

# УСИЛИТЕЛИ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ



# ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ ЛЕКЦИИ

- **ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ**
- **ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В УСИЛИТЕЛЯХ**
- **ВЛИЯНИЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ**
- **УСТОЙЧИВОСТЬ УСИЛИТЕЛЕЙ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ**
- **КЛАССЫ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

Важнейшими характеристиками усилителя являются:

- коэффициент усиления,
- полоса пропускания (диапазон рабочих частот усилителя),
- входное и выходное сопротивление,
- выходная мощность,
- степень искажения выходного сигнала и др

**КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ** — отношение установившихся значений **ВЫХОДНОГО** и **ВХОДНОГО** сигналов усилителя.

В зависимости от типа усиливаемой величины различают коэффициенты усиления:

- по **напряжению**  $k_U = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх}$ ;
- по **току**  $k_I = \Delta I_{вых} / \Delta I_{вх}$ ;
- по **мощности**  $k_P = \Delta P_{вых} / \Delta P_{вх} = k_U \cdot k_I$ .

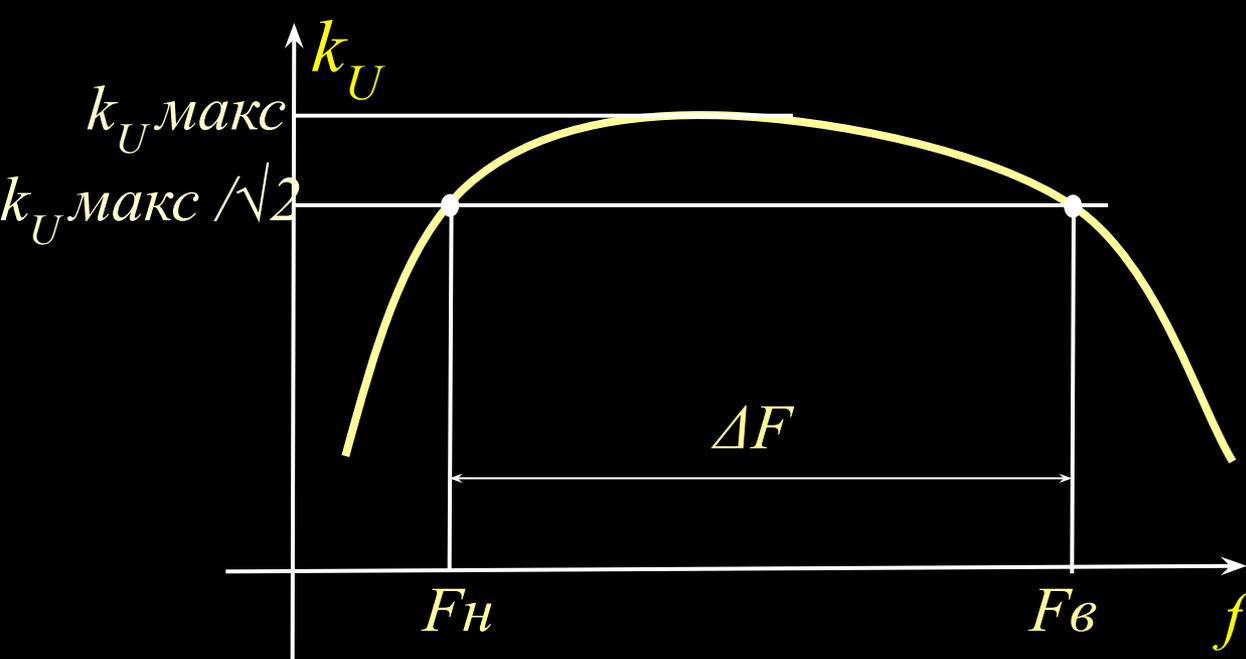
При **последовательном** (каскадном) соединении нескольких усилительных устройств **общий коэффициент усиления** определяется произведением их коэффициентов:

- $k_{общ} = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n$ .

- 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, которые выражаются в **дециБелах**:
- $k_p \text{ [дБ]} = 10 \lg (P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}) = 10 \lg k_p.$

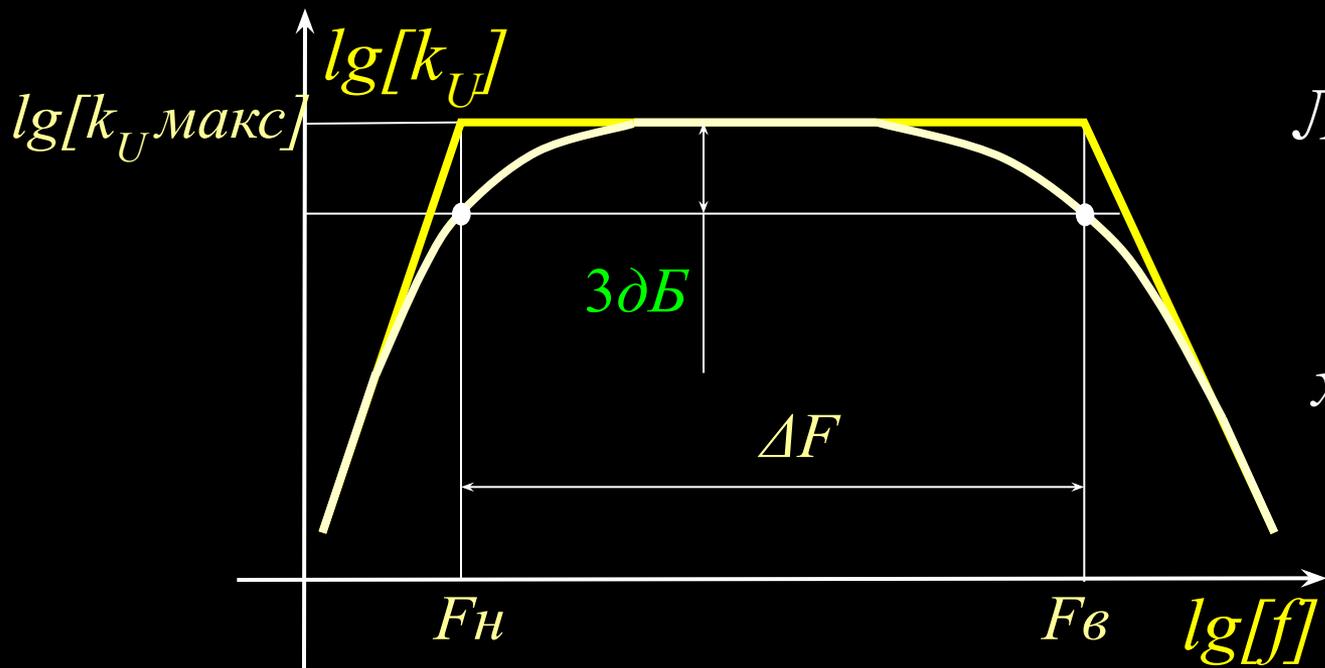
- Поскольку **МОЩНОСТЬ** пропорциональна **квадрату тока** или **напряжения**, то для коэффициентов усиления по **ТОКУ** и **напряжению** можно записать:
  - $k_U [\text{дБ}] = 20 \lg (U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}) = 20 \lg k_U;$
  - $k_I [\text{дБ}] = 20 \lg (I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}}) = 20 \lg k_I.$
- Логарифмическая мера оценки удобна при анализе многокаскадных усилителей, потому что общий коэффициент усиления при переходе к логарифмическим единицам измерения определяется суммой коэффициентов усиления отдельных каскадов:
  - $k_{\text{общ}}[\text{дБ}] = k_1[\text{дБ}] + k_2[\text{дБ}] + \dots + k_n[\text{дБ}].$

- **ПОЛОСА УСИЛИВАЕМЫХ ЧАСТОТ** – диапазон рабочих частот  $\Delta F$ , в пределах которого **коэффициент усиления по напряжению** (или **току**) не снижается ниже значения от своего **максимального значения**.
- Зависимость коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала называется **АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ (АЧХ)** усилителя.
- **Минимальная частота** усилителя  $F_n$  определяется по точке, в которой **коэффициент усиления по напряжению** уменьшается **в корень из двух раз** по сравнению с максимальным значением  $k_{U\_макс}$ . Аналогично определяется **максимальная частота** усилителя  $F_v$ .



Амплитудно-  
частотная  
характеристика  
усилителя

- Если коэффициент усиления определяется в **дециБелах**, то значениям граничных частот  **$F_H$**  и  **$F_B$**  соответствует уменьшение коэффициента усиления на **3 дБ**.
- Уменьшению на **3 дБ** коэффициента усиления **по мощности** на граничных частотах соответствует уменьшение коэффициента усиления по мощности в **2 раза**



Логарифмическая  
амплитудно-  
частотная  
характеристика  
усилителя

- На практике часто амплитудно-частотные характеристики строят в **логарифмическом масштабе** (как по оси частот  $f$ , так и по оси коэффициента усиления  $k_U$ ) и вместо плавных изогнутых линий используют **кусочно-линейную аппроксимацию**.

- Такие линейные асимптотические графики в логарифмическом масштабе называют – **логарифмические амплитудно-частотные характеристики – ЛАЧХ**.
- Максимальное расхождение между **реальной** амплитудно-частотной характеристикой и её **кусочно-линейной аппроксимацией** получается **не более 3 дБ** в точках, соответствующих нижней и верхней частоте ( **$F_n$ ,  $F_v$** ) усилителя.
- В этих же точках происходит **изменение наклона** асимптотических **ЛАЧХ**, поэтому такие частоты называются – **частотами сопряжения** (или **сопрягающими частотами**).

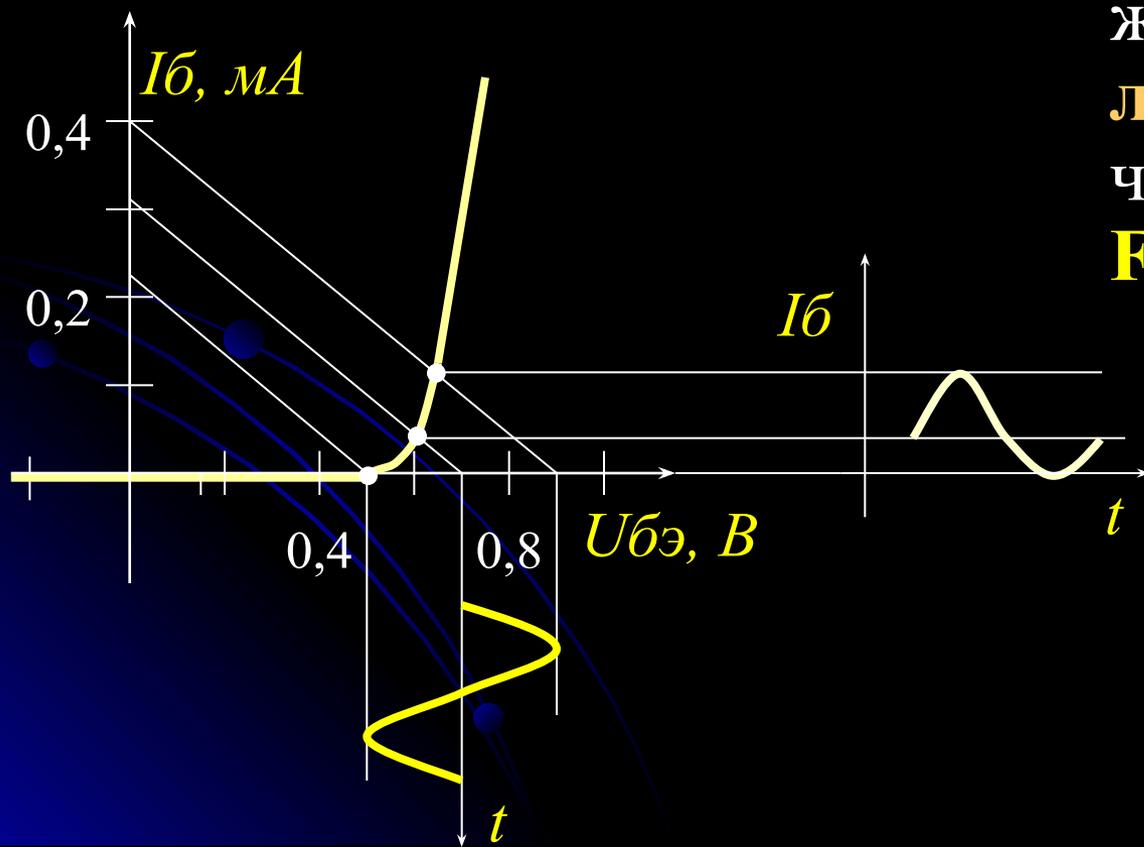
- **ВХОДНОЕ И ВЫХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ** – важнейшие параметры усилительных устройств. Их значения должны учитываться при **согласовании** усилительного устройства как с **источником входного сигнала**, так и с **нагрузкой**.
- В общем виде значения входного и выходного сопротивления носят **комплексный** характер и являются **функциями частоты**.
- Входное и выходное сопротивление определяются выражениями:
  - $Z_{вх}(f) = U_{вх}(f) / I_{вх}(f)$  при  $R_n = \text{const}$ ;
  - $Z_{вых}(f) = \{U_{вых\_xx}(f) - U_{вых\_нагр}(f)\} / I_{нагр}(f)$

- **ИСКАЖЕНИЯ СИГНАЛОВ В УСИЛИТЕЛЕ** связано, во-первых, с **нелинейной зависимостью** приращений выходного сигнала от приращений входного, обусловленной **нелинейностью ВАХ** применяемых элементов, и, во-вторых, с **частотной зависимостью комплексных** коэффициентов передачи усилителей.

Поэтому при анализе работы усилителей рассматривают **два вида искажений** выходного сигнала по отношению ко входному:

- **нелинейные искажения** и
- **амплитудно-фазовые искажения** (линейные искажения), в результате которых **изменяется как форма**, так и **частотный спектр** усиливаемого сигнала.

- Причина возникновения **нелинейных искажений** поясняется на рис.
- При воздействии на вход усилительного устройства **гармонического (синусоидального)** сигнала с частотой **F1**, выходное напряжение или ток кроме гармонического сигнала с частотой **F1** будет содер-



жать **ряд дополнительных гармоник** с частотами, **кратными F1**.

*Искажения  
формы входного  
сигнала из-за  
нелинейности  
входной ВАХ*

- Появление этих гармоник обусловлено **нелинейной зависимостью коэффициента усиления** от величины входного сигнала.
- Наличие **нелинейных искажений** всегда связано с появлением на выходе усилителя дополнительных, **отсутствующих на входе**, гармонических составляющих сигнала.
- Для **количественной оценки** нелинейных искажений служит **коэффициент нелинейных искажений** (или коэффициент гармоник, **clear factor**)  $K_{ни}$  или  $K_{гarm}$ , в основу которого положена оценка **относительной величины** высших гармоник к основной гармонике в выходном сигнале:

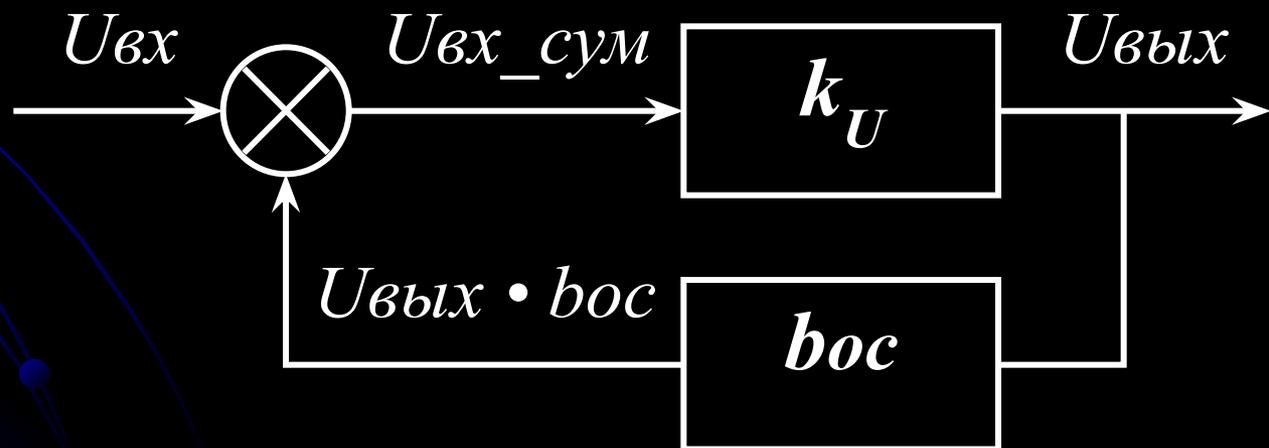
- Частотные амплитудно-фазовые искажения (**линейные искажения**) усилительного устройства оценивают по виду его **амплитудно-частотной** и **фазо-частотной** характеристик (**АЧХ** и **ФЧХ**).
- **Идеальные** (с точки зрения отсутствия частотных искажений) амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики имеют **постоянные значения** во всем диапазоне усиливаемых частот.
- Однако на практике это условие трудно обеспечить. Поэтому возникающие амплитудно-частотные искажения можно оценить количественно с помощью коэффициента частотных искажений  $M$ , численно равному отношению коэффициента усиления в области средних частот к коэффициенту усиления для заданной частоты:

$$M(f) = k_U(f_{cp}) / k_U(f) \quad [ \text{разах, дБ} ].$$

# ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В УСИЛИТЕЛЯХ

- Понятие "**ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ**" (**ОС**) относится к числу распространенных, оно давно вышло за рамки узкой области техники и употребляется сейчас в широком смысле.
- В системах управления обратная связь используется для сравнения выходного параметра с заданным значением и выполнения соответствующей коррекции.
- В общем случае **сигнал обратной связи** может либо **суммироваться с входным**, либо **вычитаться из входного сигнала** усилителя.
- В зависимости от этого различают **положительную** и **отрицательную** обратные связи.

- **Отрицательная обратная связь (ООС)** – это процесс передачи части выходного сигнала обратно на вход усилителя **в противофазе**, при этом **погашается** часть входного сигнала.
- Для **ООС** сигнал обратной связи  $U_{вых} \cdot b_{oc}$  подается **в противофазе** по отношению ко входному сигналу  $U_{вх}$ , т.е. сигнал обратной связи **вычитается** из входного:



- $U_{вых} = U_{вх\_сум} \cdot k_U$
- $U_{вх\_сум} = U_{вх} - U_{вых} \cdot b_{ос}$
- Коэффициент усиления по напряжению с **ООС** равен:
- $k_{U-оос} = U_{вых} / U_{вх} = k_U / (1 + b_{ос} \cdot k_U)$ .
- Введение в усилитель **ООС** уменьшает коэффициент усиления.
- Величину  $(1 + b_{ос} \cdot k_U)$  обычно называют **глубиной обратной связи**.

- Для **ПОС** сигнал обратной связи  $U_{\text{вых}} \cdot b_{\text{ос}}$  подается в фазе по отношению ко входному сигналу  $U_{\text{вх}}$ , т.е. сигнал обратной связи суммируется с входным:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх\_сум}} \cdot k_U$$

$$U_{\text{вх\_сум}} = U_{\text{вх}} + U_{\text{вых}} \cdot b_{\text{ос}}$$

- Поэтому:

$$k_{U\text{-пос}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = k_U / (1 - b_{\text{ос}} \cdot k_U).$$

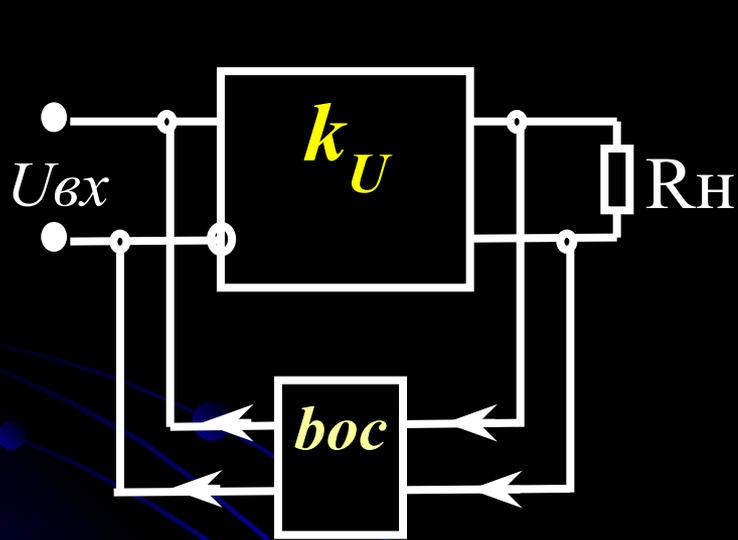
- Введение в усилитель положительной обратной связи (**ПОС**) **увеличивает** коэффициент усиления.

- Если коэффициент передачи цепи обратной связи  $b_{oc}$  достигнет значения  $1/k_U$ , то знаменатель в обратном коэффициенте усиления обращается в нуль, т.е. коэффициент усиления с ПОС равен **бесконечности**.
- При дальнейшем увеличении  $b_{oc}$  — коэффициент усиления  $k_{U-ПОС}$  становится **отрицательным**.
- Такой усилитель становится **неустойчивым**, появляется **неоднозначность состояния** — **триггерные свойства** — или усилитель превращается в генератор переменного напряжения.

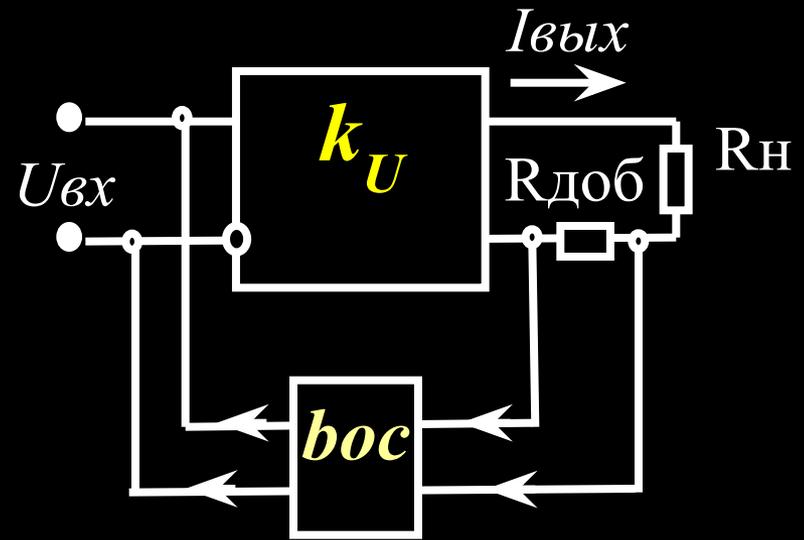
- По способу передачи **выходного** сигнала **ОС** разделяется на:
- **ОС по выходному напряжению** – с выхода снимается **часть напряжения** сигнала и подается на вход схемы;
- **ОС по выходному току** – **последовательно** с нагрузкой включается **резистор**; напряжение, выделяемое на этом резисторе, пропорционально **выходному току**; это напряжение по цепи обратной связи подается на вход усилителя.

- По способу подачи сигнала **на вход** усилителя **ОС** разделяется на:
- **последовательная ОС** – сигнал **ОС** подается на вход усилителя **последовательно с источником входного сигнала**; в этом случае на входе усилителя выполняется **алгебраическое суммирование напряжений**;
- **параллельная ОС** – сигнал **ОС** подается на вход усилителя **параллельно с источником входного сигнала**; в этом случае на входе усилителя происходит **алгебраическое суммирование токов**.

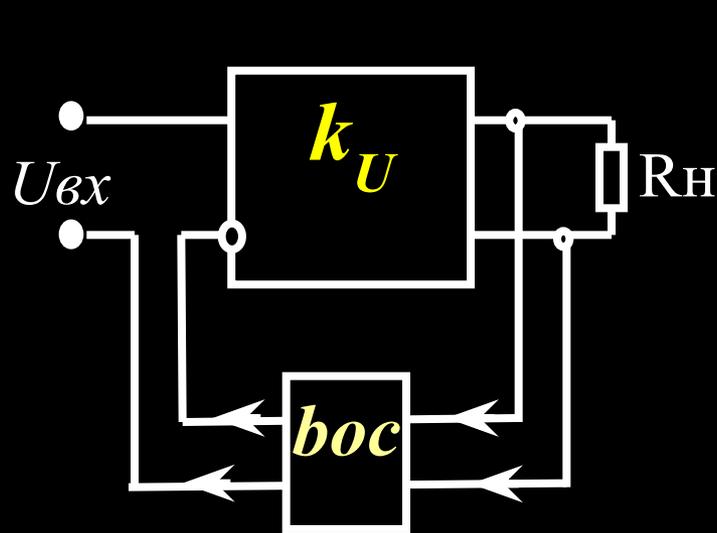
- Комбинируя два способа передачи **ВЫХОДНОГО СИГНАЛА** и два способа подачи сигнала **ОС** на **ВХОД** усилителя, можно получить **четыре** схемы усилителей с обратной связью:



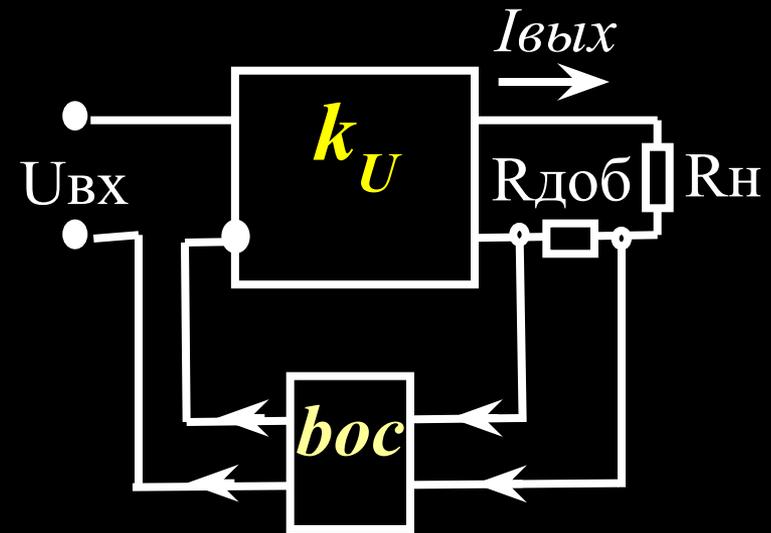
*Параллельная ОС по  
выходному напряжению*



*Параллельная ОС по  
выходному току*



*Последовательная ОС по выходному напряжению*

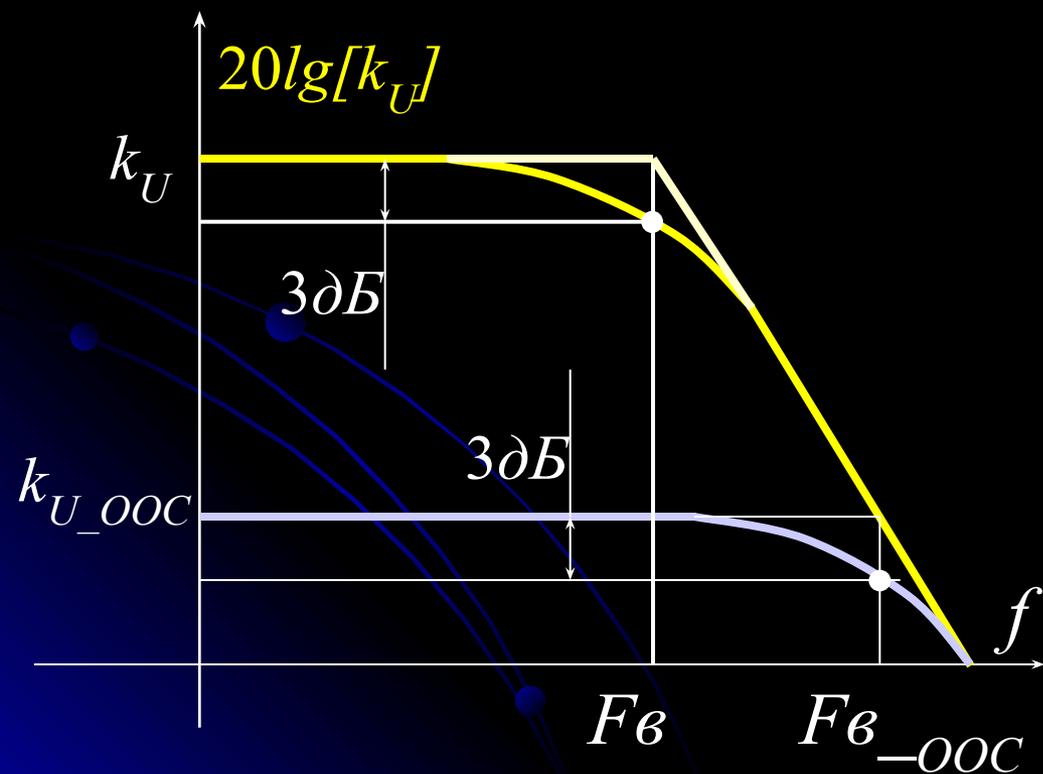


*Последовательная ОС по выходному току*

- На этих рисунках **усилитель** с коэффициентом усиления  $k_U$  (изображен как **четырёхполюсник**) имеет два входа (неинвертирующий и инвертирующий) и два выхода.
- Цепь **обратной связи** с коэффициентом передачи «*voc*» также обозначена в виде **четырёхполюсника**.

# ВЛИЯНИЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

- **ПОЛОСА УСИЛИВАЕМЫХ ЧАСТОТ.** Введение ООС всегда расширяет полосу усиливаемых частот.



По рис. можно понять термин «**площадь усиления**» усилителя:  
$$S = k_U \cdot F_v.$$

- Если усилитель охвачен цепью **ООС**, глубина которой  $(1 + b_{oc} \cdot k_U) = 10$ . Тогда коэффициент усиления с **ООС** равен:

$$k_{U-оос} = k_U / (1 + b_{oc} \cdot k_U) = k_U / 10,$$

- т.е. коэффициент усиления **уменьшился на 20дБ**.
- При этом значение **верхней частоты** полосы пропускания усилителя, охваченного **ООС**, **увеличилось**:

$$F_{v-оос} = F_v \cdot (1 + b_{oc} \cdot k_U)$$

в 10 раз.

- Для усилителя, охваченного отрицательной обратной связью «**площадь усиления**» не изменяется:

$$S = k_U \cdot F_v = S_{оос} = k_{U оос} \cdot F_{v-оос}.$$

- **НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ.** Введение в усилительное устройство цепи **ООС** снижает как коэффициент нелинейных искажений  **$K_{ни}$** , так и влияние на его выходной сигнал внешних помех:

$$K_{ни\_оос} = K_{ни} / (1 + b_{ос} \cdot k_U),$$

т.е. **глубина обратной связи** –  **$(1 + b_{ос} \cdot k_U)$**  – в этом выражении учитывает степень уменьшения нелинейных искажений.

- Введение **ООС** является наилучшим способом уменьшения искажений и наводимых помех, когда остальные методы линеаризации усилителя уже исчерпаны.

- **ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ.** Изменение входного сопротивления усилителя, охваченного цепью **ООС**, зависит только от способа ее **введения во входную цепь** устройства и не зависит от того, каким образом этот сигнал получен на выходе.
- Введение в усилитель **последовательной ООС** в **глубину отрицательной обратной связи** раз увеличивает его входное сопротивление:

$$Z_{вх\_оос} = Z_{вх} (1 + b_{оос} \cdot k_U),$$

- где :  $Z_{вх}$  – входное сопротивление усилителя **без ООС**.

- **Увеличение входного сопротивления** можно объяснить следующим образом:
- при введении **последовательной ООС** на входе усилителя действует разность напряжений  $U_{ист} - U_{оос}$ , что при заданном значении источника входного сигнала  $U_{ист}$  приводит к фактическому уменьшению входного тока  $I_{вх}$ ;
- поэтому **входное сопротивление** усилителя с цепью **ООС**, равно:  $Z_{вх\_оос} = U_{ист} / I_{вх}$  — увеличивается.

- При введении **ПОС** ситуация меняется на **противоположную**. **Напряжение ПОС** складывается на входе усилителя с напряжением источника входного сигнала, что приводит к **увеличению входного тока** – это эквивалентно уменьшению входного сопротивления:

$$Z_{вх\_пос} = Z_{вх} (1 - b_{ос} \cdot k_U).$$

- При значении  **$b_{ос} = 1 / k_U$**  входное сопротивление усилителя  **$Z_{вх\_пос}$**  становится **нулевым**, а при  **$b_{ос} > 1 / k_U$**  – входное сопротивление становится **отрицательным**.

- Введение в усилитель **параллельной ООС** **уменьшает входное сопротивление**, так как фактически **увеличивается ток**, вытекающий из источника входного напряжения, за счет тока, протекающего в цепи **ООС**.
- 

- **ВЫХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ** усилительного устройства, охваченного цепью **обратной связи**, зависит только от способа **снятия сигнала** обратной связи и не зависит от того, каким образом этот сигнал **введен в его входную цепь**.
- Введение в усилитель **ООС по выходному напряжению** уменьшает его выходное сопротивление в **глубину отрицательной обратной связи** раз:

$$Z_{\text{вых-оос}} = Z_{\text{вых}} / (1 + b_{\text{ос}} \cdot k_{\text{У}}).$$

- Любая ООС стремится поддержать неизменным значение того параметра, который используется для получения сигнала обратной связи.
- Поэтому ООС по напряжению при действии внешних возмущений (в частности — изменении выходного тока при изменении сопротивления нагрузки) стремится поддержать неизменным значение выходного напряжения усилителя, т.е.
- приближает выходное напряжение усилителя к идеальному источнику переменного напряжения (обладающего минимальным выходным сопротивлением).

- Для случая усилителя с **ПОС по выходному напряжению** получим:

$$Z_{\text{вых}}_{\text{-ПОС}} = Z_{\text{вых}} / (1 - b_{oc} \cdot k_U).$$

- При  $b_{oc} > 1/k_U$  – выходное сопротивление усилителя становится **отрицательным**.



- Введение в усилитель **ООС по выходному току** увеличивает его выходное сопротивление:

$$Z_{вых-оос} = Z_{вых} + Z_{доб} \cdot b_{ос} \cdot k_U,$$

где:  $Z_{доб}$  – сопротивление добавочного резистора  $R_{доб}$ , включенного в цепь протекания **выходного тока усилителя**.

- **ООС по выходному току** стремится поддерживать **неизменным контролируемый параметр** – выходной ток, приближая выходную цепь усилителя по свойствам **к идеальному источнику переменного тока**, обладающего **большим выходным сопротивлением**.

- Для случая усилителя с **ПОС по выходному току** получим:

$$Z_{вых\_оос} = Z_{вых} - Z_{доб} \cdot b_{ос} \cdot k_U,$$

- Как следует из приведенного выражения, при определенном выборе параметров цепи **ПОС выходное сопротивление** усилителя может стать **отрицательным**.

- **ЧАСТОТНО-ФАЗОВЫЕ ИСКАЖЕНИЯ** при введении **ООС** уменьшаются в *глубину отрицательной обратной связи* раз:

$$\varphi(\omega) = -\omega / Fv_{-оос} = \omega / Fv \cdot (1 + bос \cdot k_U).$$

- Это выражение показывает, что при введении цепи **ООС** **фазовый сдиг**, вносимый усилителем, **уменьшается**.
- При этом безразлично, какой вид **ООС** используется.

# Выводы:

- Введение **цепи ОС** может изменить основные параметры усилительного устройства как **количественно**, так и **качественно** (например, выходное сопротивление усилителя может превратиться из **положительного** в **отрицательное**);
- Введение цепей **ООС** и **ПОС**, как правило, имеет **противоположное воздействие** на параметры усилителя;

- Способы **введения** и **снятия** сигналов **ОС** могут влиять на **характер** воздействия обратной связи на параметры усилителя;
  - Если в качестве элементов **цепи ОС** использовать **частотнозависимые четырёхполюсники**, можно получить требуемое воздействие на параметры усилителя только **в заданном диапазоне частот** входного сигнала.
- 

# Устойчивость усилителя

- В реальных усилителях, охваченных **обратной связью**, всегда имеются **реактивные элементы**, накапливающие энергию.
- Даже в усилителях **на резисторах** имеются такие элементы – **паразитные емкости** схемы и усилительных приборов, **индуктивности проводов** и т.д.
- **Реактивные элементы** создают дополнительные **фазовые сдвиги**, которые **в сумме** могут составить **180°**.
- Поэтому **отрицательная обратная связь** в таком усилителе превращается в **положительную** и создаются условия, при которых возможна **паразитная генерация**.

- Применение **обратной связи** тесно связано с **проблемой устойчивости** усилителя.
- Для правильного построения усилительного устройства и выбора его параметров большое значение приобретают **методы определения устойчивости** усилителя.
- В настоящее время известно несколько **критериев устойчивости**, различающихся больше **по форме**, нежели **по существу** (критерий Рауса-Гурвица, теория устойчивости Ляпунова, критерий Найквиста, частотный критерий и др.).
- В основе большинства этих критериев лежит **критерий устойчивости решений дифференциальных уравнений**, описывающих усилительное устройство.

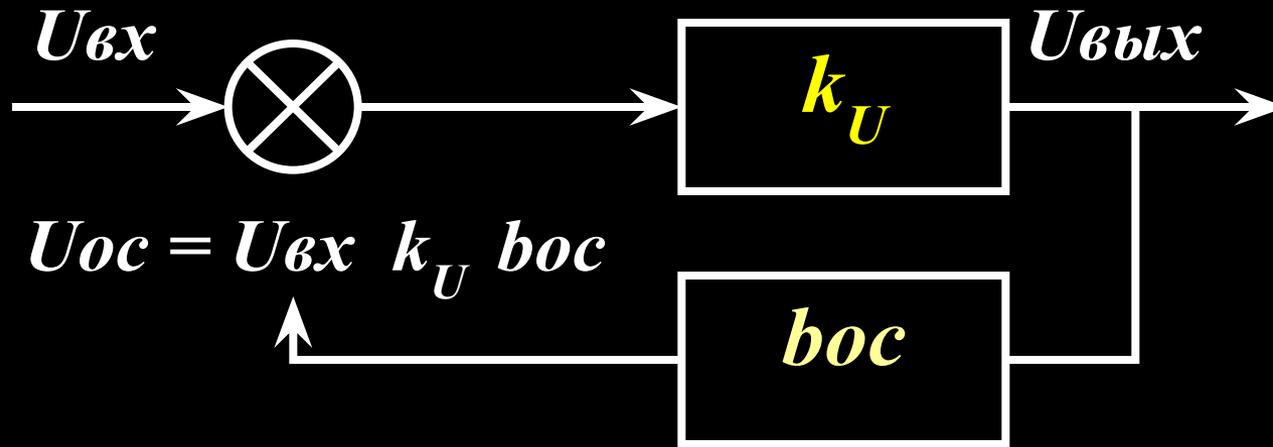
- Условие **устойчивости состояния** покоя усилительного устройства заключается в том, что **после прекращения действия входных сигналов** или **внешних воздействий** (изменение питающих напряжений, изменение температуры и др.) усилительное устройство **должно вернуться в исходное состояние.**
- Для этого необходимо, чтобы возникающие в усилительном устройстве при нарушении состояния покоя **свободные (переходные) токи и напряжения** были затухающими.

Следует отметить, что **свойство устойчивости** относится к усилительному устройству, содержащему **цепь ОС**. Это может быть:

- **внешняя обратная связь**, выполненная путем введения в усилитель **специальных цепей**,
- **паразитная обратная связь** (емкостная или индуктивная), обусловленная **конструктивными особенностями** изготовления усилительного устройства,
- или **внутренняя связь**, обусловленная **физическими свойствами** (туннельные диоды, тиристоры и др.).

Если **такая связь отсутствует**, то усилительное устройство является **разомкнутым** и понятие **устойчивости** к нему не применимо.

- Об устойчивости системы с **обратной связью** можно судить по характеристикам **разомкнутого тракта**



- Коэффициент передачи разомкнутого тракта равен:

$$k_{U\_раз\_ос} = U_{ос} / U_{вх} = k_U \cdot boc$$

- В общем случае **все коэффициенты** имеют **комплексный характер** и являются функциями от частоты входного сигнала, что учитывает **фазовые сдвиги** при распространении сигнала по прямой ветви усиления  $k_U$  и по цепи обратной связи  $boc$ .

**Частотный критерий устойчивости** для систем **с обратной связью** можно разделить на три пункта:

- если при **изменении частоты от нуля до бесконечности** фазовый сдвиг коэффициента передачи **разомкнутой цепи** не достигает  $2\pi$ , то **замкнутая цепь устойчива** при любом значении  $kU \cdot b_{oc}$ ;
- если **коэффициент передачи разомкнутой цепи**  $k_U \cdot b_{oc}$  меньше единицы при любой частоте, то система с замкнутой цепью обратной связи **устойчива** при любом фазовом сдвиге;

- система с обратной связью **неустойчива**, если имеются **частоты**, при которых **одновременно** выполняются два условия:

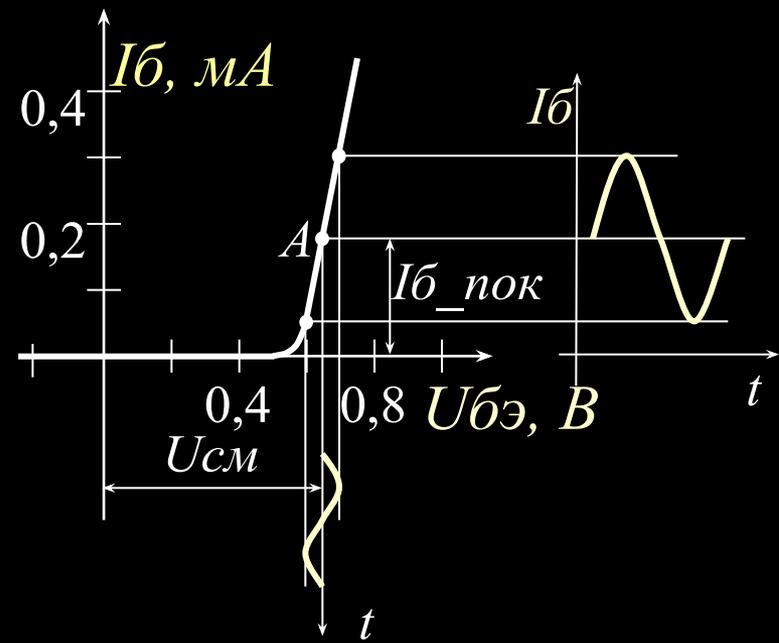
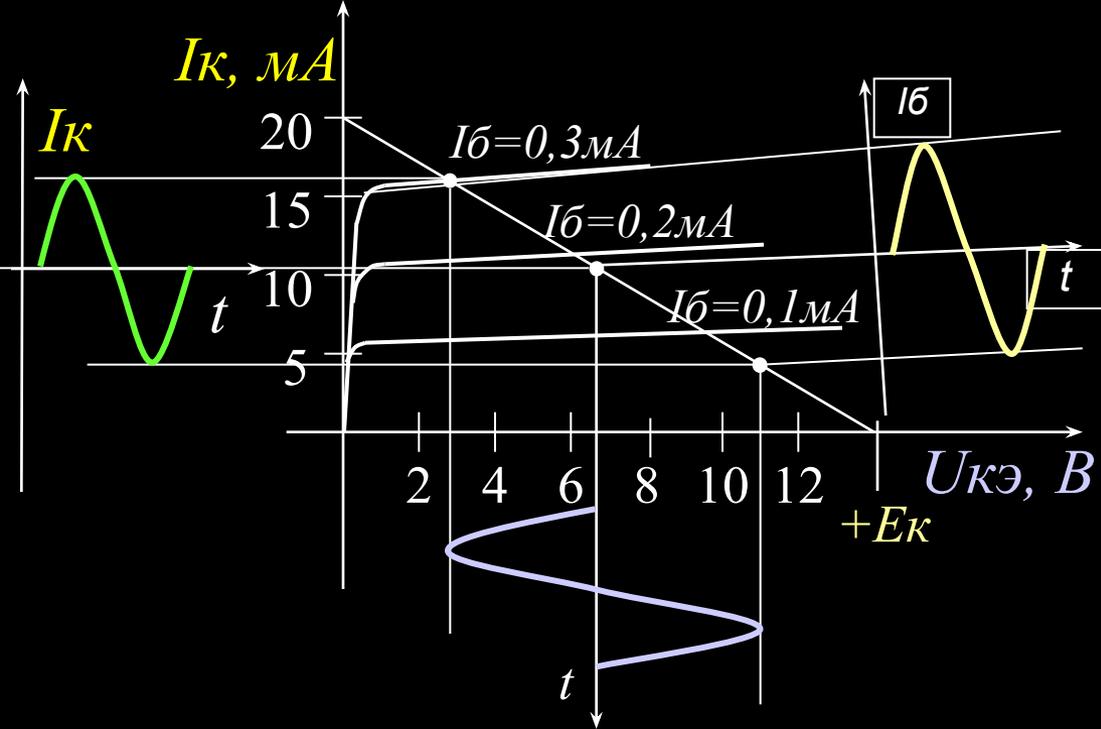
1 – **фазовый сдвиг** в разомкнутой цепи обратной связи равен или кратен  **$2\pi$**  (т.е. имеется **положительная ОС**) и

2 – **коэффициент передачи** разомкнутого тракта больше единицы:  **$k_U \cdot b_{OC} > 1$**

- Эти два условия являются **необходимыми** для построения **генераторов** или **триггерных устройств**.

# КЛАССЫ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

- В зависимости от **значения** и **знака напряжения смещения** и **напряжения сигнала** в схеме транзисторного каскада возможно несколько принципиально различных режимов его работы, называемых **КЛАССАМИ УСИЛЕНИЯ**
- Режим работы транзисторного каскада, при котором **ток в выходной цепи транзистора протекает в течение всего периода** изменения напряжения входного сигнала, называется режимом усиления **класса А**
- Максимальная амплитуда выходного сигнала в этом режиме может достигать значения, близкого к  **$E_k / 2$**

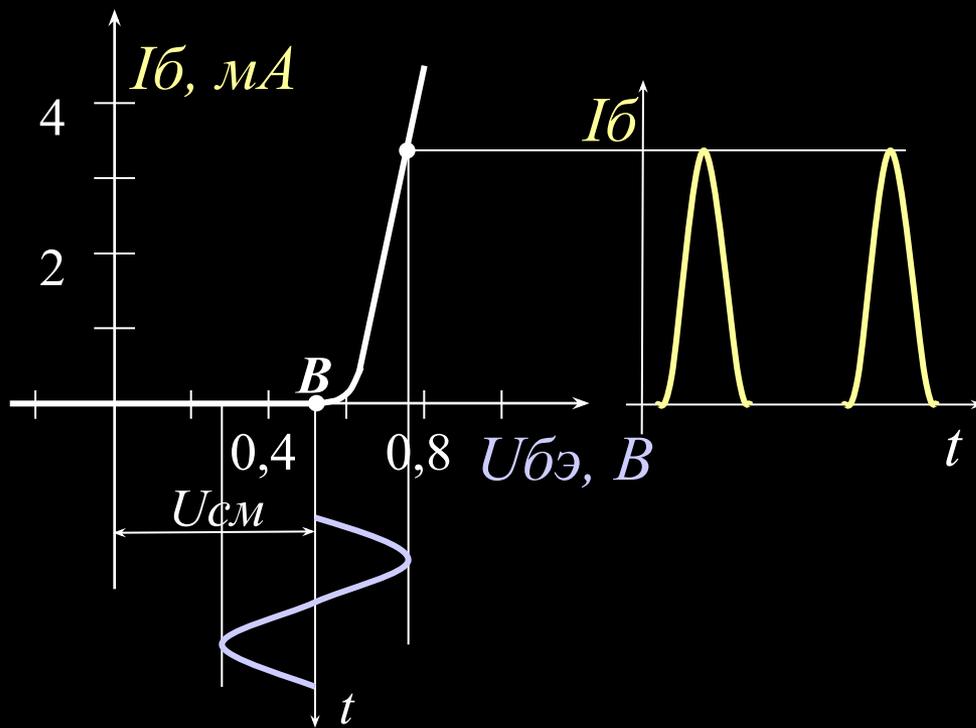


- Работа усилителя в **классе А** характеризуется **низким** коэффициентом полезного действия – **КПД**, который **теоретически не может превышать 0,25**.

- Это объясняется постоянным током коллектора  $I_k$  вне зависимости от наличия или отсутствия входного сигнала, в результате чего на транзисторе рассеивается мощность  $P = U_{кэ} \cdot I_k$ .
- КПД усилителя рассчитывается как отношение полезной выходной мощности на нагрузке  $P_{вых}$  к мощности, потребляемой усилителем от источника питания  $P_{потр}$  :  $\eta = P_{вых} / P_{потр}$ .
- В связи с этим режим усиления **класса А** используется только в маломощных каскадах (предварительных усилителях), для которых важен малый коэффициент нелинейных искажений усиленного сигнала, а значение **КПД** не играет решающей роли.

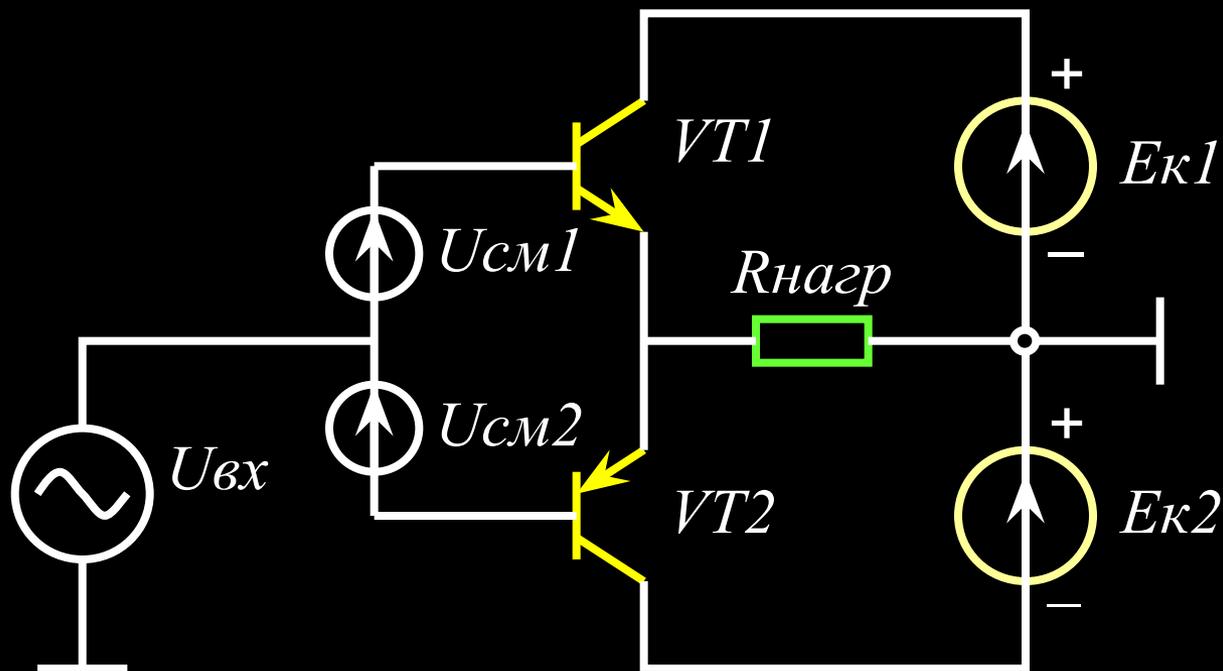
# Класс усиления В

- Режим работы транзисторного каскада, при котором **ток в выходной цепи транзистора** протекает только в течение **половины периода** изменения напряжения входного сигнала, называется режимом усиления **класса В**.
- В этом режиме напряжение смещения  **$U_{см}$  базо-эмиттерного перехода** выбирается равным **порогу Ферми**.
- **Ток базы покоя** и **ток коллектора покоя** равны **нулю**.
- Поэтому при отсутствии сигнала —  **$U_{вх}(t) = 0$**  — **мощность**, рассеиваемая в каскаде, **практически равна нулю**.

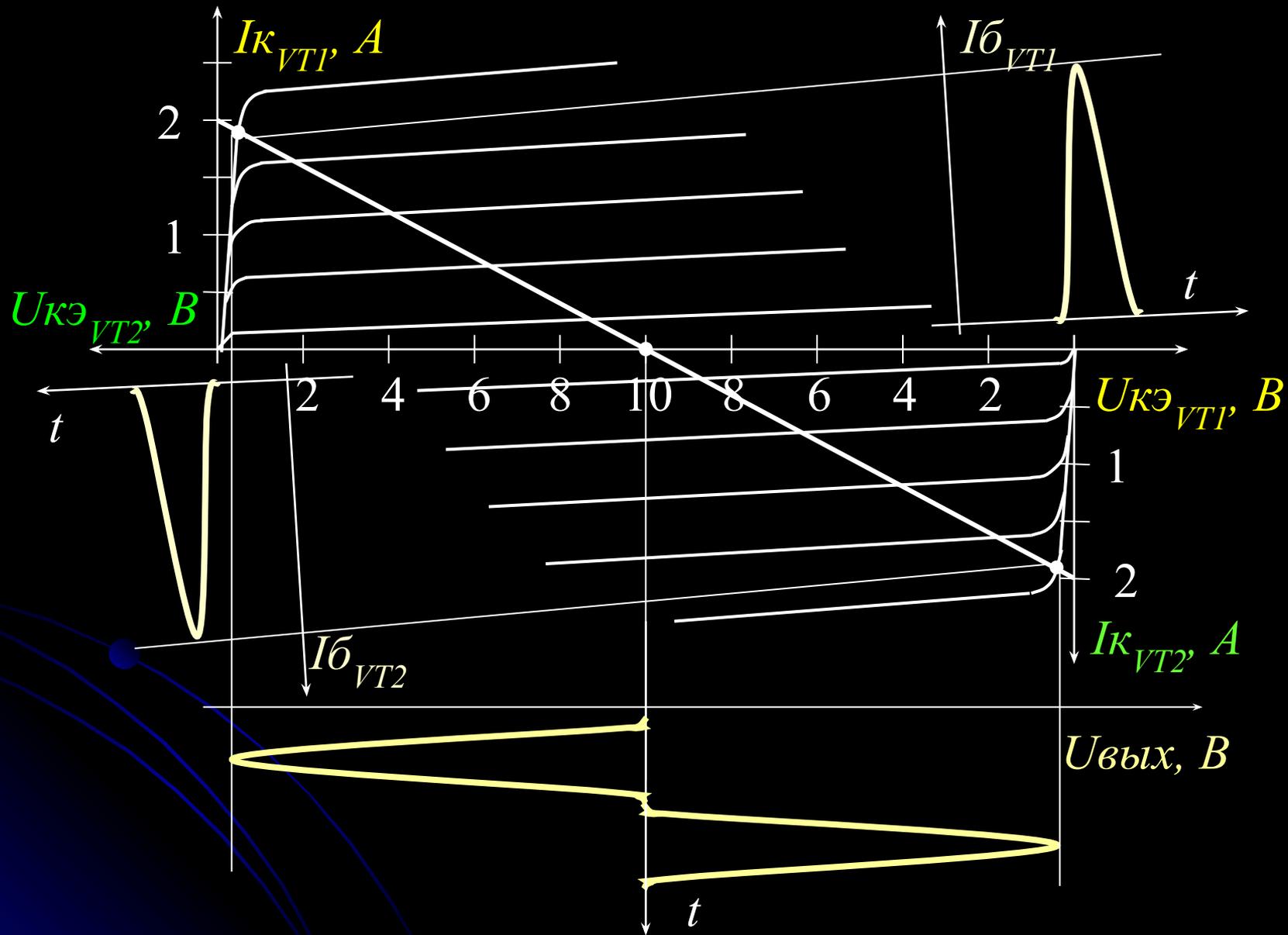


- Это способствует существенному улучшению энергетических показателей каскада за счет значительного (по сравнению с режимом **класса А**) снижения мощности, рассеиваемой на транзисторе в режиме покоя

Так как ток базы  $I_b$  и ток коллектора  $I_k$  протекают через транзистор только **половину периода**, то режим **класса В** используется в **двухтактных схемах**



- Транзистор ***n-p-n*** ***VT1*** усиливает только **положительную** полуволну входного напряжения, а **транзистор *p-n-p* *VT2*** — **отрицательную** полуволну



- На графиках в области параметров изображены **полувольтны** базового тока отдельно для каждого транзистора ( $I_{b_{VT1}}, I_{b_{VT2}}$ ).
- Нагрузочная прямая проведена через точку  $U_{кэ} = E_{к1} = 10 \text{ В}$  при нулевом токе коллекторов обоих транзисторов. Котангенс угла наклона нагрузочной прямой равен номиналу нагрузочного резистора  $R_{нагр}$ .
- Через разнополярные транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  токи текут в противоположных направлениях в течение только одного «своего» полупериода входного напряжения.
- На сопротивлении нагрузки  $R_{нагр}$  токи складываются и протекают в течение обоих полувольтных напряжений.

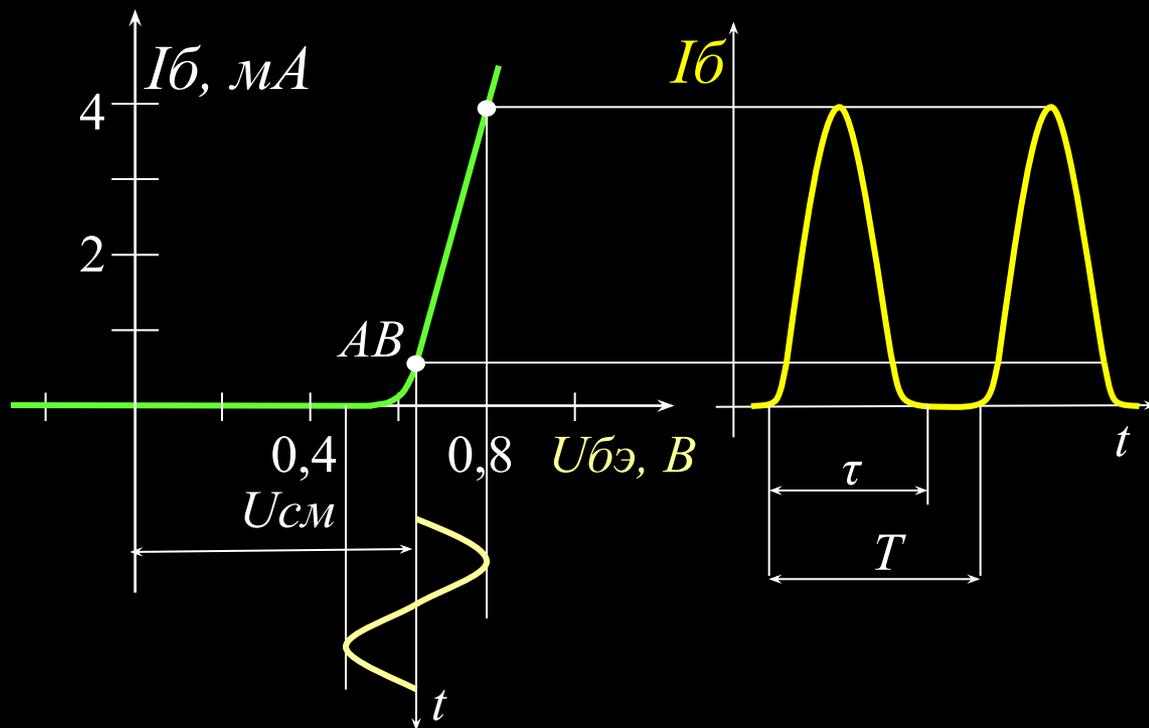
- Выходное напряжение на нагрузке имеет искажения в виде **«ступеньки»** вблизи нулевого выходного напряжения.
- Эти искажения вызываются **нелинейностью входной характеристики** транзистора и, как следствие, **искажениями тока базы**.
- Но и этот уже искаженный ток базы  $I_b$  передается на выход с дополнительными искажениями, вызванными изменением коэффициента **передачи тока базы**  $\beta$  при изменении тока коллектора.
- При минимальных токах коллектора (т.е. вблизи **«ступеньки»**) параметр  $\beta$  также имеет **минимальное значение** и постепенно увеличивается с увеличением тока.

- Максимальный (**теоретический**) **КПД** усилителя, работающего в режиме **класса В** достигает **0,78**.
- Но в **реальных схемах** за счет небольшого падения напряжения на транзисторах при максимальном токе (это соответствует режиму насыщения) **КПД** не может быть больше **0,7÷0,75**.
- Важной отличительной характеристикой **классов работы** усилительных устройств является **угол отсечки  $\Theta$** , который определяется по формуле:

$$\Theta = 180^\circ \cdot \tau / T,$$

- где:  **$T$**  – период входного синусоидального сигнала;  
 **$\tau$**  – та часть времени в пределах периода, в течение которой протекает выходной ток коллектора.
- Угол отсечки в режиме **класса А** :  **$\Theta = 180^\circ$** , а в режиме **класса В** :  **$\Theta = 90^\circ$** .

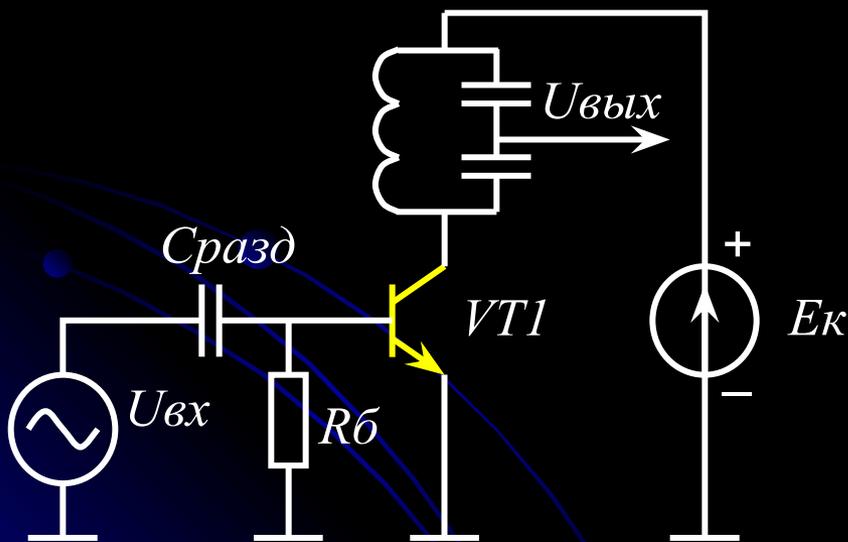
- Усилители мощности звуковых частот **очень редко** работают в режиме **класса В** в связи со значительными нелинейными искажениями типа **«ступенька»**.
- Для уменьшения этих искажений в двухтактных каскадах используют режим работы **класса АВ**.
- В этом классе угол отсечки:  **$90^\circ < \theta < 180^\circ$** .
- В режиме **класса АВ** напряжение смещения  $U_{см}$  базно-эмиттерного перехода выбирается немного **больше порога Ферми**, ближе к **линейному участку** входной характеристики.
- Ток базы покоя и ток коллектора покоя отличны от нуля.
- Поэтому даже при отсутствии входного сигнала через транзисторы  **$VT1$**  и  **$VT2$**  протекает ток и на транзисторах **рассеивается тепловая энергия**.



- **КПД** усилителя, работающего в режиме **класса АВ**, обычно составляет **0,5 ÷ 0,6**. Это меньше, чем **КПД** усилителя **класса В**, но значительно лучше, чем у усилителя, работающего в **классе А**.
- Существенное **уменьшение искажений** типа «**ступенька**» в режиме **класса АВ** сопровождается увеличением потребляемой мощности (т.е. снижением **КПД**).

# Класс усиления С

- Режим работы усилителя, при котором ток в выходной цепи транзистора протекает на временном интервале **меньшем половины периода** входного сигнала, называется режимом усиления **класса С**. Угол отсечки :  $\theta < 90^\circ$ .



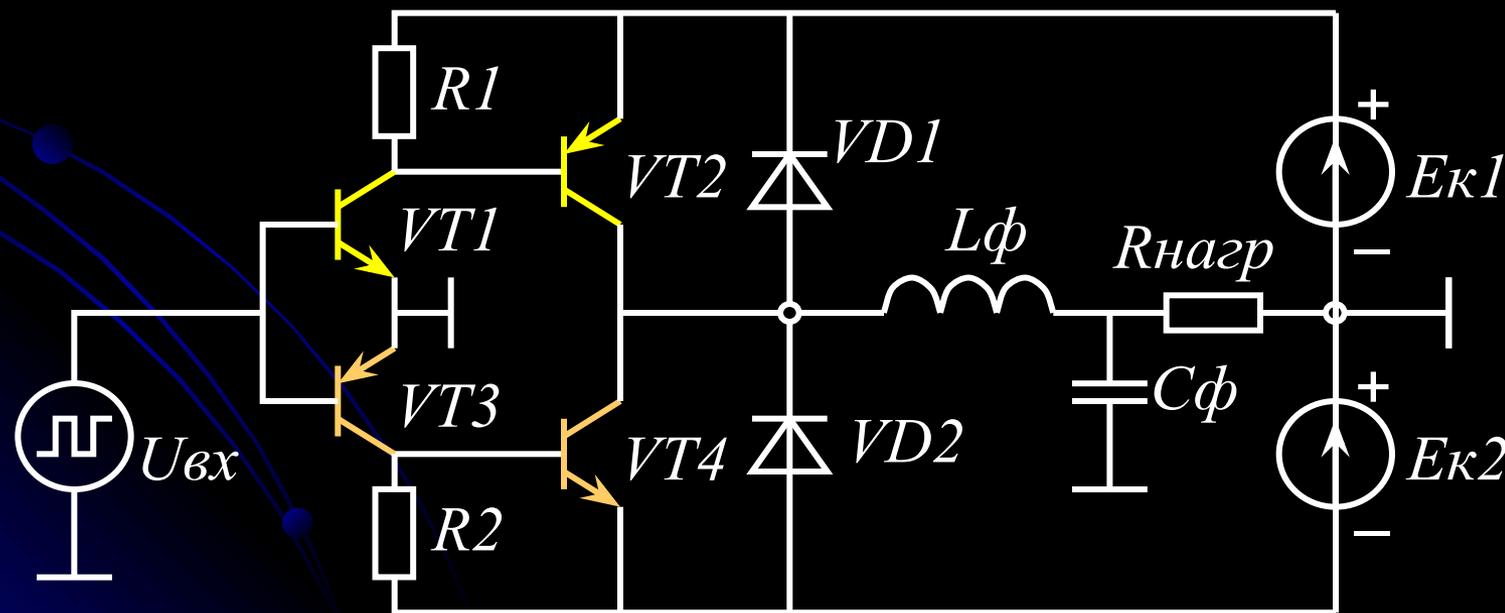
В режиме **класса С** транзистор больше половины периода находится в состоянии **отсечки**. Напряжение смещения  $U_{см}$  базно-эмиттерного перехода **меньше порога Ферми** (может быть даже **отрицательным**).

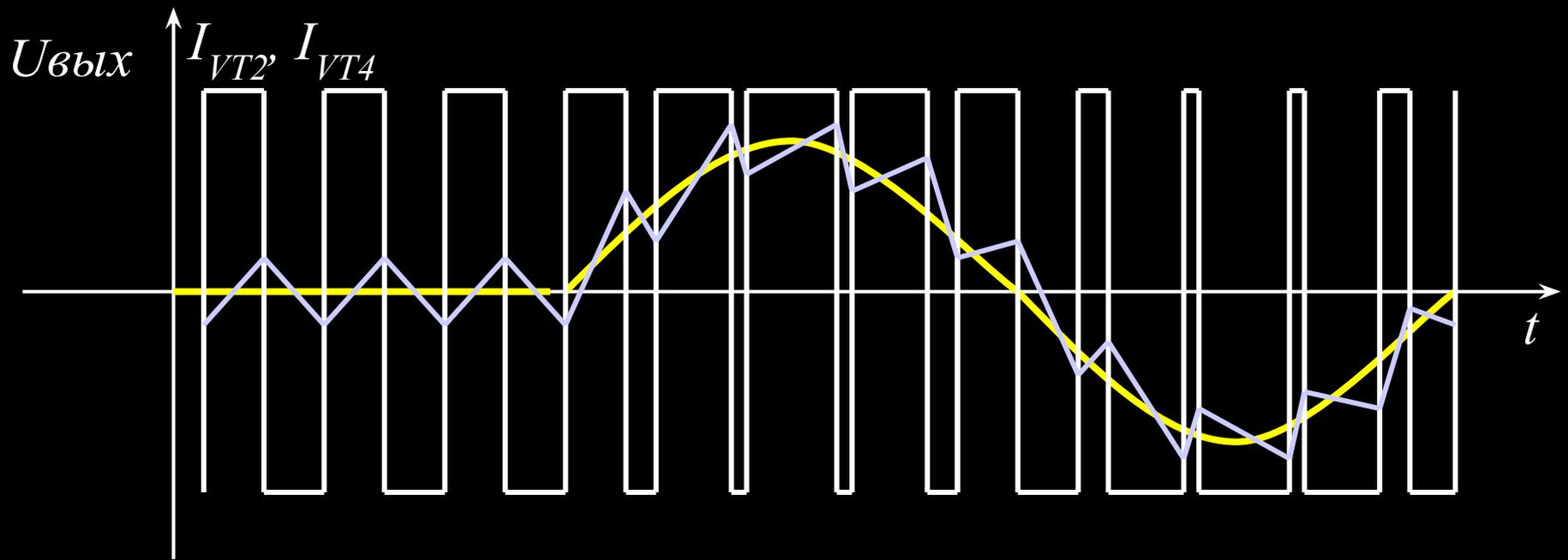
- Этот режим применяется в мощных резонансных усилителях **радиопередающих устройств**.
- На вход усилителя подается синусоидальное напряжение, но форма коллекторного тока повторяет только **малую часть синусоиды** (меньше половины периода), т.е. в спектре коллекторного тока **появляются кратные гармоники**.
- Наличие **колебательного контура** в цепи протекания коллекторного тока позволяет **выделить гармонический сигнал основной частоты** и **подавить кратные гармоники** выходного тока.
- Но, если колебательный контур в цепи коллектора настроен на **более высокую частоту**, кратную частоте входного сигнала, то этот контур выделит **более высокую гармонику**. Поэтому кроме усиления входного сигнала по мощности получается также и **умножение частоты сигнала** на выходе усилителя в несколько раз.

# Класс усиления D

- Режим усиления, при котором усилительные элементы выходного каскада могут находиться только в **состоянии включено** (режим насыщения биполярного транзистора) или **выключено** (режим отсечки биполярного транзистора), называется **ключевым режимом** или режимом усиления **класса D**.
- Режим **класса D** широко используется в устройствах, основным требованием к которым является получение **максимального КПД**.
- На рис. показан ключевой усилитель, работающий в режиме **класса D**.
- Частота коммутирующих импульсов выбирается в соответствии с условием **Котельникова-Найквиста**, т.е. эта частота должна быть **в два раза больше** максимальной частоты в спектре усиливаемого сигнала.

- При **положительном** входном импульсе **открываются** транзисторы ***VT1*** и ***VT2***, транзисторы ***VT3*** и ***VT4*** – **закрываются**.
- При **отрицательном** входном импульсе **открываются** ***VT3*** и ***VT4***, а ***VT1*** и ***VT2*** – **закрываются**.
- Фильтр низких частот (**ФНЧ**), состоящий из индуктивности ***L $\phi$***  и конденсатора ***C $\phi$*** , необходим для сглаживания прямоугольных импульсов коммутации на сопротивлении нагрузки ***R<sub>нагр</sub>***.



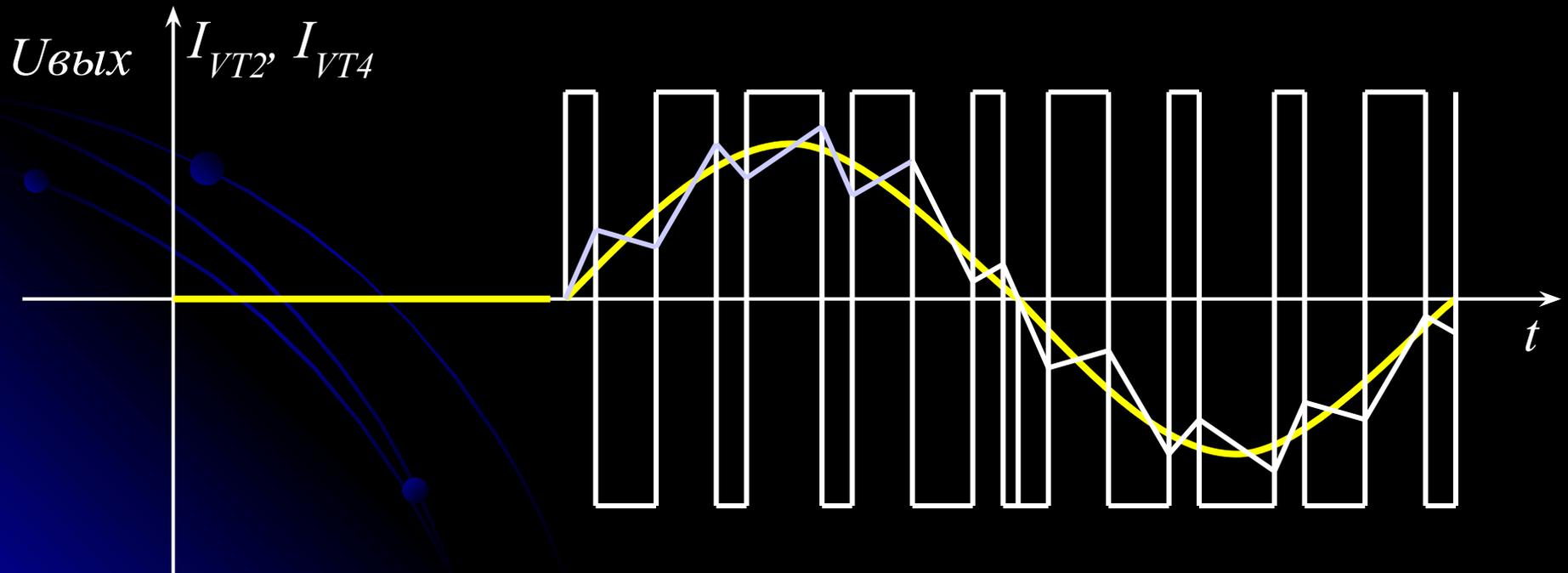


- Усиливаемое переменное напряжение показано на рис. **пунктирной линией**.
- При отсутствии входного сигнала средний уровень выходного сигнала равен нулю. Напряжение коммутации мощных выходных транзисторов имеет форму **прямоугольных импульсов типа меандр** (длительность положительного импульса равна длительности отрицательного импульса).

- Осциллограмма тока изображена **ломаной линией** в виде треугольных импульсов. Поэтому даже **при отсутствии входного сигнала** через транзисторы (которые работают в режиме насыщения) **течет ток** и **рассеивается тепловая мощность**.
- При синусоидальном усиливаемом сигнале импульсы коммутации изменяются **по длительности** так, чтобы **среднее напряжение за период коммутации** соответствовало напряжению усиливаемого сигнала, т. е. **длительность импульсов** пропорциональна величине напряжения усиливаемого сигнала.
- Такой вид модуляции длительности импульсов при постоянной частоте следования импульсов называется: **широтно-импульсная модуляция – ШИМ**.
- Осциллограмма тока в виде **ломанной линии** сопровождает **среднее значение** усиливаемого сигнала

- Кроме заметной потребляемой мощности **В** **отсутствии входного переменного напряжения** эта схема имеет и еще один существенный **недостаток**:
- **В момент коммутации** мощных ключевых транзисторов  **$V_{T2}$**  и  **$V_{T4}$**  **закрывание транзистора** происходит **значительно дольше**, чем **открывание** противоположного транзистора.
- Поэтому появляется дополнительная **динамическая мощность**, потребляемая от источника питания и вызывающая дополнительный **разогрев транзисторов** за счет протекания **коротких сквозных токов** через **уже открытый транзистор** и противоположный транзистор, который **еще не успел закрыться**.
- Поэтому реальный **КПД** у таких усилителей, работающих в режиме **класса DA**, не превышает **0,9**.

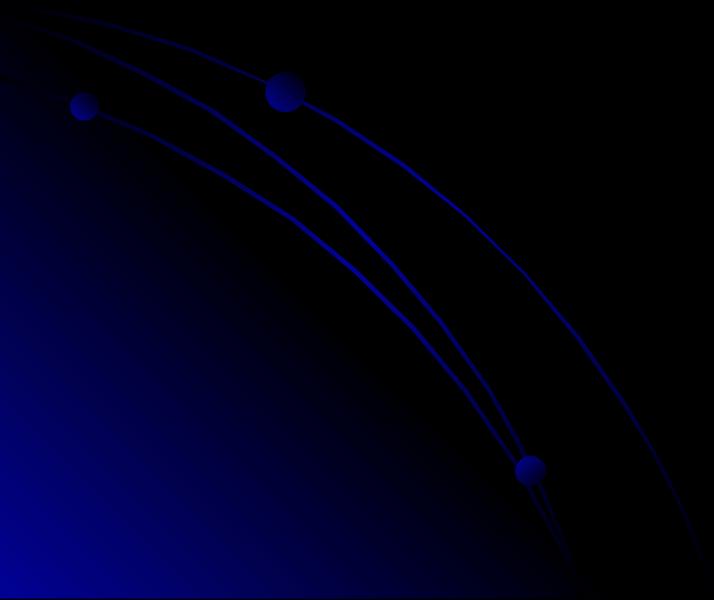
- Значительно **лучший КПД** у ключевых усилителей, работающих в режиме **класса DV**.
- Основное отличие схемы такого усилителя от схемы, работающей в режиме **класса DA**, заключается в том, что транзисторы **VT1** и **VT2** управляются от **отдельного** формирователя входных ключевых импульсов **Uвх1**, а транзисторы **VT3** и **VT4** – также от **отдельного** формирователя **Uвх2**.



- При **отсутствии усиливаемого сигнала** оба мощных ключевых транзистора  $VT2$  и  $VT4$  закрыты и **токи в схеме не протекают**.
- При **положительной полуволне** усиливаемого сигнала входными импульсами  $U_{вх1}$  открывается только ключевой транзистор  $VT2$ . Выходной ток транзистора **увеличивается** (см. ломаную линию на рис.).
- При **закрывании ключевого транзистора** возникает **всплеск отрицательного напряжения** (за счет напряжения самоиндукции дросселя  $L\phi$ ).
- Этот всплеск ограничивается демпфирующим диодом  $VD2$  на уровне, равном  $-E_{к2}$ . Через открытый демпфирующий диод  $VD2$  и индуктивность  $L\phi$  течет **убывающий ток** (см. ломаную линию на рис.).

- Аналогично, при отрицательной полуволне усиленного сигнала входными импульсами  **$U_{вх2}$**  открывается только ключевой транзистор  **$VT4$** , который работает в паре с демпфирующим диодом  **$VD1$** .
- В усилителе, работающем в режиме **класса DВ**, отсутствует потребляемая мощность **при нулевом усиленном сигнале**, а также **отсутствуют динамические потери** мощности при переключении транзисторов, потому что в каждой полуволне усиленного сигнала работает **только один ключевой транзистор**.
- **КПД** в таких усилителях может достигать **0,95**.

# Вопросы для экспресс-контроля



# Вопросы для экспресс-контроля



**ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА**

**СПАСИБО ЗА**

**ВНИМАНИЕ**

