ВХ}}$, $P_{\text{ВЫХ}}$ – действующие значения токов напряжений и мощностей на входах и выходах усилителя. Мощность сигнала на выходе любого усилителя больше мощности входного сигнала.

Для получения больших коэффициентов усиления применяют многокаскадные усилители, в которых каскады соединяют последовательно. Общий коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K_u = K_{u1} \cdot K_{u2} \cdots K_{un},$$

где K_{un} – коэффициент усиления n – каскада.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – это зависимость модуля коэффициента усиления от частоты гармонического сигнала, $K(\omega)$,

(рис. 2). По АЧХ можно определить полосу усиливаемых частот. Её принято считать ограниченной частотами, на которых коэффициент усиления усилителя уменьшается в $\sqrt{2}$ раз от своего максимального значения. Если бы в усилителе не было искажений, то АЧХ представляла бы прямую линию, т.е. одинаково усиливались бы сигналы с частотой от 0 до ∞ . Причиной частотных искажений является присутствие в схеме усилителя реактивных элементов.

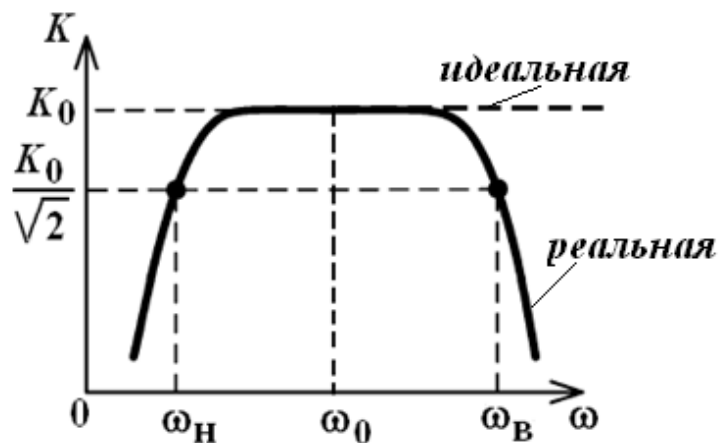


Рис. 2. АЧХ усилителя

Избирательные (резонансные) усилители предназначены для усиления электрических сигналов в узкой полосе частот, (рис. 3а). АЧХ УПТ охватывает область от нулевых частот ($\omega_H=0$) до некоторой граничной частоты ω_B , (рис. 3б).

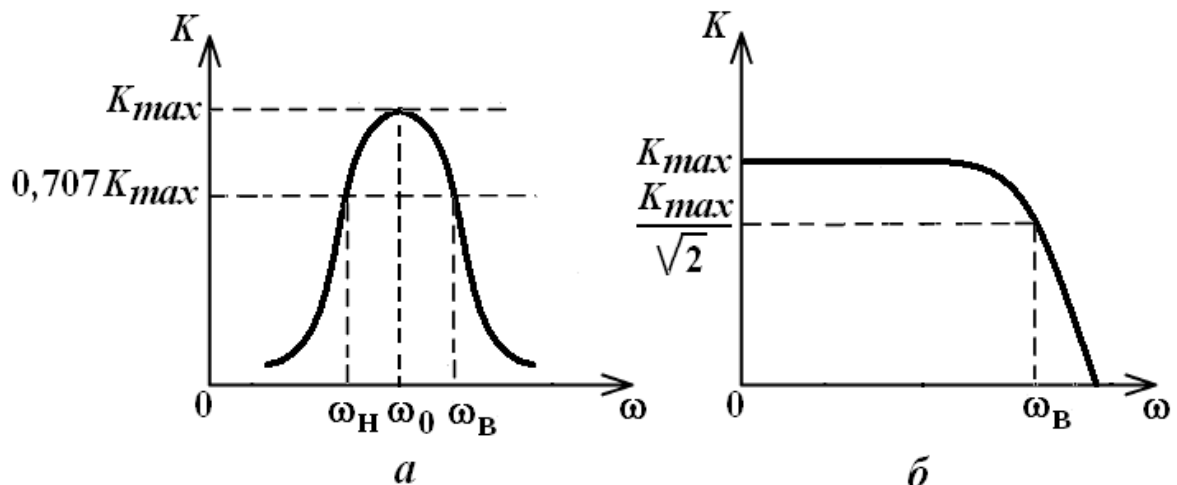


Рис. 3. АЧХ резонансного усилителя (а) и УПТ и ОУ (б), где ω_B, ω_H - верхняя и нижняя граничные частоты рабочего диапазона частот; $\Delta\omega = \omega_B - \omega_H$ – диапазон рабочих частот (полоса пропускания)

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) описывает зависимость угла сдвига фаз, вносимого усилителем, от частоты гармонического сигнала, ω (φ), (рис.4). ФЧХ усилителя без фазовых искажений - это прямая линия, проходящая через начало координат (пунктирная линия на рис. 4, а).

Фазовые искажения возникают из-за непостоянства фазового сдвига для различных гармоничных составляющих.

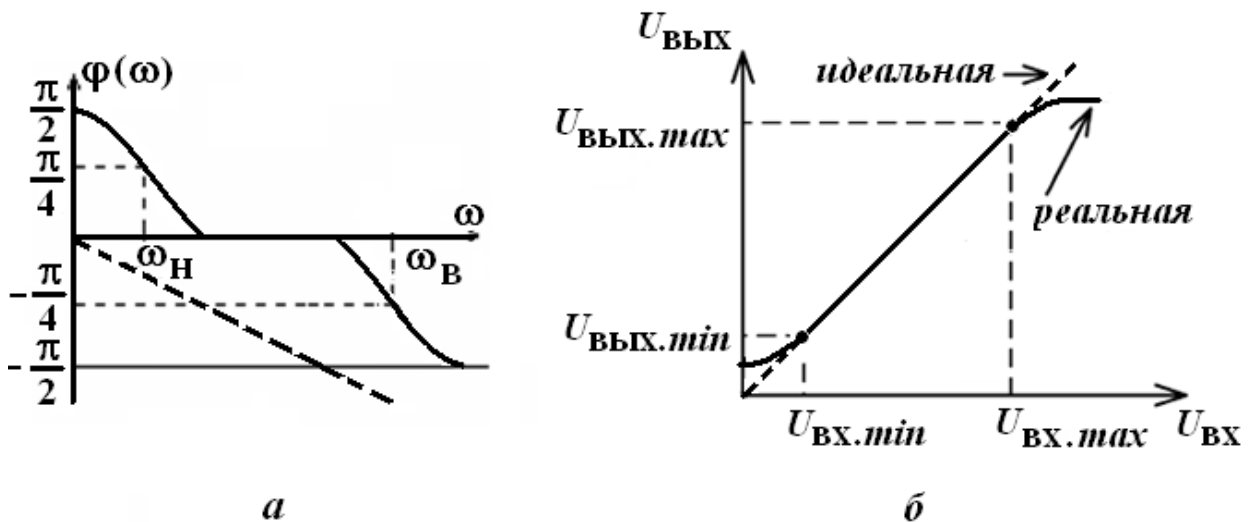


Рис. 4. ФЧХ усилителя (а) и амплитудная характеристика (б)

Амплитудная (передаточная) характеристика— это зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды входного (рис. 4, б). В идеальном случае эта характеристика должна быть прямолинейной. При малых и больших значениях входного напряжения характеристика отклоняется от прямолинейной.

Принцип построения усилительных каскадов

На рис. 5 показана структурная схема усилительного каскада. Основные элементы усилительного каскада: управляемый элемент УЭ (БТ или ПТ), резистор R и источник питания E . Эти элементы образуют выходную цепь каскада. Усиливаемым сигналом является $U_{\text{ВХ}}$. Выходной сигнал $U_{\text{ВЫХ}}$ снимается с выхода УЭ или с резистора R .

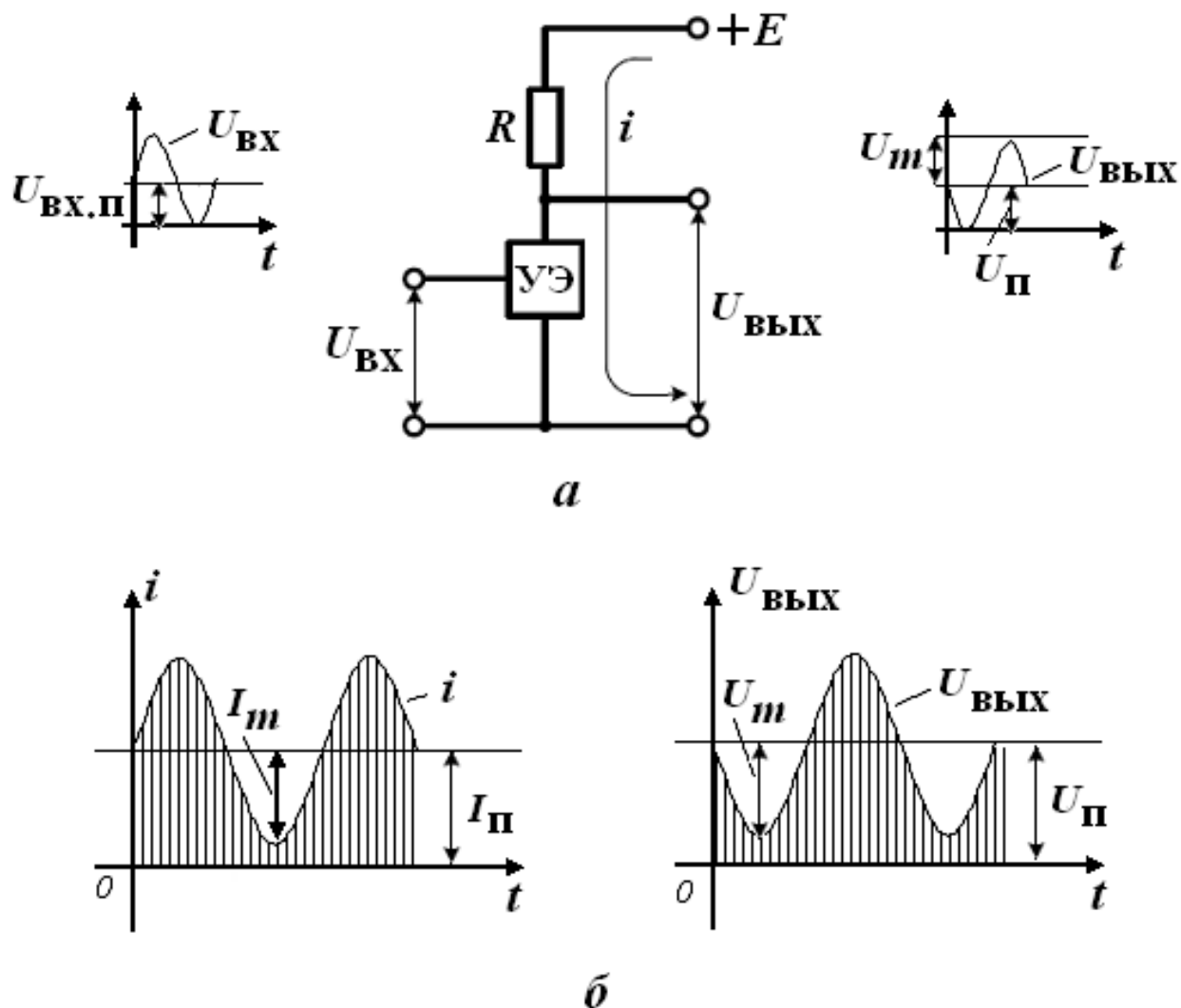


Рис. 5. Принцип построения (а) и временные диаграммы (б) усилительного каскада

Так как для питания используется источник постоянного напряжения E , ток i в выходной цепи каскада является однонаправленным. При этом переменный ток (напряжение) выходной цепи (пропорциональные току и напряжению входного сигнала) следует рассматривать как переменные составляющие суммарного тока (напряжения), накладывающиеся на их

постоянные составляющие I_{Π} (U_{Π}). Связь между постоянными и переменными составляющими должна быть такой, чтобы амплитудные значения переменных составляющих не превышали постоянных составляющих, т. е. $I_{\Pi} > I_m$ и $U_{\Pi} > U_m$.

При отсутствии входного постоянного напряжения смещения невозможно усилить переменный (двухполярный) сигнал: *для обеспечения работы усилительного каскада при переменном входном сигнале в его цепи должны быть созданы постоянные составляющие тока I_n и напряжения U_n .*

Постоянные составляющие тока и напряжения определяют **режим покоя** усилительного каскада. Параметры режима покоя по входной цепи ($I_{ВХ.П}$, $U_{ВХ.П}$) и по выходной цепи (I_{Π} , U_{Π}) характеризуют электрическое состояние схемы в отсутствие входного сигнала.

Усилительные свойства каскадов усиления основываются на следующем: при подаче на УЭ напряжения входного сигнала в токе выходной цепи создается переменная составляющая, вследствие чего на УЭ элементе образуется аналогичная составляющая напряжения, превышающая переменную составляющую напряжения на входе. Усилительные свойства проявляются тем сильнее, чем больше сказывается влияние входного сигнала на выходной ток управляемого элемента и чем сильнее проявляется воздействие изменения тока в выходной цепи на изменение напряжения на управляемом элементе (т. е. чем выше сопротивление R).

Обратной связью (ОС) называют воздействие выходного сигнала усилителя на его вход.

Различают обратную связь по напряжению и ОС по току; последовательную и параллельную ОС; **положительную** ОС (ПОС) и **отрицательную** ОС (ООС).

Коэффициент усиления усилителя, охваченного отрицательной ОС:

$$\dot{K}_{\text{ООС}} = \frac{\dot{K}}{1 + \dot{\beta} \dot{K}}, \quad (1)$$

Где \dot{K} – коэффициент усиления усилителя без ОС, $\dot{\beta}$ – коэффициент передачи цепи ОС с выхода усилителя на его вход.

Коэффициент усиления усилителя с ПОС примет вид:

$$\dot{K}_{\text{ПОС}} = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{\beta} \dot{K}}. \quad (2)$$

Усилители постоянного тока

Цель лекции:

изучение основных схем транзисторных усилителей

План лекции:

1. Усилители постоянного тока.
2. Основные характеристики УПТ.
3. Дифференциальный усилитель.

Усилителем постоянного тока (УПТ) называется усилитель, сохраняющий постоянство коэффициента усиления при уменьшении частоты входного сигнала вплоть до нуля.

Отдельные каскады должны быть связаны между собой либо непосредственно (гальваническая связь), либо через резисторы, но не через разделительные конденсаторы или трансформаторы, которые не пропускают постоянную составляющую.

В УПТ возникают сложности с отделением полезного сигнала от постоянных составляющих напряжений и токов, необходимых для нормальной работы каскада. Кроме того, отсутствие конденсатора или трансформатора приводит к тому, что через усилитель одновременно могут проходить полезный сигнал и сигнал помехи. На входе УПТ оба сигнала (полезный и помехи) складываются, и различить их невозможно. Это создает ложное представление об истинном значении усиленного полезного сигнала.

Отделение постоянных составляющих напряжения, как правило, производится компенсационным методом. Для уменьшения дрейфа нуля стабилизируют источники питания, вводят отрицательную обратную связь, а также применяют специальные балансные схемы.

Основную проблему усилителей постоянного тока представляет **дрейф нуля** – отклонение напряжения на выходе усилителя от начального (нулевого) значения при отсутствии входного сигнала. Причиной этого явления являются температурная и временная нестабильность параметров активных элементов схемы усилителя, резисторов, а также источников питания.

Основными характеристиками УПТ является дрейф нулевого уровня выходного напряжения, коэффициенты усиления K_u и K_i , диапазон изменений входного и выходного напряжения $U_{вх}$ и $U_{вых}$ и полоса пропускания Δf .

Одним из возможных путей уменьшения дрейфа нуля является использование дифференциальных усилителей.

Дифференциальный усилитель

Дифференциальным каскадом называется устройство, усиливающее разность двух напряжений. Наиболее эффективным методом уменьшения дрейфа нуля является применение балансных параллельных каскадов УПТ, получивших название дифференциальных усилителей (ДУ). Дифференциальный каскад имеет два входа и два выхода. Питание ДУ осуществляется от двух источников, напряжения которых равны (по модулю) друг другу.

Основой построения балансного каскада является четырехплечий мост (рис. 1, *a*). Если сопротивления $R_{к1}$ и $R_{к2}$ равны друг другу, а транзисторы $VT1$ и $VT2$ имеют идентичные параметры, то схема будет симметрична.

Таким образом, ДУ представляет собой сбалансированную мостовую схему, состоящую из двух транзисторных усилителей с двумя входами и двумя выходами. Два плеча моста образованы коллекторными резисторами

$R_{к1}$ и $R_{к2}$, а два других плеча образованы внутренними сопротивлениями транзисторов $VT1$ и $VT2$, рис. 1, б.

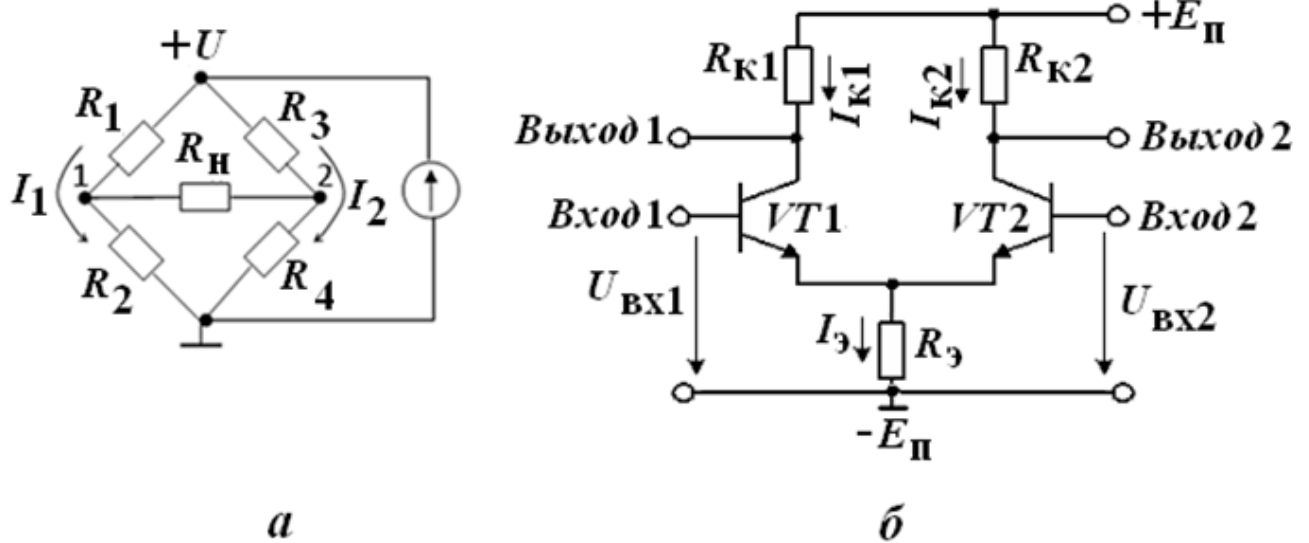


Рис. 1. Четырехплечий мост (а); схема дифференциального усилительного каскада (б)

К вертикальной диагонали подключается напряжение питания, а нагрузка включается в другую диагональ между коллекторами транзисторов. Каждое общее плечо ДУ является каскадом ОЭ. Таким образом, ДУ состоит из двух каскадов ОЭ. В цепь эмиттеров транзисторов включен резистор $R_э$, которым задается их общий ток.

Если источник сигнала подключен между базами транзисторов, а его средняя точка заземлена, то дифференциальный каскад имеет **симметричный вход**. Если источник сигнала подключен между базой одного из транзисторов и общим проводом, то дифференциальный каскад имеет **несимметричный вход**. Если выходное напряжение снимается между коллекторами, то дифференциальный каскад имеет **симметричный выход**. Если напряжение снимается с одного из коллекторов, то **выход называется несимметричным**. Для симметричного выхода коэффициент усиления будет в два раза больше, чем для несимметричного выхода. Коэффициент усиления

по напряжению дифференциального усилителя всегда больше, чем в каскаде на одиночном транзисторе.

Если сигнал подается на вход и снимается с выхода несимметрично, каскад может быть инвертирующим и неинвертирующим.

При идеальной симметрии обоих плеч в отсутствии входных сигналов ($U_{\text{вх1}} = 0, U_{\text{вх2}} = 0$) коллекторные токи и потенциалы коллекторов транзисторов будут одинаковы, а выходное напряжение $U_{\text{вых}} = 0$. Таким образом, всякое изменение характеристик транзистора независимо от причин, вызывающих эти изменения, вызывает одинаковое изменение токов в обоих плечах. Поэтому разбаланса схемы не произойдет и *дрейф выходного напряжения* будет практически равен нулю.

Условие баланса моста, при котором его выходное напряжение равно нулю, определяется как

$$R_{VT1} R_{к2} = R_{VT2} R_{к1}. \quad (3)$$

Нарушение этого условия приводит к разбалансировке моста и появлению выходного напряжения. Это может произойти, например, при изменении выходных сопротивлений транзисторов R_{VT1} и R_{VT2} , которые, в свою очередь, зависят от входных напряжений $U_{\text{вх1}}$ и $U_{\text{вх2}}$.

Подача на оба входа ДУ сигналов с одинаковой фазой и амплитудами (**синфазные сигналы**) $U_{\text{вх1}} = U_{\text{вх2}}$, вследствие симметрии плеч не вызовет изменения коллекторных токов и они останутся неизменными и равными:

$$I_{к1} = I_{к2} = 0,5\alpha I_{\text{э}}, \quad (4)$$

где α - коэффициент передачи тока эмиттера.

Следовательно, потенциалы коллекторов остаются равными, а $U_{\text{вых}} = U_{\text{к1}} - U_{\text{к2}} = 0$. Это значит, что идеальный **дифференциальный каскад не реагирует на синфазные сигналы**. Синфазные сигналы обычно обусловлены помехами, наводками и являются вредными для работы усилителя. Для подавления синфазных сигналов в ДУ вводят резистор $R_{\text{э}}$, который является элементом последовательной ООС по току.

Рассмотрим работу ДУ для *основного рабочего входного сигнала – дифференциального*. **Дифференциальными** (противофазными) называют сигналы, имеющие равные амплитуды, но противоположные фазы. Будем считать, что входное напряжение подано между входами ДУ (симметричный вход), т. е. на каждый вход поступает половина амплитудного значения входного сигнала, причем в противоположных фазах. За счет действия дифференциального сигнала ток одного плеча увеличивается за счет уменьшения тока другого плеча $\Delta I_{\text{э1}} = -\Delta I_{\text{э2}}$, т.к. сумма токов всегда равна:

$$I_{\text{э1}} + I_{\text{э2}} = I_{\text{э}}. \quad (5)$$

Потенциал коллектора одного транзистора уменьшается, а другого увеличивается на одно и то же значение $\Delta U_{\text{к}}$. На выходе ДУ появится разность потенциалов, равная $U_{\text{вых}} = 2\Delta U_{\text{к}}$.

В результате на выходе ДУ появится выходное напряжение $U_{\text{вых}} = U_{\text{к1}} - U_{\text{к2}} \neq 0$. Следовательно, идеальный ДУ **реагирует только на дифференциальный (разностный) сигнал**. Отсюда вытекает название этого типа усилителей. ООС для дифференциального сигнала отсутствует. Это позволяет получать от ДУ большое усиление.

Выход каскада со стороны коллектора транзистора $VT1$ ($U_{\text{вых1}}$) является **инвертирующим** (переворачивает фазу выходного напряжения на 180°), а со

стороны коллектора транзистора $VT2$ ($U_{\text{ВЫХ}2}$) – **неинвертирующим** (не переворачивает фазу выходного напряжения).

Коэффициент усиления ДУ:

$$U_{\text{ВЫХ}} = (U_{\text{ВХ}1} - U_{\text{ВХ}2})K_{UD}. \quad (6)$$

Достоинства ДУ: малый дрейф нуля; высокая степень подавления синфазных помех. Недостатки ДУ: требует двухполярного источника питания; необходима очень высокая симметрия схемы.