

## Лекция 14

# Електронни усилватели

## Съдържание на Лекция 14

### 14. Класификация на електронните усилватели.

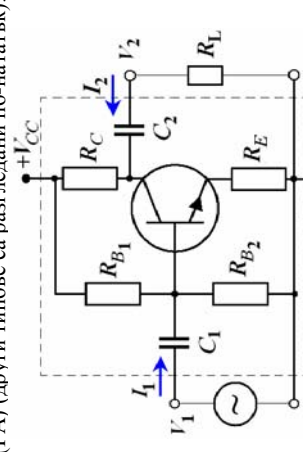
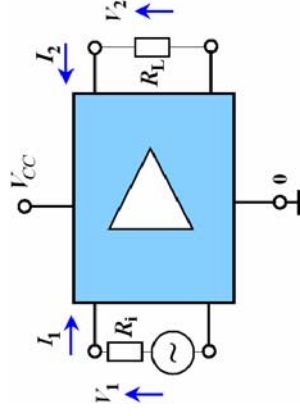
- 14.1 Усилвателите като четириполюсници. Основни параметри на усилвателите: коефициент на усилване, честотна лента, амплитудна характеристика, коефициент на шум и коефициент на нелинейни изкривявания.
- 14.2 Режими на работа на усилвателите (клас А, В, АВ, С, D).
- 14.3 Обратни връзки при усилвателите и тяхната роля за работата им. Влияние на отрицателната обратна връзка върху коефициента на усилване, стабилността му, върху входното и изходното съпротивление

## Лекция 14

**14.1 Усилвателите като активни четириполюсници. Основни параметри на усилвателите: коефициент на усилване, честотна лента, амплитудна характеристика, коефициент на шум и коефициент на нелинейни изкривявания.**

### Електронен усилвател

Усилване на електрически сигнали: линеен процес на увеличаване на мощността на електрическия сигнал (чрез увеличаване на амплитудата само на тока, само на напрежението или на двете). Това става чрез използване на нелинеен елемент АЕ от резистивен или реактивен тип (вж. Лекция 15). Енергетично този процес се реализира за сметка на постоянно-токовите източници, които поддържат  $\delta$ с режима на активния елемент. Усилването е един от най-разпространените процеси в електрониката и комуникациите. Електронен усилвател е устройство за усилване на електрически сигнали за сметка на енергията на  $\delta$ с източници. Основните типове усилватели са постоянно-токови, нискочестотни, височестотни, микро-вълнови и оптични. От гледна точка на предназначение основните типове са усилватели с нисък шум (LNA) и усилватели по мощност (PA) (други типове са разглеждани по-нататък).

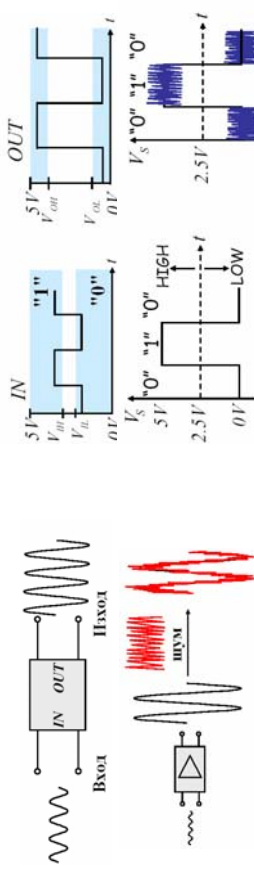


Усилвателът като активен четириполюсник

Пример за усилвател с биполярен транзистор: предназначението на отделните елементи – в Лекция 15

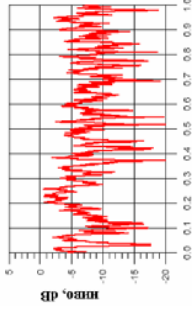
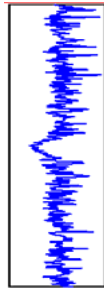
### Необходимост от усилване на сигнали в електрониката

Необходимост от усилване на сигнала има както в аналоговата, така и в цифровата електроника. И в двата случая шумът играе съществена роля по отношение на полезния сигнал.



Усилване на аналогов сигнал

Усилване на цифров сигнал



В сателитните комуникации се приемат много слаби сигнали



В мобилните комуникации сигналите са непостоянни и с голяма разлика в амплитудите

### Основни параметри на усилвателите

- ❖ **Коефициент на усилване** – величина, която показва колко пъти се увеличава изходната мощност спрямо входната, или амплитудата на напрежението или тока
- ❖ **Честотна лента** – това е честотния диапазон на работа на усилвателя, при която коефициентът на усилване има приемливи на предназначението на усилвателя стойности
- ❖ **Амплитудна (входно-изходна) характеристика** – това е зависимостта на изходната мощност (напрежение, ток) от входната мощност (напрежение, ток). Дефинират се още минимална и максимална усилвана мощност (напрежение, ток) и динамичен обхват
- ❖ **Коефициент на шум (шумово число)** – величина, която показва колко пъти намалява отношението сигнал шум от входа към изхода на усилвателя. Могат да се дефинира и други шумови характеристики (напр. шумова мощност)
- ❖ **Коефициент на нелинейни изкривявания** – мярка за изменение на формата на изходния импулс спрямо входния (т.е. изменението на спектъра)
- ❖ **Други параметри** – коефициент на полезно действие (ефективност), входно и изходно съпротивление, коефициент на стабилност на усилването и др.

По-нататък в Лекцията тези основни параметри са разгледани поотделно, дадени са математическите им дефиниции и техните зависимости от честотата и от амплитудата на сигналите.

### Коефициент на усилване (gain)

Коефициентът на усилване е комплексна величина която се дефинира като отношение на дадена изходна величина спрямо входната (напрежение, ток или мощност). Следователно, той показва как се изменя амплитудата и фазата на изходния сигнал спрямо входния. Долу са дадени са връзките между тях:

$$k_u = \frac{V_2}{V_1} = k \quad k_i = \frac{I_2}{I_1} \quad |k_P| = |k_u k_i| \sim k_u^2 \quad |k_P| = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_1 I_1 \cos \varphi_1}$$

Коефициентите на усилване по напрежение и по ток се използват най-често в нискочестотната аналогова и цифрова електроника. Във високочестотната електроника се използва само коефициентът на усилване по мощност (Gain). Много удобно представяне за коефициентът на усилване по мощност е в децибели (dB), вместо в пъти. По-долу в таблицата е дадена връзката между представяне на коефициентът на усилване по напрежение и мощност в пъти и това в dB:

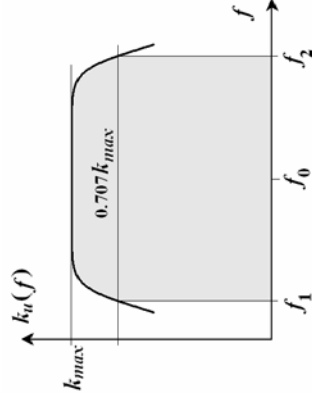
$$k_P = \frac{P_2}{P_1} = g \quad G, \text{ dB} = 10 \lg k_P = 20 \log k_u$$

$k_u$	1.06	1.12	1.26	1.41	1.78	3.16	5.62	10.0	31.62
$k_P$	1.12	1.26	1.58	2.00	3.16	10.0	31.62	100.0	1000
$G, \text{ dB}$	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	15	20	30

### Честотна лента на усилвател

Коефициентът на усилване има своя честотна зависимост: на амплитудата (амплитудно-честотна зависимост, АЧХ) и на фазата (фазово-честотна зависимост, ФЧХ). Типичните АЧХ и ФЧХ са дадени на фигурите долу. **Честотната лента BW** обикновено се определя от АЧХ на коефициента на усилване по напрежение  $k_u$  на ниво 0.07 от неговото при централна честота  $f_0$  (или на ниво -3 dB от максималното за АЧХ на  $k_P$ ). Много често се работи и с нормирана честотна лента  $BW_n$ . Различават се теснолентови (до 10 % лента) и широколентови усилватели (над 10% лента).

$$BW = \Delta f_{BW} = f_2 - f_1 \quad BW_n = \frac{\Delta f_{BW}}{f_0} = \frac{f_2 - f_1}{f_0}, \quad \%$$



Честотна лента на усилвател на ниво 0.707 от максималния коефициент на усилване по напрежение

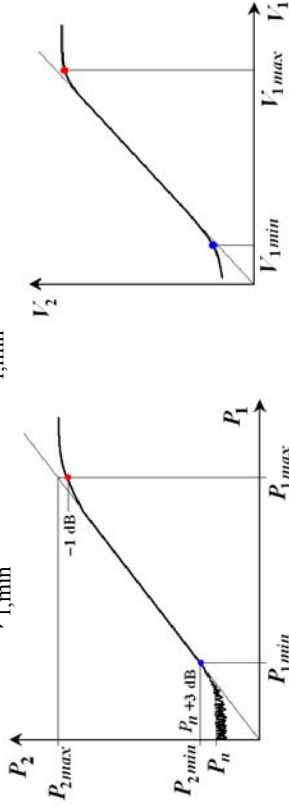
Честотна лента по фаза (по-рядко използвана)

### Амплитудна характеристика на усилвател

Амплитудната характеристика на усилвателя е зависимостта на изходното напрежение (мощност) от входното напрежение (мощност),  $V_2(V_f)$  или  $P_2(P_f)$ . От нея могат да се определят следните важни параметри: минимално и максимално входно напрежение (мощност) Минималната входна мощност  $P_{1,min}$  се определя на ниво +3 dB от нивото на входната шумова мощност, а максималната входна мощност  $P_{1,max}$ , над която настъпва видимо насищане се определя на ниво -1 dB под нивото на линейно усилване (1-dB-compression point). Друга много важна величина е т. нар. *динамичен обхват* на усилвателя по мощност  $D_p$  или напрежение  $D_v$ . При динамика по мощност най-често се работи в dB.

$$D_v = \frac{V_{1,max}}{V_{1,min}} \quad D_p = \frac{P_{1,max}}{P_{1,min}}$$

$$D, \text{ dB} = 10 \log D_p$$



Типична амплитудна зависимост по мощност      Типична амплитудна зависимост по напрежение

### Коефициент на шум

Усилвателят усилва както полезния, така и шумовия сигнал. Ако самият усилвател не "произвежда" собствен шум, отношението "сигнал-шум" не се променя. За да се отчете влиянието на шума на усилвателя се въвежда величината *коефициент на шум*  $F_n$ , като отношение на нивото "сигнал-шум" на входа и изхода

$$F_n = \frac{(P_S / P_N)_{in}}{(P_S / P_N)_{out}} = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}} = \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{g} \cdot \frac{N_1 + N_A}{N_1}$$

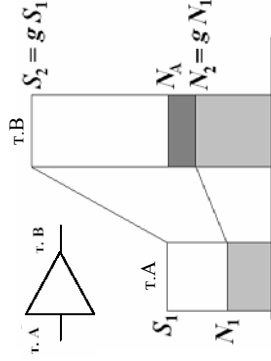
Коефициентът на шум  $F_n$  показва с колко се е влошило отношението "сигнал-шум" от входа към изхода на усилвателя, който "произвежда" собствен шум с мощност  $N_A$ . При идеално не-шумящо устройство  $F_n = 1$ . Коефициентът на шум може да се измерва и в dB,  $NF = 10 \log F_n$  шумово число:

$$NF, \text{ dB} = 10 \log F_n$$

Ако се измери коефициентът на шум  $F_n$ , могат да се определят и други параметри на т.нар. "бял шум" – шумова мощност  $P_n$  и шумова температура  $T_n$  по формулите долу ( $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  – константа на Болцман,  $T_0$  е стабилната температура.  $BW$  е честотната лента на устройството):

$$P_n = kT_0(F_n - 1)BW$$

$$T_n = T_0(F_n - 1), \text{ K}$$



Концепция за коефициента на шум при усилвателите

### Коефициент на нелинейни изкривявания

При преминаване на сигнал през усилвателя, той обикновено променя формата си. Има много причини за това в изходния сигнал да се появяват нелинейни изкривявания. Поради наличието на честотна лента, която е ограничена отдолу и отгоре, усилвателят действа като лентово-пропускателен филтър. Така сигнали, които имат широк спектър и малка амплитуда, ще запазят в линейно съотношение само тези свои честотни съставки, които попадат вътре в честотната лента. За подобни сигнали трябва да се използват широколентови усилватели. Друг източник на нелинейни изкривявания се появяват при силни сигнали. Поради ограничения динамичен обхват на усилвателя, силните сигнали изпитват насищане отгоре, а слабите сигнали се ограничават отдолу на нивото на шума. Това също води до промяна на времевата форма на сигналите. Количествена мярка за нелинейността е  $K_{NL}$

$$K_{NL} = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_f^2} = \frac{\sqrt{V_{2f}^2 + V_{3f}^2 + V_{4f}^2 + \dots}}{V_f}$$

Коефициент на нелинейни изкривявания  $K_{NL}$  по напрежение се определя от отношението между коренна на средно-кватратичната сума на напреженията на висшите хармонични  $n f$  в спектъра на изходния сигнал и напрежението на основната честота  $f$ . Обикновено  $K_{NL} \sim 1\%$  при линейни усилватели, а  $K_{NL} \sim 5-10\%$  допустимо ниво. Силно подобрение на  $K_{NL}$  се постига при дълбока отрицателна обратна връзка.



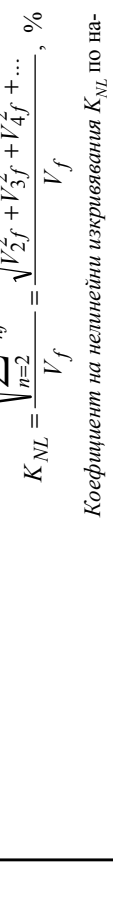
Нелинейни съставки  $n f$  в изходния сигнал на хармоничните честоти на входния сигнал

### Други параметри. Каскаден ефект при усилвателите

Коефициентът на полезно действие  $\eta$  (ефективността) е отношение на изходната мощност от усилвателя към изходната полезност от усилвателя към изходната полезност. Транзисторните усилватели имат относително висок теоретичен  $\eta > 50\%$ , но има и устройства с  $\eta < 1\%$  (напр. Гън-диодни усилватели)

$$\eta = \text{efficiency} = \frac{P_2}{P_{dc}}, \%$$

При многостъпални усилватели се появява интересен ефект. Те представляват каскадно свързани 2 и повече отделни усилвателя. Сумарният им коефициент на усилване е произведението на отделните коефициенти (ако не се отчетат обратните връзки). При шума е по-различно. Сумарният коефициент на шум се определя основно от този на първото стъпало  $F_1$ , докато влиянието на шума от следващите стъпала намалява съществено. Този ефект е много важен при проектирането на двустъпални усилватели. Обикновено първото стъпало се оптимизира по минимален коефициент на шум, а второто – по максимален коефициент на усилване.



$$k_{\Sigma} = k_1 \cdot k_2$$

$$F_{\Sigma} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{k_1}$$

### Коефициент на стабилност на усилвателя

Коефициентът на стабилност на усилвателя  $\delta_k$  показва относителното изменение на коефициента на усилване по различни причини. Има краткосрочна и дългосрочна стабилност. Измерва се в ppm (percent per million,  $10^{-6}$  пъти); при температурна зависимост – в ppm/K.

$$\delta_k = \frac{\Delta k}{k}, \text{ ppm}$$

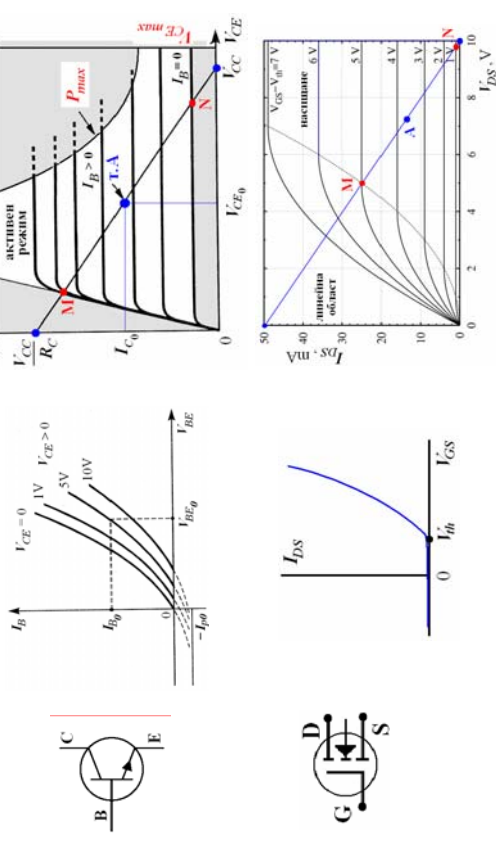
Каскаден ефект при двустъпални усилватели

# Лекция 14

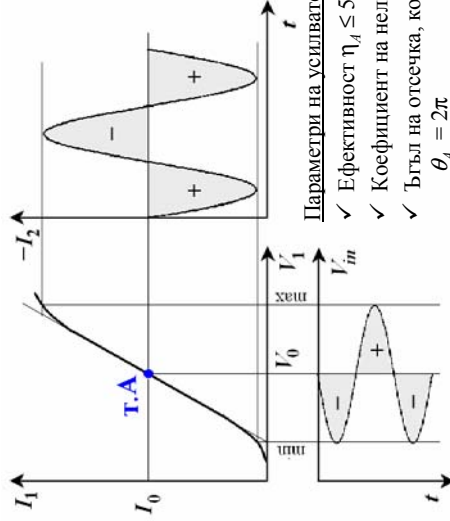
## 14.2 Режими на работа на усилвателите (клас А, В, АВ, С, D)

### Какво представлява работния режим на усилвателя?

Вече показваме, че активният режим на даден усилвател с биполарни или полупроводникови транзистори се определя от неговия постоянен ток режим. За илюстрация на фигурите долу са показани входната и изходната характеристики на ВТ в схема "Общ емитер", както и на преходната и изходната характеристика на MOSFET с индуциран канал в свързване "общ S".



### Режим на работа клас А



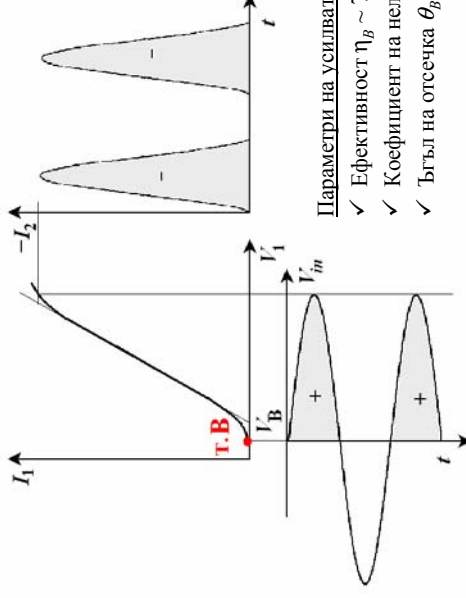
Параметри на усилватели в режим "Клас А":

- ✓ Ефективност  $\eta_A \leq 50\%$
- ✓ Коэффициент на нелинейност  $K_{NL,A} \ll 1$
- ✓ Ъгъл на отсечка, когато токът на изхода не е наситен  $\theta_A = 2\pi$

Основни характеристики и използване на усилватели в режим "Клас А":

- ✓ Много слаба нелинейност, но минимална за усилватели ефективност
- ✓ Коэффициентът на усилване е минимален за транзисторни усилватели, но и шумът е минимален
- ✓ Използва се за предварително усилване (пред-усилватели) – LNA

### Режим на работа клас В



Параметри на усилватели в режим "Клас В":

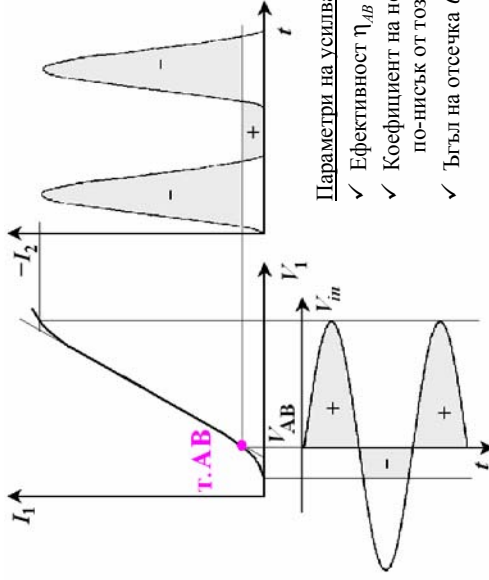
- ✓ Ефективност  $\eta_B \sim 78\%$  (th)
- ✓ Коэффициент на нелинейност  $K_{NL,B}$  – висок
- ✓ Ъгъл на отсечка  $\theta_B = \pi$

Основни характеристики и използване на усилватели в режим "Клас В":

- ✓ Много голяма нелинейност, но максимално възможна за усилватели ефективност
- ✓ Максимално голям коэффициент на усилване, но висок шум
- ✓ Използва се за двутактови усилватели по мощност (крайни усилватели) – PA



## Режим на работа клас АВ



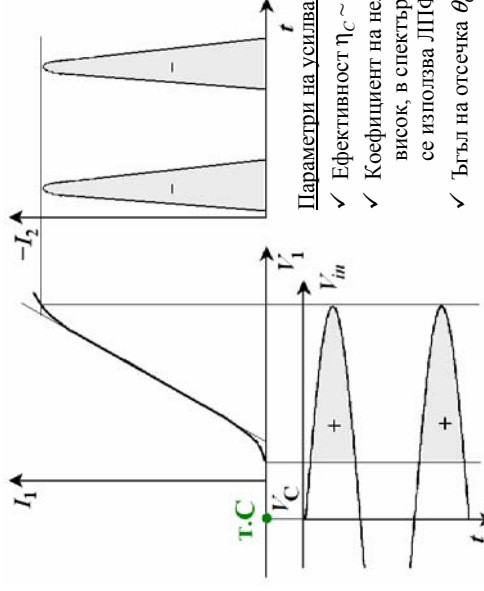
Параметри на усилватели в режим "Клас АВ":

- ✓ Эффективность  $\eta_{AB} \sim 50 + 78\%$  (th)
- ✓ Коэффициент на нелинейност  $K_{NL,AB}$  – много по-нисък от този в клас В
- ✓ Ъгъл на отсечка  $\theta_{AB} = \pi + 2\pi$

Основни характеристики и използване на усилватели в режим "Клас АВ":

- ✓ Не много висока нелинейност, но висока ефективност над 50%
- ✓ Висок коэффициент на усилване, по параметри е между клас А и клас В
- ✓ Използва се за двутактови усилватели по мощност с подобрена линейност

## Режим на работа клас С



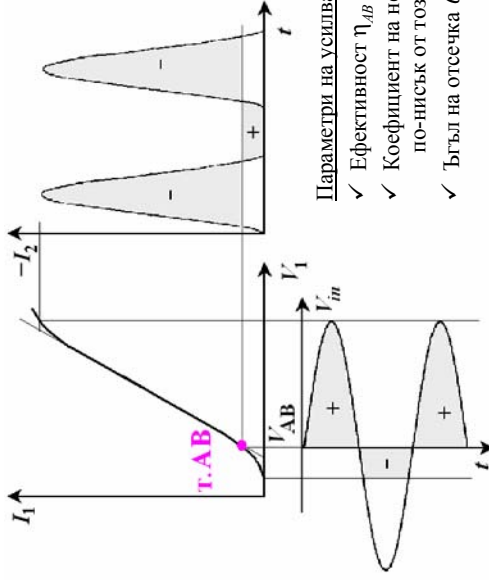
Параметри на усилватели в режим "Клас С":

- ✓ Эффективность  $\eta_C \sim 100\%$  (th)
- ✓ Коэффициент на нелинейност  $K_{NL,C}$  – много висок, в спектъра има много хармонични и се използва ЛПФ за работната честота
- ✓ Ъгъл на отсечка  $\theta_C < \pi$

Основни характеристики и използване на усилватели в режим "Клас С":

- ✓ Силно нелинеен, но много ефективен
- ✓ Максимално усилване
- ✓ Използва се за много мощни резонансни усилватели в много тясна честотна лента

## Режим на работа клас АВ



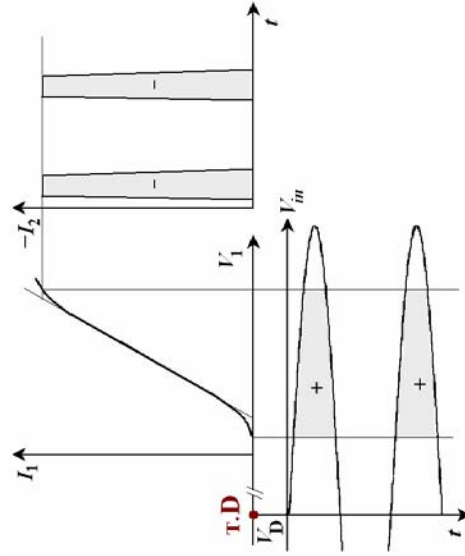
Параметри на усилватели в режим "Клас АВ":

- ✓ Эффективность  $\eta_{AB} \sim 50 + 78\%$  (th)
- ✓ Коэффициент на нелинейност  $K_{NL,AB}$  – много по-нисък от този в клас В
- ✓ Ъгъл на отсечка  $\theta_{AB} = \pi + 2\pi$

Основни характеристики и използване на усилватели в режим "Клас АВ":

- ✓ Не много висока нелинейност, но висока ефективност над 50%
- ✓ Висок коэффициент на усилване, по параметри е между клас А и клас В
- ✓ Използва се за двутактови усилватели по мощност с подобрена линейност

## Режим на работа клас D (електронни ключове)



Параметри на усилватели в режим "Клас D":

- ✓ Эффективность  $\eta_D \sim 100\%$
- ✓ Коэффициент на нелинейност  $K_{NL,D}$  – много висок, работи в импулсен режим
- ✓ Ъгъл на отсечка  $\theta_D < \pi$

Основни характеристики и използване на усилватели в режим "Клас D":

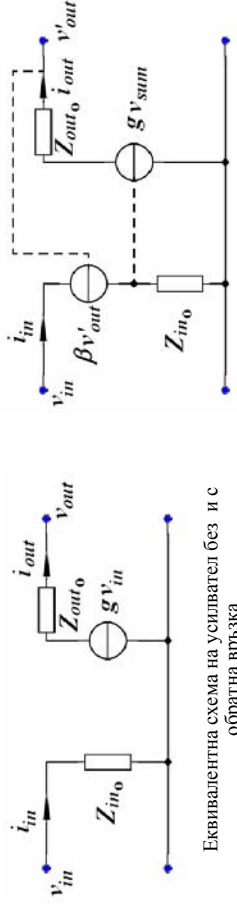
- ✓ Това е импулсен режим на работа на устройството и нелинейността е висока.
- ✓ Използва се за електронно управляеми транзисторни ключове.

# Лекция 14

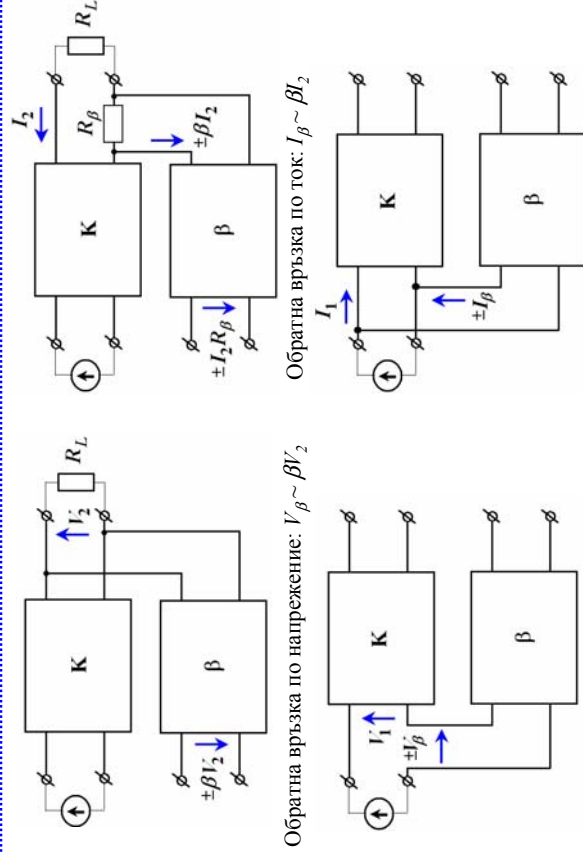
## 14.3 Обратни връзки при усилвателите и тяхната роля за работата им. Влияние на отрицателната обратна връзка върху коефициента на усилване и неговата стабилност, върху входното и изходното съпротивление и др.

### Обратна връзка при усилвателите

Понятието "обратна връзка" се употребява не само в електрониката. В повечето ситуации, в които се налага да се ползва, основната цел е да се стабилизира поведението на дадена система. В електронните усилватели *обратната връзка* (feedback) се използва за подобряване цели. Механизмът на обратната връзка се състои в това да се отдели част или целия изходен сигнал (по напрежение или ток) и да се предаде на входа във фаза с входния сигнал (положителна обратна връзка, ПОВ) или в противофаза с входния сигнал (отрицателна обратна връзка, ООВ). По принцип ПОВ води до нестабилност в усилвателя и затова се използва в други активни устройства – осцилаторите (Лекция 18). Стабилизиращ ефект осигурява само ООВ. Тя прави усилвателя с по-устойчив на външни влияния върху коефициента на усилване, идващи от изхода (товара), стабилизирайки го на някаква желана стойност. По-нататък ще разгледаме този ефект количествено. Долу са дадени еквивалентните схеми на усилвател без и с обратна връзка.

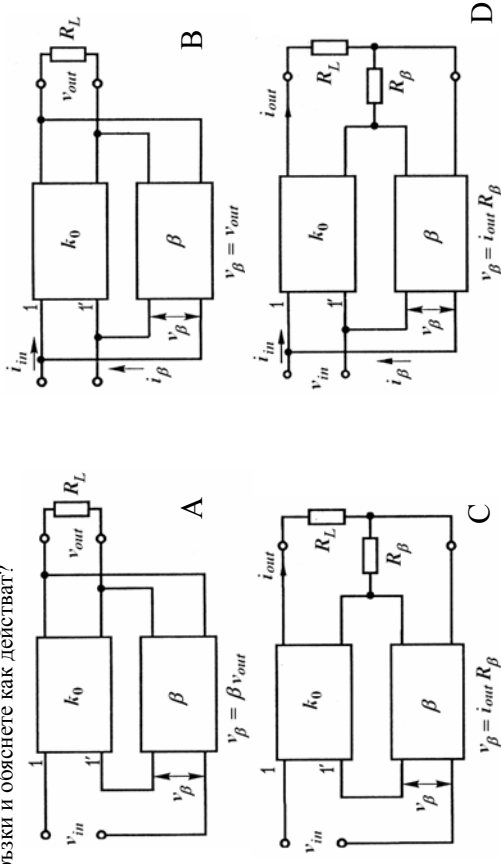


### Видове обратни връзки при усилвателите



### Четири основни типа обратни връзки

Долу са показани 4-те възможни обратни връзки като комбинация от случайте, описани на предишната страница. Като използвате информацията там, назовете типът на тези обратни връзки и обяснете как действат?



Последователна обратна връзка:  $V_\beta \sim \beta V_2$

Паралелна обратна връзка:  $I_\beta \sim \beta I_2$

вателна по ток; Д) Паралелна по ток

Лекция 14

### Коефициент на усилване в усилвател с обратна връзка

Ще разгледаме конкретен случай: усилвател с комплексен коефициент на усилване  $k$  (без ОВ) е обхванат от последователна обратна връзка с комплексен коефициент на предаване  $\beta$ . Коефициентът на усилване на усилвателя с ОВ е  $k_{\beta}$ :

$$\dot{k} = k e^{j\varphi_k} \quad \dot{\beta} = \beta e^{j\varphi_{\beta}}$$

Коефициентът на усилване на усилвателя с ОВ е  $k_{\beta}$ :

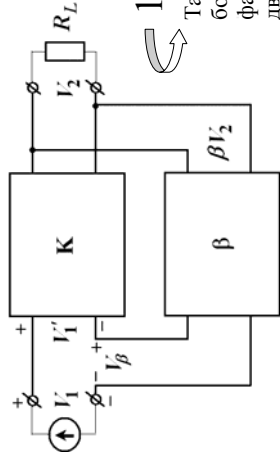
$$k_{\beta} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1 + \beta \dot{V}_2} = \frac{\dot{k}}{1 + \beta \dot{k}}$$

където

$$\dot{k} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1}$$

Окончателно коефициентът на усилване на усилвател с произволна обратна връзка е:

$$k_{\beta} = \frac{\dot{k}}{1 + \beta \dot{k}}$$



$$1 + \beta \dot{k}$$

Тази комплексна величина е известна като дълбочина на обратната връзка. В зависимост от фазовата разлика между  $V_{\beta}$  и  $V_1$  ще разгледаме два случая:

ООВ и ПОВ (вж. следващите 2 страници)

### Случай на усилвател с отрицателна обратна връзка

В този случай напреженията  $V_{\beta}$  и  $V_1$  са в противофаза, т.е.  $V_1 = V_1 - V_{\beta} = V_1 - \beta V_2$

$$\text{Следователно, понеже } V_2 = kV_1 \text{ или } k = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_2}{V_1 - \beta V_2} = \frac{k\beta}{1 - \beta k\beta}$$

може да се запише следният израз

$$k_{\beta} = \frac{k}{1 + \beta k} \quad \text{където } \beta k > 1$$

Очевидно в този случай ООВ намалява коефициента на усилване, т.е.

$$k_{\beta} < k$$

Ако ООВ е много дълбока, т.е.  $\beta k \gg 1$  следва изразът

$$k_{\beta} \approx \frac{1}{\beta}$$

В последния случай коефициентът на усилване престава да зависи от конкретните свойства на усилвателя, а се определя само от параметрите на схемата на обратна връзка, елементите на която могат да се избират стабилни с температурата и честотата. Освен това, коефициентът  $\beta$  може да се регулира много прецизно, докато обикновено коефициентът  $k$  има много големи стойности и е нестабилен. Пример: нека  $\beta = 0.1$ , а  $k = 5000$ . Следователно  $k_{\beta} = 98.0$ . Нека сега а  $k = 5000000$ , но  $k_{\beta} = 99.98$ . Оттук следва заключението, че дори коефициентът на усилване без ОВ да се изменя 1000 пъти, при наличие на ООВ това усилването се променя под 2 %. Това е и най-важната полза от ООВ при усилвателите.

### Случай на усилвател с положителна обратна връзка

В този случай напреженията  $V_{\beta}$  и  $V_1$  са във фаза, т.е.  $V_1 = V_1 + V_{\beta} = V_1 + \beta V_2$

$$\text{Отново, понеже } V_2 = kV_1 \text{ или } k = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_2}{V_1 + \beta V_2} = \frac{k\beta}{1 + \beta k\beta}$$

може да се запише нов израз

$$k_{\beta} = \frac{k}{1 - \beta k} \quad \text{отнасящ се за ПОВ; сега } \beta k < 1$$

$$k_{\beta} > k$$

Очевидно в този случай ПОВ увеличава коефициента на усилване, т.е.

Нещо повече, дори ако на входа няма никакъв сигнал (само неизбежния шум), ако се реализира следната ситуация:

$$k_{\beta} = \frac{k}{1 - \beta k} \xrightarrow{\beta k = 1} \infty$$

В схемата може да се получи (теоретично) безкрайно голям коефициент на усилване, което е известно като *режим на генерация* на сигнал, т.е.:

$$k_{\beta} \rightarrow \infty$$

При усилвателите, обаче, този режим е паразитен – т. нар. “само-възбуждане”.

### Основни параметри на усилватели с отрицателна обратна връзка

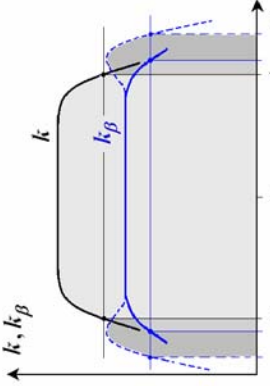
От показаното дотук става ясно, че в усилвателите се използва главно отрицателна обратна връзка, с която се намалява коефициента на усилване, но се подобрява неговата стабилност.

Това е израз за коефициента на стабилност  $\delta_{k_{\beta}}$  на усилвателите. Вижда се, че при ООВ се подобрява с фактор  $(1 + \beta k)$ . Основната физична причина за подобен ефект е тази, че при ООВ изменението на изхода се “противопоставя”, по знак на изменението на

$$\delta_{k_{\beta}} = \frac{\delta k}{1 + \beta k}$$

$$K_{NL, \beta} < K_{NL}$$

входа (напр. за напреженията) и така дълбочината на изходните изменения съществено намалява в установен режим на усилвателя. По подобна причина силно намалява и коефициентът на нелинейни изкривявания  $K_{NL, \beta}$ .



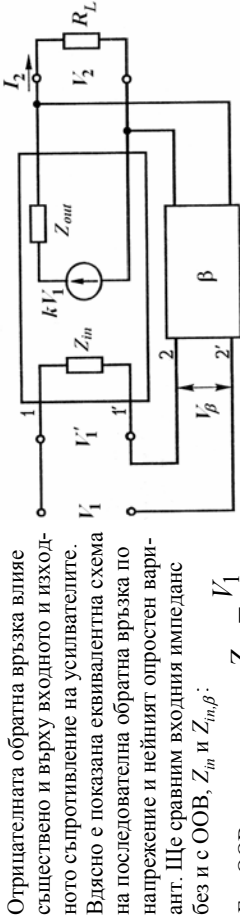
$$BW_{\beta} < BW$$

Важен ефект от прилагане на ООВ е разширяването на честотната лента  $BW_{\beta}$  на даден усилвател, обхванат от такава връзка. Още по-силен ефект може да се наблюдава при многостъпалните усилватели с ООВ (пунктирната крива на фигурата).

ООВ се използва в много усилвателни схеми, активни филтри и други активни устройства. Някои усилватели, като например операционните, практически не се използват без реализация на подходяща ОВ (Лекция 17).

Честотна зависимост на коефициента на усилване на усилвател без и с обратна връзка

### Входно съпротивление на усилвател с ООВ



Без ООВ:  $Z_{in} = \frac{V_1}{I_1}$

С ООВ: 
$$Z_{in,\beta} = \frac{V_1 + V_\beta}{I_1} = \frac{V_1 + \beta V_2}{I_1} = \frac{V_1(1 + \beta k)}{I_1}$$

Окончателно

$$Z_{in,\beta} = Z_{in}(1 + \beta k) \gg Z_{in}$$

По подобен начин може да се определи входната проводимост  $Y_{in,\beta}$  при паралелна обратна връзка. Тя се дава с изречение

$$Y_{in,\beta} = \frac{I_1 + I_\beta}{V_1} = \frac{I_1 + \beta I_2}{V_1} = \frac{I_1(1 + \beta k_i)}{V_1} = Y_{in}(1 + \beta k_i) > Y_{in}$$

### Изходно съпротивление на усилвател с ООВ

По същия начин може да се определи и изходният импеданс на усилвателя без и с ООВ. Опитайте са да направите това сами, като използвате еквивалентна схема на предната страница. Долу са показани изразите за изходния импеданс при:

➤ последователна ООВ по напрежение:

$$Z_{out,\beta} \cong \frac{Z_2}{1 + V_\beta / V_{\beta,open}}; \quad Z_2 \cong Z_{out}$$

➤ паралелна ООВ по ток:

$$Z_{out,\beta} \cong Z_2(1 + V_\beta / V_{\beta,short} / V_{\beta,short})$$

Така окончателно можем да направим следното заключение:

❖ При последователна ООВ (по напрежение или ток) входният импеданс расте, а при паралелна ООВ (по напрежение или ток) входният импеданс намалява:

$$Z_{in,\beta}^s, V \text{ or } I > Z_{in} \quad Z_{in,\beta}^p, V \text{ or } I < Z_{in}$$

❖ При ООВ по напрежение (последователна или паралелна) изходният импеданс намалява, а при ООВ по ток (последователна или паралелна) изходният импеданс расте

$$Z_{out,\beta}^s, \text{ or } p < Z_{out} \quad Z_{out,\beta}^I, \text{ or } p > Z_{out}$$

### Пример 1: Отрицателна обратна връзка в "Source" повторител

Особеност на разглежданата схема е, че при нея се използва 100%- отрицателна обратна връзка по напрежение. Това означава, че цялото изходно напрежение се подава на входа в противофаза:

$$V_{GS} = V_{in} - V_{out}$$

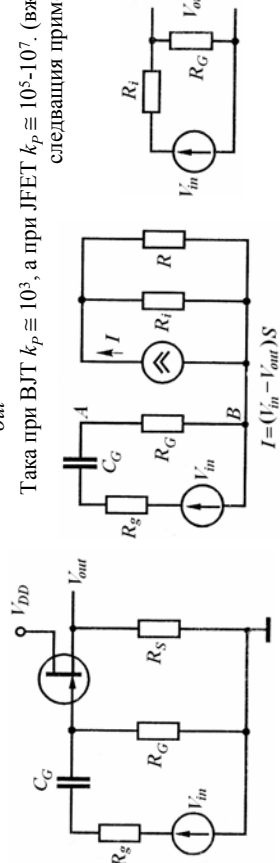
При тези условия изходното напрежение е (при оценка  $R_{out} \sim 20 \Omega$ ):

$$V_{out} = SR_L(V_{in} - V_{out}) = \frac{V_{in}SR_L}{1 + SR_L} = \frac{V_{in}R_L}{R_L + 1/S} \approx \frac{V_{in}R_L}{R_L + R_{out}} \approx V_{in}$$

Макар че коефициентът на усилване по ток е  $\sim 1$ , усилването по мощност е достатъчно голямо, понеже

$$k_p \cong k_i \cong \frac{R_{in}}{R_{out}} \cong \beta$$

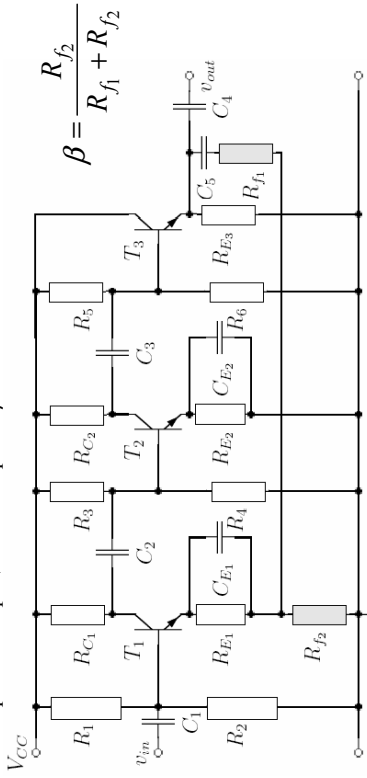
Така при ВJT  $k_p \cong 10^3$ , а при JFET  $k_p \cong 10^2-10^7$ . (вж. и следващия пример)



### Пример 2: Мощен усилвател с 3 стъпала

Това е двустъпален усилвател с два ВJT ( $T_1$  и  $T_2$ ) в схема "общ емитер", следвани от трето стъпало - емитерен повторител ( $T_3$ ). Първите две стъпала осигуряват висок коефициент на усилване, като dc схемите на първите стъпала са разделени с блокировъчни кондензатори ( $C_1, 2, 3$ ). Емитерният повторител осигурява ниско изходно съпротивление на мощния усилвател с цел по-добро съгласуване с товара. Къде е обратната връзка между изхода и входа на целия усилвател; с кои елементи се реализира? Каква е ролята на кондензатора  $C_5$ . Защо обратната връзка е отрицателна? Използвайте информацията от предишния пример и дадени израз за коефициент на обратна  $\beta$ .

Входът на целия усилвател е  $v_{in}$  и изходът е  $v_{out}$ . Кондензаторът  $C_5$  не позволява да



напрежението да влияят на ООВ