

# ЭЛЕКТРОНИКА

*Лектор:*

*к.ф.-м.н. Алимгазинова Назгуль Шакаримовна*

# ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ  
(ДУ)



Усилитель постоянного тока (УПТ)



*служит для усиления медленно меняющихся сигналов или сигналов, значение которых после изменения остается сколь угодно долго.*

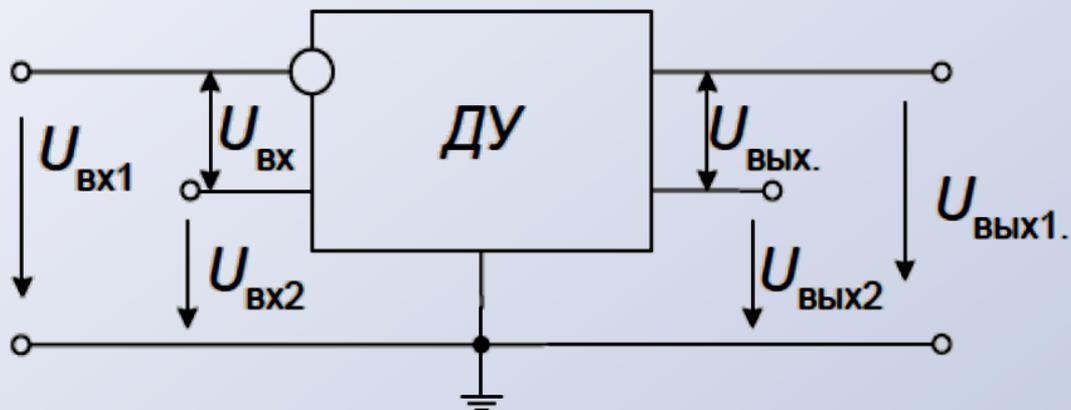
**Особенностью УПТ** является непосредственная (гальваническая) связь между каскадами. Это объясняется тем, что ни конденсатор, ни трансформатор не пропускают постоянную составляющую тока.

**Недостатком УПТ** является «дрейф нуля» – наличие сигнала на выходе при его отсутствии на входе.

Любые медленные процессы, связанные с колебаниями температуры, напряжения питания, изменениями параметров всех активных и пассивных элементов схемы усилителя создают низкочастотные флуктуации практически на всех элементах схемы, в результате которых на выходе и появляется какой-то уровень напряжения и его, в дальнейшем, трудно отличить от полезного сигнала. Самым эффективным методом борьбы с «дрейфом нуля» является использование ДУ.

*Дифференциальный усилитель – это симметричный усилитель с двумя входами и двумя выходами, использующийся для усиления разности напряжений двух входных сигналов.*

## Структурная схема ДУ



### ВХОДЫ

$U_{вх1}$  - инвертирующий

*фаза входного сигнала на выходе  
изменяется на противоположную*

$U_{вх2}$  - неинвертирующий

*фаза сигнала на выходе совпадает с фазой  
входного сигнала*

$$U_{вх} = U_{вх1} - U_{вх2}$$

*$U_{вх}$  - дифференциальный сигнал — это сигнал,  
который действует на входе ДУ и который  
равен разности сигналов, поступающих на  
входы*

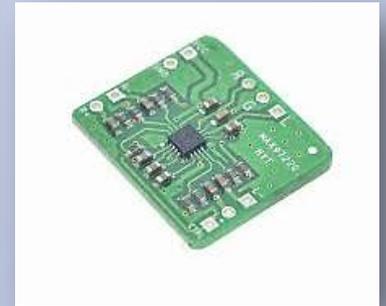
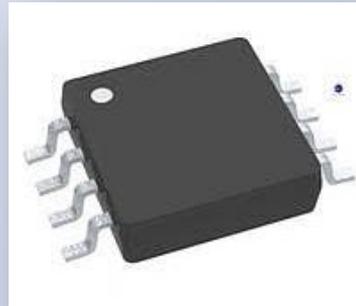
# Рабочие частоты ДУ

Нижняя

Верхняя

$$f_n = 0$$

$f_v$  определяется назначением усилителя  
и условиями его работы



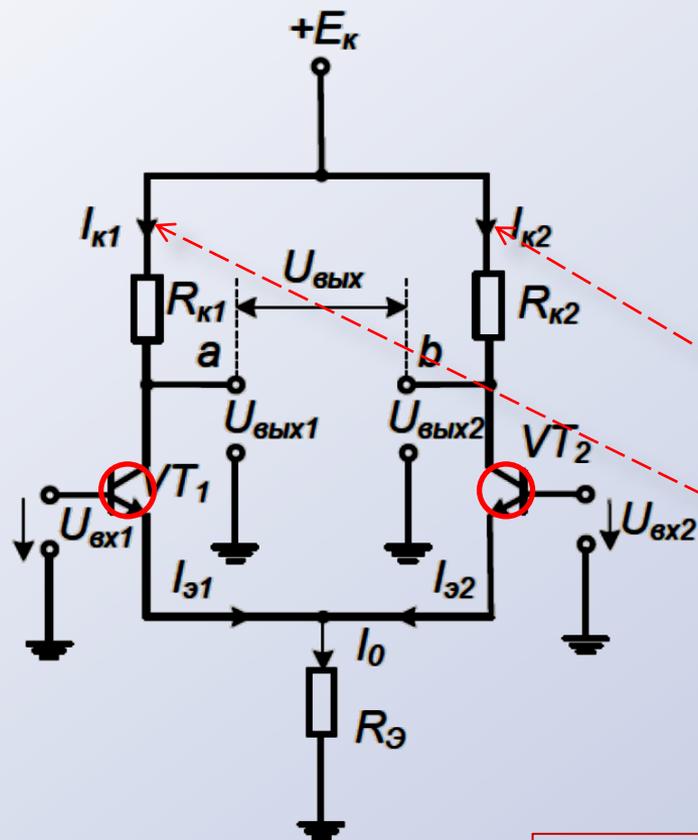
## ПРИМЕНЕНИЕ

в измерительных устройствах

в системах автоматического регулирования

в различных стабилизаторах

ДУ усиливает разницу между двумя сигналами, поступающими на базы транзисторов VT1 и VT2.



Это симметричный ДУ, который усиливает разницу сигналов  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$ , а на выходе снимается разность напряжений  $U_{вых1}$  и  $U_{вых2}$ .

Если на входы ДУ поступают сигналы, совпадающие по фазе, то токи, протекающие через VT1 и VT2, в идеально симметричной схеме одинаковы и равны.

$$I_{к1} = I_{к2} = \frac{I_0}{2}$$

Ток в цепи резистора  $R_э$  должен быть строго постоянным.

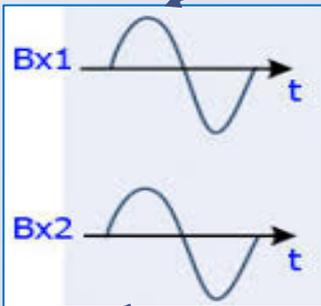
- При отсутствии входного сигнала потенциалы коллекторов будут одинаковы, и выходное напряжение будет равно нулю.
- Если токи будут изменяться одинаково и одновременно в обеих ветвях схемы, то и в этом случае, если ДУ идеально симметричен, выходное напряжение будет равно нулю.

В зависимости от характера входного сигнала будет формироваться выходное напряжение.

# Виды входных сигналов

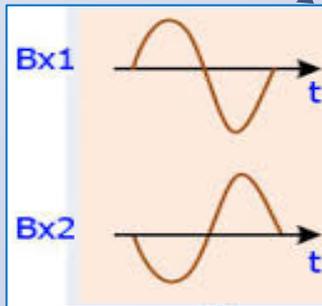
## 1. Синфазный сигнал

на базах обоих транзисторов действуют два напряжения, одинаковые по величине и совпадающие по фазе.



## 2. Дифференциальный сигнал

на базы VT1 и VT2 подаются два одинаковых по величине, но противоположных по фазе сигнала



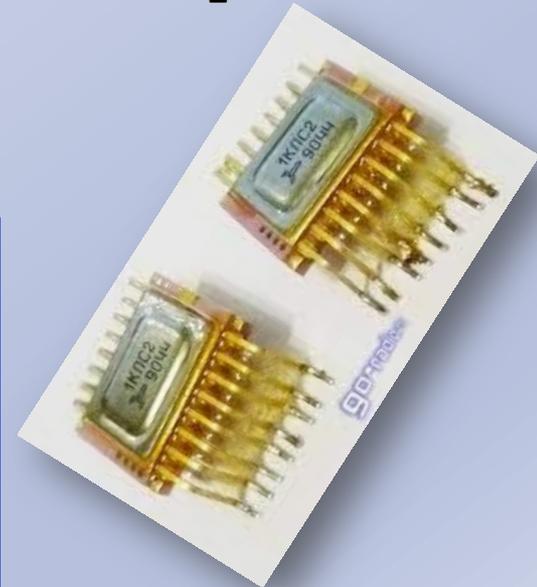
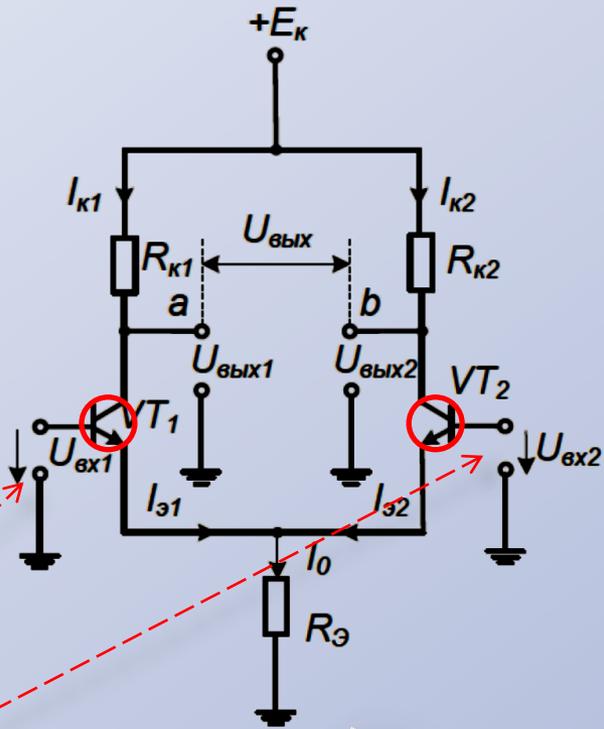
$$U_{\text{вх1}} = \frac{e_{\text{диф}}}{2};$$

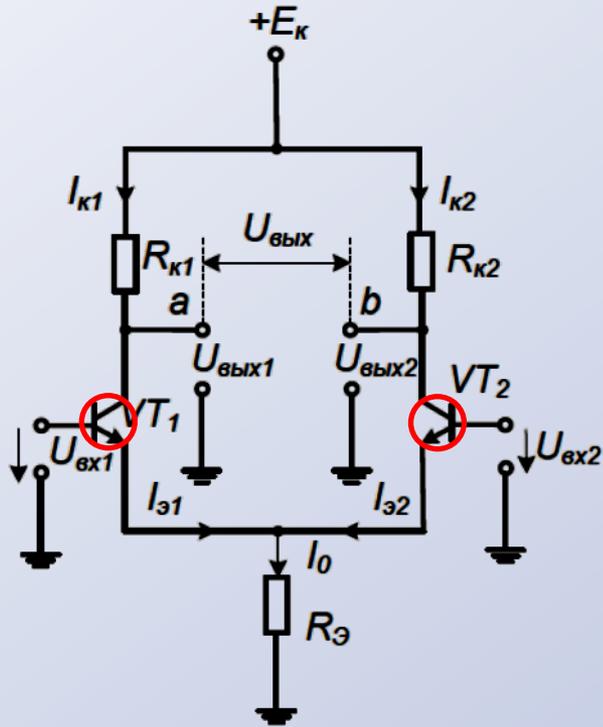
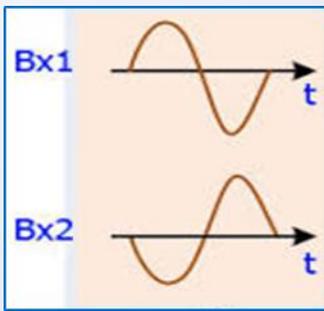
$$U_{\text{вх2}} = -\frac{e_{\text{диф}}}{2}.$$

Потенциалы баз транзисторов меняются одинаково, что вызовет одинаковые по величине изменения потенциалов коллекторов.

Если схема ДУ абсолютно симметрична ( $R_{\text{к1}} = R_{\text{к2}}$ ), то напряжение на выходе ДУ будет равно нулю («дрейф нуля» отсутствует).

В реальном ДУ любые изменения температуры, напряжения питания, появление помех, старение элементов приводят к появлению синфазного сигнала. Только при идеально симметричной схеме ДУ не произойдёт изменения напряжения на выходе в режиме дифференциального сигнала при наличии синфазного сигнала, и «дрейф нуля» на выходе полностью будет отсутствовать.





Электрическая принципиальная схема ДУ

Входной дифференциальный сигнал

базовые токи транзисторов  $i_{б1}, i_{б2}$

приращения тока  $\Delta i_{б1}$   
будет положительным

приращения тока  $\Delta i_{б2}$   
будет отрицательным

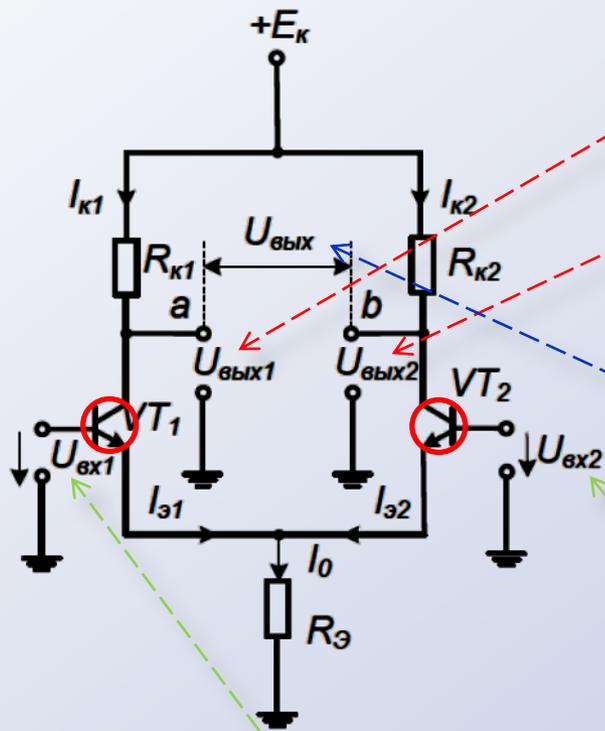
Приращения токов

коллектора  $\pm \Delta i_k$

эмиттера  $\pm \Delta i_э$

Одновременное **возрастание** потенциала коллектора одного транзистора (VT2) и **уменьшение** потенциала коллектора другого транзистора (VT1).

**Возрастание потенциала базы одного транзистора сопровождается одновременным уменьшением потенциала базы другого.**



Электрическая принципиальная схема ДУ

$$U_{\text{вых1}} = E_{\kappa} - (I_{\kappa1} + \Delta I_{\kappa1}) R_{\kappa1} = E_{\kappa} - (0,5I_0 + \Delta I_{\kappa1}) R_{\kappa1};$$

$$U_{\text{вых2}} = E_{\kappa} - (I_{\kappa2} - \Delta I_{\kappa2}) R_{\kappa2} = E_{\kappa} - (0,5I_0 - \Delta I_{\kappa2}) R_{\kappa2}.$$

**Выходное напряжение ДУ является разностью потенциалов между коллекторами транзисторов**

$$U_{\text{ВЫХ}} = (U_{\text{ВЫХ2}} - U_{\text{ВЫХ1}}),$$

поэтому, при таком характере сигналов на входе,

на выходе сигнал оказывается равным

$$U_{\text{ВЫХ}} = 2 |\Delta U_{\kappa}|.$$

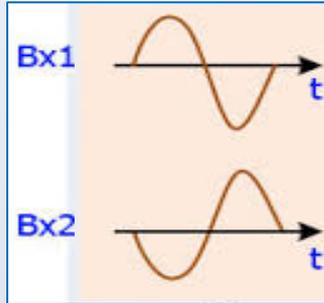
Сигналы, действующие на входах, можно представить *как сумму двух сигналов — дифференциального и синфазного.*

$$U_{\text{вх1}} = U_{\text{синф}} + \frac{U_{\text{диф}}}{2};$$

$$U_{\text{вх2}} = U_{\text{синф}} - \frac{U_{\text{диф}}}{2}.$$

*Рабочим режимом для ДУ является режим дифференциального сигнала*

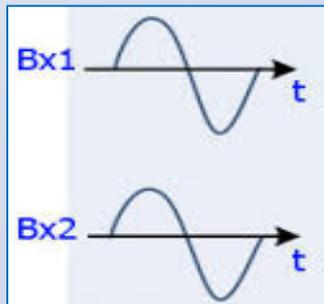
*Для дифференциального сигнала*



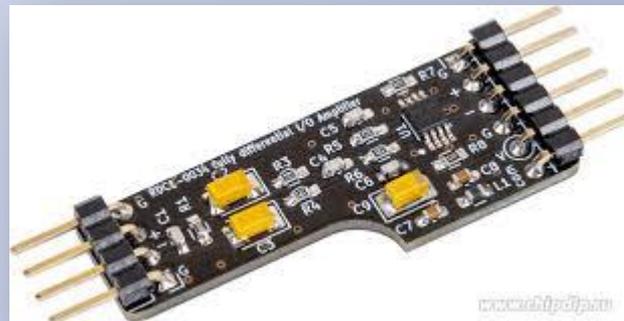
$$U_{\text{диф}} = U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}}$$



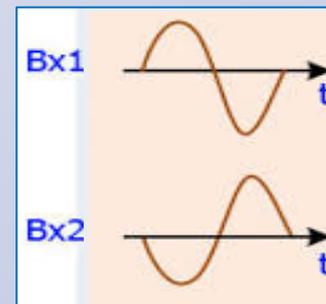
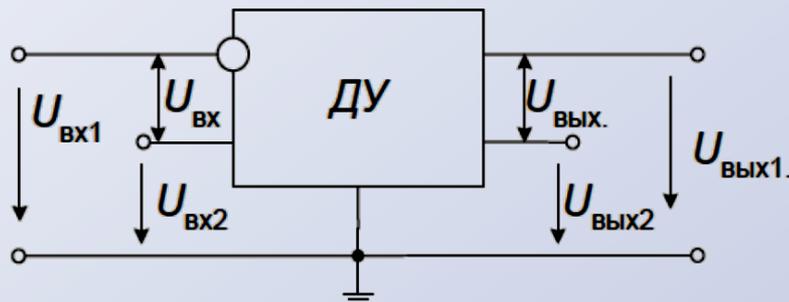
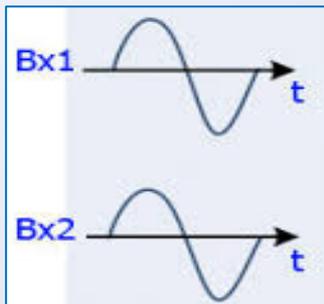
*Для синфазного сигнала*



$$U_{\text{синф}} = \frac{U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}}}{2}$$



# ПАРАМЕТРЫ ДУ



## ПАРАМЕТРЫ ДУ

1. Коэффициент усиления дифференциального сигнала

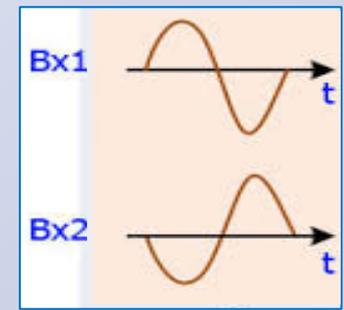
2. Коэффициент усиления синфазного сигнала

3. Коэффициент ослабления синфазного сигнала

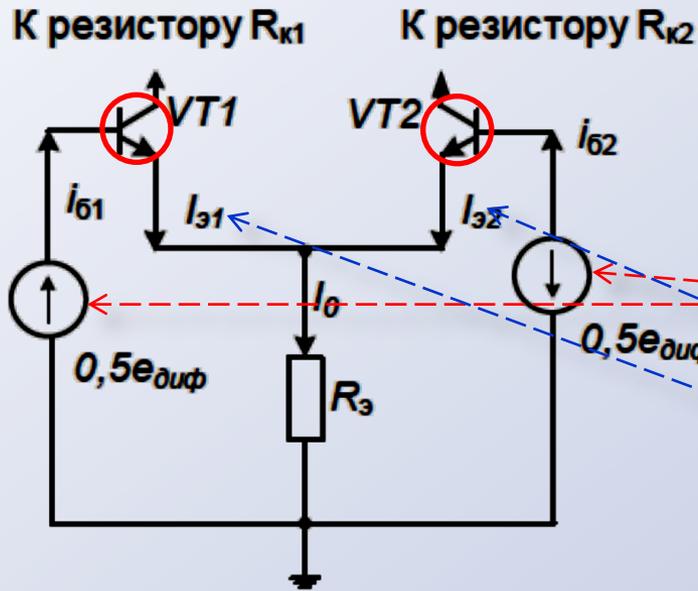
4. Входное сопротивление ДУ в режиме дифференциального сигнала

5. Входное сопротивление для синфазной составляющей сигнала

# 1. Коэффициент усиления дифференциального сигнала



$$K_{\text{диф}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{диф}}}$$



Напряжения, действующие на входах:

$$U_{\text{вх1}} = \frac{e_{\text{диф}}}{2}; \quad U_{\text{вх2}} = -\frac{e_{\text{диф}}}{2}$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа

$$I_{\text{э1}} + I_{\text{э2}} = I_0$$

Схема замещения входных цепей ДУ для дифференциального сигнала

В случае полной симметрии схемы ДУ токи эмиттеров VT1 и VT2 будут равны

$$I_{\text{э1}} = -I_{\text{э2}} = \frac{e_{\text{диф}}}{r_{\text{э}}}$$

$r_{\text{э}}$  — сопротивление эмиттерного перехода

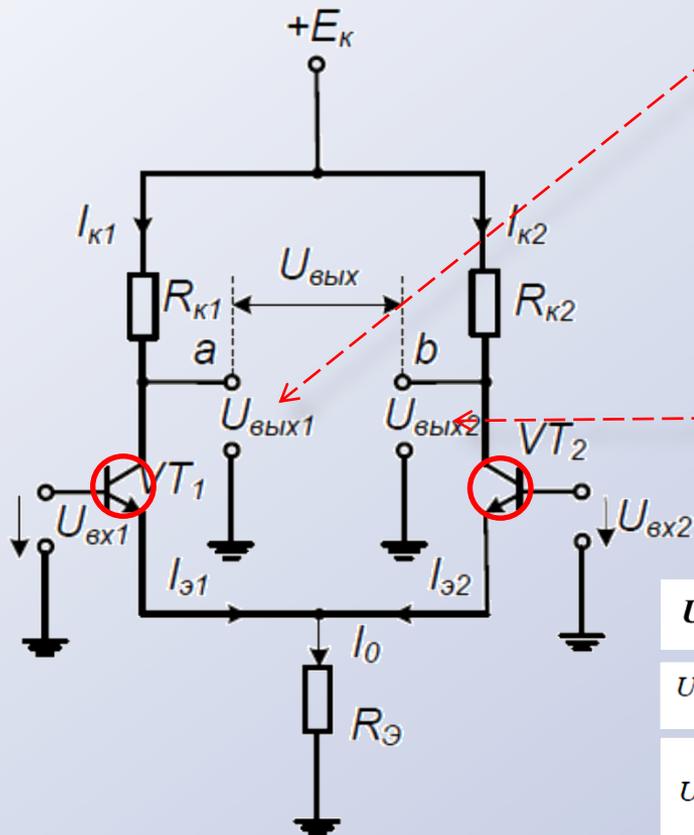
Ток эмиттера и ток коллектора связаны статическим коэффициентом передачи « $\alpha$ ».

Напряжения на выходе каждого плеча схемы:

$$U_{\text{вых1}} = -I_{\text{к1}} R_{\text{к1}} = -\alpha I_{\text{э1}} R_{\text{к1}} = -\alpha \frac{e_{\text{диф}}}{2r_{\text{э1}}} R_{\text{к1}}$$

$$I_{\text{э}} = \frac{e_{\text{диф}}}{2r_{\text{э}}}$$

$$U_{\text{вых2}} = I_{\text{к2}} R_{\text{к2}} = \alpha I_{\text{э2}} R_{\text{к2}} = \alpha \frac{e_{\text{диф}}}{2r_{\text{э2}}} R_{\text{к2}}$$



$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вых2}} - U_{\text{вых1}}$$

$$U_{\text{диф}} = U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}}$$

$$U_{\text{вх1}} = \frac{e_{\text{диф}}}{2}; \quad U_{\text{вх2}} = -\frac{e_{\text{диф}}}{2}$$

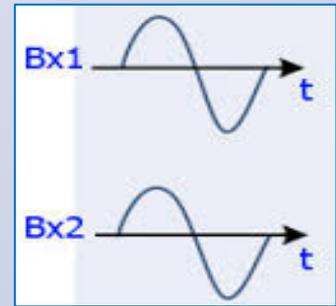
**Коэффициент усиления  
дифференциального  
сигнала в схеме ДУ**

$$K_{\text{диф}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{диф}}} = \alpha \frac{R_{\text{к}}}{r_{\text{э}}}$$

Электрическая принципиальная схема ДУ

**Чем меньше сопротивление эмиттерного перехода, тем больше коэффициент усиления дифференциального сигнала.**

## 2. Коэффициент усиления синфазного сигнала



$$K_{\text{синф}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{синф}}}$$

Для левой и правой ветви схемы будет справедливо уравнение

$$I_{\text{э}} = \frac{e_{\text{синф}}}{r_{\text{э}} + 2R_{\text{э}}} \approx \frac{e_{\text{синф}}}{2R_{\text{э}}}$$

$$r_{\text{э}} \ll R_{\text{э}}$$

В режиме синфазного сигнала при полной симметрии схемы выходные напряжения  $U_{\text{вых1}}$  и  $U_{\text{вых2}}$  будут равны

$$U_{\text{вых1}} = U_{\text{вых2}} = -\alpha \frac{R_{\text{к}}}{2R_{\text{э}}} e_{\text{синф}}$$

**Коэффициент усиления синфазного сигнала в схеме ДУ**

$$K_{\text{синф1}} = K_{\text{синф2}} = \frac{U_{\text{вых}}}{e_{\text{синф}}} = -\alpha \frac{R_{\text{к}}}{2R_{\text{э}}}$$

**Чем больше сопротивление резистора  $R_{\text{э}}$ , тем меньше коэффициент усиления синфазного сигнала**

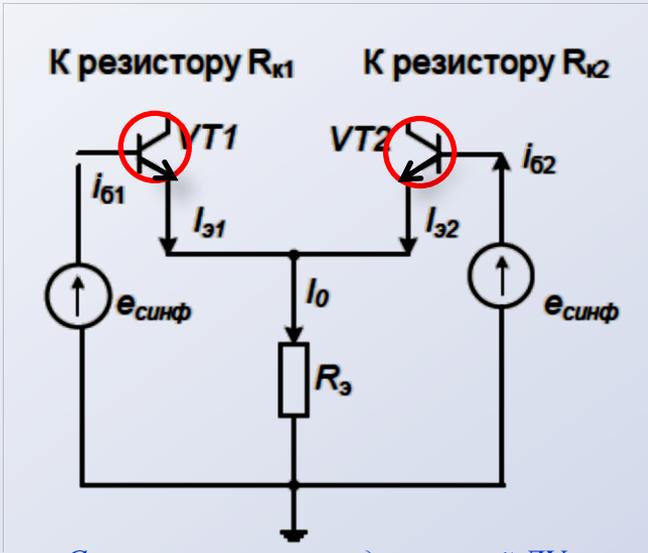
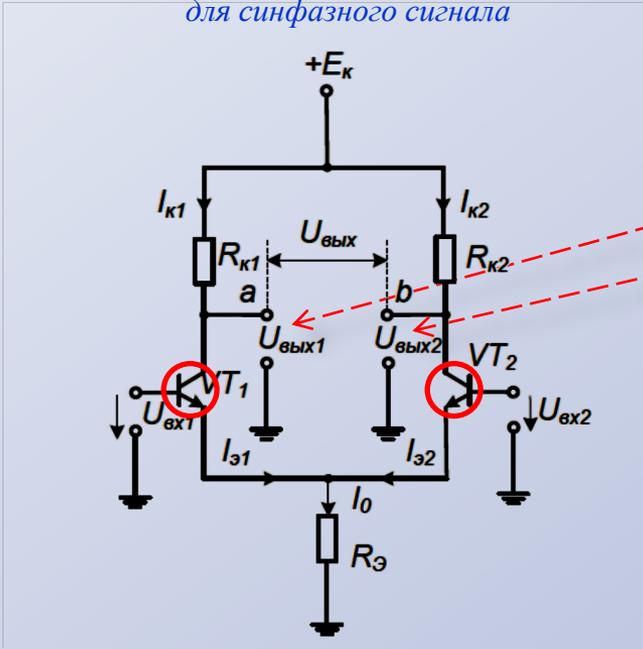
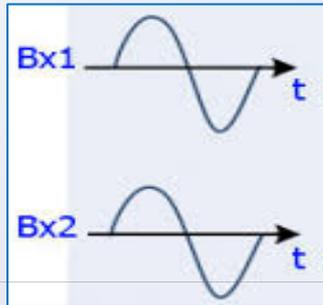


Схема замещения входных цепей ДУ для синфазного сигнала



Электрическая принципиальная схема ДУ

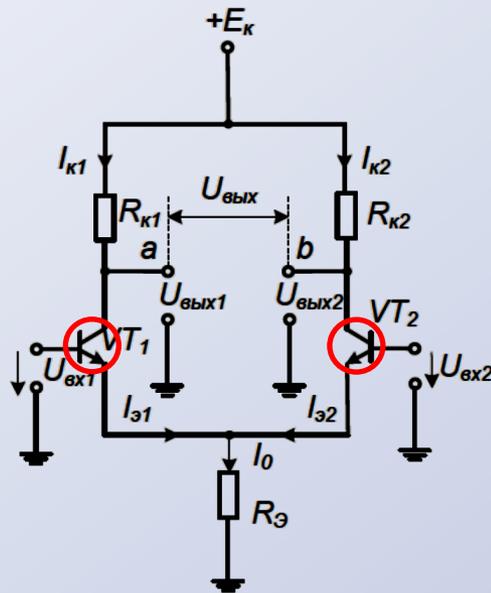
### 3. Коэффициент ослабления синфазного сигнала



Синфазный сигнал — это сигнал помех.

*Коэффициент ослабления синфазного сигнала показывает во сколько раз коэффициент усиления дифференциального сигнала больше коэффициента синфазного сигнала*

$$K_{осл} = \frac{K_{диф}}{K_{синф}} = \frac{R_{\varepsilon}}{r_{\varepsilon}}$$



Электрическая принципиальная схема ДУ

В случае идеального симметричного усилителя уровень синфазного сигнала на выходе равен нулю. Но в реальных схемах ДУ «дрейф нуля» всегда имеет место, так как добиться полной симметрии плеч невозможно.

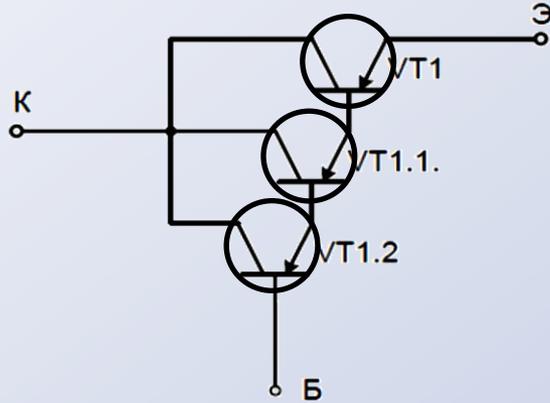
Дифференциальные усилители, схемы которых можно отнести к усилителям самого высокого качества, имеют коэффициент подавления синфазного сигнала около  $10^4 \dots 10^5$ . Коэффициент подавления синфазного сигнала выражают обычно в децибелах.

## 4. Входное сопротивление ДУ в режиме дифференциального сигнала

Входное сопротивление ДУ в режиме дифференциального сигнала равняется удвоенному входному сопротивлению каждого плеча

$$r_{\text{вх.диф}} = 2[(\beta + 1)r_{\text{э}} + r_{\text{б}}$$

Сопротивление  $r_{\text{э}}$  обратно пропорционально току покоя  $I_{\text{нп}}$ , поэтому, для увеличения входного сопротивления целесообразно использовать ДУ в режиме малых токов — в микрорежиме. Кроме того, целесообразно использовать транзисторы с высоким « $\beta$ » (например, составные транзисторы)



Применение составного транзистора, кроме увеличения входного сопротивления, вызывает уменьшение входного тока, что немаловажно при использовании схемы ДУ в интегральном исполнении.

Коэффициент передачи тока базы такой схемы равен произведению коэффициентов трёх транзисторов

$$\beta_{\text{общ}} = \beta_1 \beta_2 \beta_3$$

## 5. Входное сопротивление ДУ в режиме синфазного сигнала

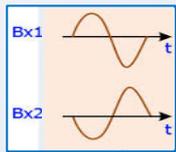
Входное сопротивление для синфазной составляющей сигнала определяется сопротивлением цепи эмиттера  $R_{\text{э}}$

$$r_{\text{вх.синф}} = (\beta + 1) R_{\text{э}}$$

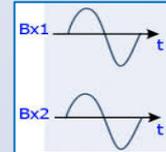
$$r_{\text{э}} \ll R_{\text{э}} \longrightarrow r_{\text{вх.синф}} \gg r_{\text{вх.диф}}$$

Входные сопротивления ДУ зависят от параметров транзистора, от сопротивления генератора стабильного тока.

# ОСОБЕННОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО И СИНФАЗНОГО РЕЖИМОВ В СХЕМЕ ДУ. ООС В ДУ



## Особенность ДУ



при усилении  
дифференциального  
сигнала

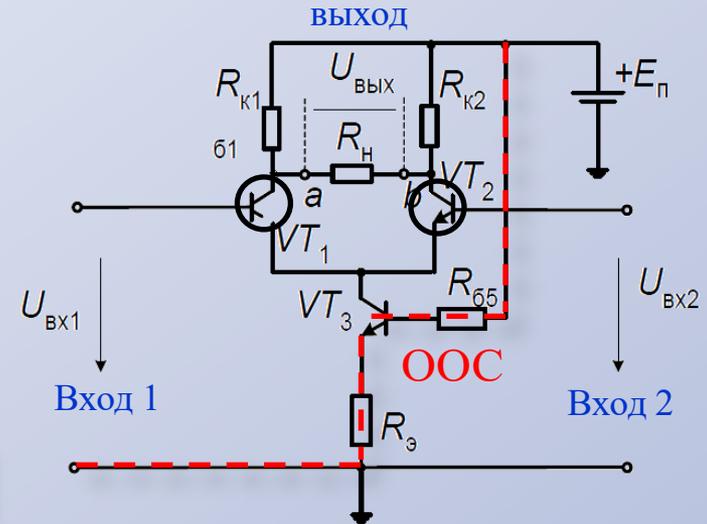
при усилении  
синфазного сигнала

возрастание тока через один из транзисторов сопровождается уменьшением тока через другой, в результате ток через резистор  $R_э$  остается неизменным.

на резисторе ( $R_э$ ) в цепи эмиттеров  $VT1$  и  $VT2$  по переменной составляющей создается падение напряжения

ООС отсутствует и резистор  $R_э$  не влияет на коэффициент усиления ДУ в целом.

Это напряжение ООС, то есть усиление синфазного сигнала происходит при наличии отрицательной обратной связи и чем она глубже, тем меньше коэффициент усиления синфазного сигнала.



$$I_{э1} + I_{э2} = 2I_{э};$$

$$U_{э} = 2I_{э}R_{э}.$$

Важной особенностью ДУ является тот факт, что он усиливает дифференциальный (рабочий) сигнал, а синфазный ослабляет.

Увеличить ООС можно увеличением сопротивления резистора  $R_э$ .

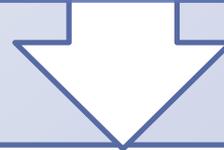
## Увеличение сопротивления резистора $R_3$

+ увеличивается  
ООС – уменьшение  
коэффициента усиления  
синфазного сигнала

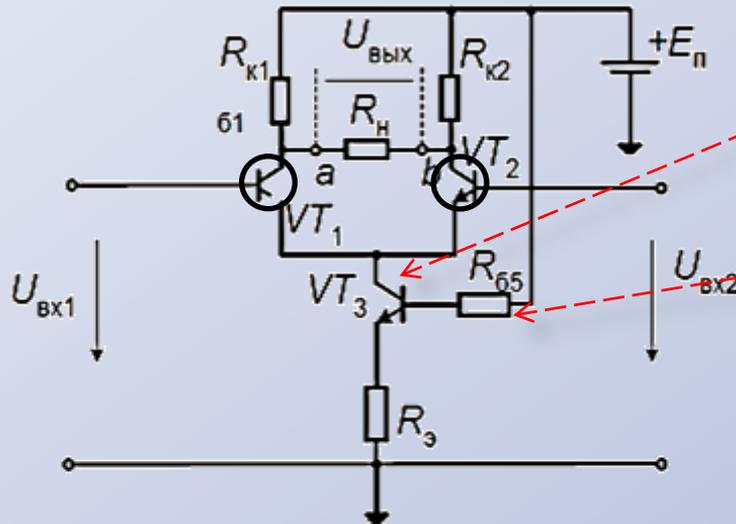
- увеличивается  
мощность, рассеиваемая  
на нем

- увеличивается падение  
напряжения на эмиттерах  
транзисторов

- активные элементы  
занимают много места  
на кристалле ИС



В современных схемах ДУ используют  
дифференциальное сопротивление **дополняющего транзистора  $VT_3$**



Большое дифференциальное сопротивление  
дополняющего транзистора  $VT_3$ , ток базы  
которого задается с помощью резистора  $R_{65}$ .

Следовательно, схему на транзисторе  $VT_3$   
можно рассматривать как генератор тока,  
сопротивление которого очень большое.

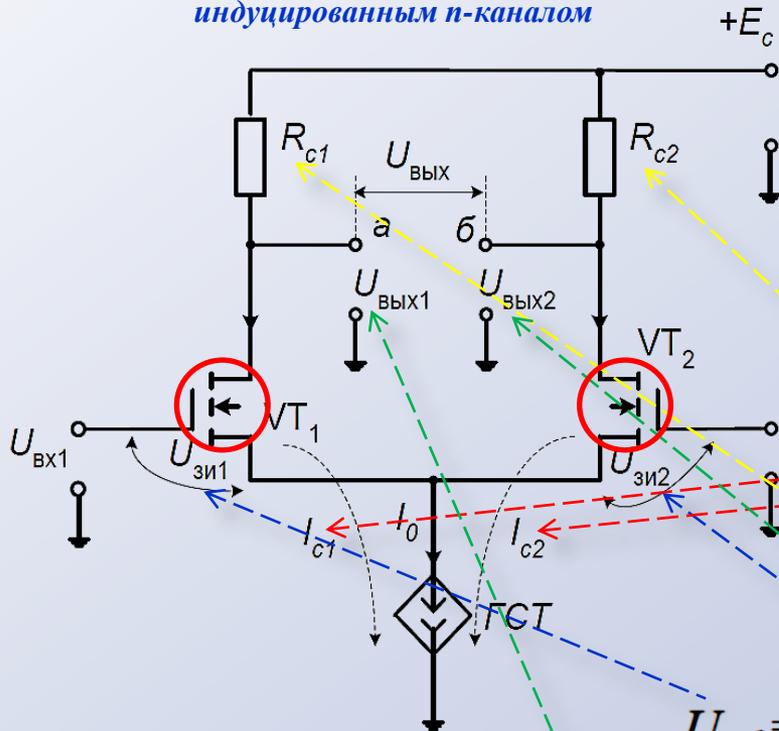
Таким образом, за счёт сопротивления генератора удаётся  
значительно ослабить действие синфазного сигнала.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала

$$K_{осл} = \frac{K_{диф}}{K_{синф}} = \frac{r_2}{r_э}$$

# ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУ НА ПОЛЕВЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРАХ

Схема ДУ на МОП-транзисторах с индуцированным n-каналом



Отличие от ДУ на биполярных транзисторах: входные цепи МОП-транзисторов не потребляют токов

1. Рабочая точка для обоих транзисторов задаётся генератором стабильного тока (схема «токовое зеркало»).
2. По первому закону Кирхгофа

$$I_{c1} + I_{c2} = I_0$$

При симметричной схеме ДУ :

$$R_{c1} = R_{c2};$$

$$I_{c1} = I_{c2} = 0,5 I_0;$$

$$U_{зи1} = U_{зи2}.$$

$$U_{зи1} = U_{вх1}; U_{зи2} = U_{вх2};$$

3. Выходные напряжения

$$U_{вых1} = E_c - I_{c1} R_{c1};$$

$$U_{вых2} = E_c - I_{c2} R_{c2}.$$

Усиления синфазного сигнала не происходит:

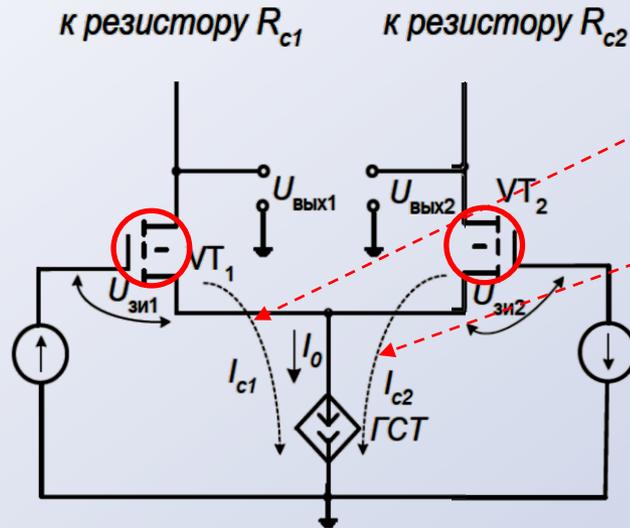
- при действии синфазного сигнала напряжения на обоих входах изменяются на одну и ту же величину;
- токи в каждой ветви схемы остаются без изменения;
- выходные напряжения также останутся без изменения;

Полное подавление синфазного сигнала происходит в том случае, если ток генератора стабильного тока делится поровну между левой и правой ветвями схемы ДУ.

## На входе ДУ дифференциальный сигнал

Схема замещения входных цепей для дифференциального сигнала

Если на входе ДУ дифференциальный сигнал получил приращение  $\pm \Delta U_{зв}$  то и токи  $I_{c1}$  и  $I_{c2}$  изменятся:



$$I_{c1} = 0,5 I_0 + \Delta I_{c1};$$

$$I_{c2} = 0,5 I_0 - \Delta I_{c2}.$$

По первому закону Кирхгофа  $I_{c1} + I_{c2} = I_0$

Напряжения на выходе

$$U_{вых1} = E_c - (0,5 I_0 + \Delta I_{c1}) R_{c1};$$

$$U_{вых2} = E_c - (0,5 I_0 - \Delta I_{c2}) R_{c2}.$$

$$U_{вых} = U_{вых2} - U_{вых1}.$$

Схема ДУ усиливает только дифференциальные составляющие сигнала.

Переменные составляющие тока стока  $i_{c1} = -i_{c2} = S \frac{e_{диф}}{2}.$

$$U_{вых1} = i_{c1} R_c = -SR_c \frac{e_{диф}}{2},$$

$$U_{вых2} = i_{c2} R_c = +SR_c \frac{e_{диф}}{2}.$$

Коэффициент усиления ДУ

$$K = \frac{U_{вых}}{e_{диф}}$$

$$K = 2 SR_c \frac{e_{диф}}{2} = SR_c$$

# На входе ДУ синфазный сигнал

Оба входа ДУ оказывается под одним потенциалом

Схема замещения входных цепей для синфазного сигнала

$$(U_{зи1} = U_{зи2})$$

Токи  $i_{c1}$  и  $i_{c2}$  равны и имеют одно направление

$$i_{c1} = i_{c2} = 2SU_{зи}$$

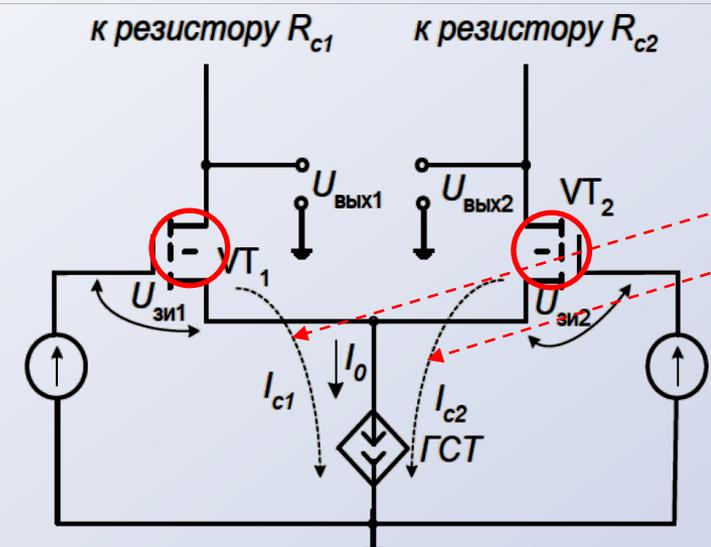
Напряжение  $U_{зи}$

$$U_{зи} = e_{\sin\phi} - i_c r_{\Gamma} = e_{\sin\phi} - 2SU_{зи} r_{\Gamma}$$

$r_{\Gamma}$  — сопротивление генератора стабильного тока (ГСТ).

$$U_{зи} = \frac{e_{\sin\phi}}{1 + 2Sr_{\Gamma}} \approx \frac{e_{\sin\phi}}{2Sr_{\Gamma}}$$

$$U_{\text{ВЫХ1}} = U_{\text{ВЫХ2}} = SR_c U_{зи} \approx \frac{R_c}{2r_{\Gamma}} e_{\sin\phi}$$



Выходные напряжения в режиме синфазного сигнала

Коэффициент усиления синфазного сигнала

с несимметричного выхода

$$K_{\sin\phi} = \frac{R_{c1}}{2r_{\Gamma}}$$

$r_{\Gamma} \gg R_{c1}$

с симметричного выхода

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ1}} - U_{\text{ВЫХ2}} = 0.$$

$$K_{\text{осл}} = \frac{K_{\text{диф}}}{K_{\text{синф}}} = \frac{Sr_{\Gamma}}{2}$$