

“Аналогова схемотехника” – част I

Лекция № 2.9_10_11

Обратни връзки (ОВ) в усилвателите

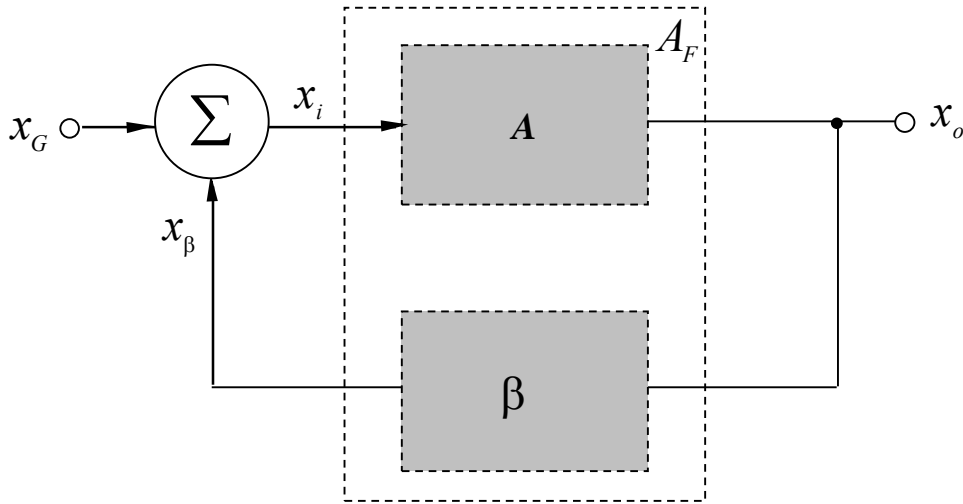
доц. д-р инж. Ивайло М. Пандиев
Катедра "Електронна техника", ФЕТТ

Съдържание

- Дефиниция за обратна връзка (ОВ)
- Относително изменение на коефициента на усилване с отрицателна обратна връзка
- Проверка на устойчивостта по критерия на Найкуист
- Видове обратни връзки
 - *Последователна обратна връзка по напрежение*
 - *Паралелна обратна връзка по напрежение*
 - *Последователна обратна връзка по ток*
 - *Паралелна обратна връзка по ток*
- Анализ на схема с последователна ООВ по напрежение
- Обобщение на основните видове обратни връзки
- Схеми на усилватели с отрицателна обратна връзка
- Влияние на обратните връзки върху ширината на честотната лента
- Влияние на обратните връзки върху нелинейните изкривявания
- Литература

Март 2019 г., София

Обратни връзки в усилвателите



$$A = \frac{x_o}{x_i} \quad \text{- Предавателна функция на правата верига}$$

$$\beta = \frac{x_\beta}{x_o} \quad \text{- Предавателна функция на обратната връзка}$$

- Коэффициент усилване за схема с отрицателна обратна връзка (ООВ)

$$x_i = x_G - x_\beta; \quad A_{F(-)} = \frac{x_o}{x_G} = \frac{x_o}{x_i + x_\beta} = \frac{x_o}{x_i \left(1 + \frac{x_\beta \cdot x_o}{x_i \cdot x_o} \right)} = \frac{A}{1 + \beta A} = \frac{A}{F}$$

$F = 1 + \beta A$ - дълбочина на отрицателна обратна връзка

$$F > 1 \quad A_{F(-)} < A;$$

В случаите когато $\beta A \gg 1$ за коефициента на усилване следва, че

$$A_{F(-)} \approx \frac{1}{\beta}.$$

- Коэффициент усилване за схема с положителна обратна връзка (ПОВ)

$$x_i = x_G + x_\beta; \quad A_{F(+)} = \frac{x_o}{x_G} = \frac{A}{1 - \beta A} = \frac{A}{F}$$

$F = 1 - \beta A$ - дълбочина на положителна обратна връзка

$$F < 1 \quad A_{F(+)} > A;$$

Обратни връзки в усилвателите

Относително изменение на коефициента на усилване с отрицателна обратна връзка

$$A_{F(-)} = \frac{x_o}{x_G} = \frac{A}{1 + \beta A} \quad dA_{F(-)} = \frac{\partial A_{F(-)}}{\partial A} dA + \frac{\partial A_{F(-)}}{\partial \beta} d\beta$$

Частни производни спрямо A и β

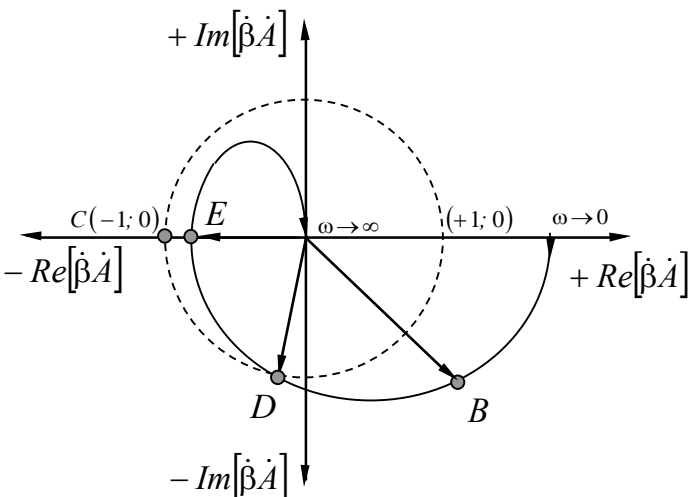
$$\frac{\partial A_{F(-)}}{\partial A} = \frac{1 + \beta A - \beta A}{(1 + \beta A)^2} = \frac{1}{(1 + \beta A)^2}; \quad \frac{\partial A_{F(-)}}{\partial \beta} = \frac{-A^2}{(1 + \beta A)^2}$$

$$\frac{\Delta A_{F(-)}}{A_{F(-)}} = \frac{\Delta A}{A} \frac{1}{1 + \beta A} - \frac{\Delta \beta}{\beta} = \frac{\Delta A}{A} \frac{1}{F} - \frac{\Delta \beta}{\beta}$$

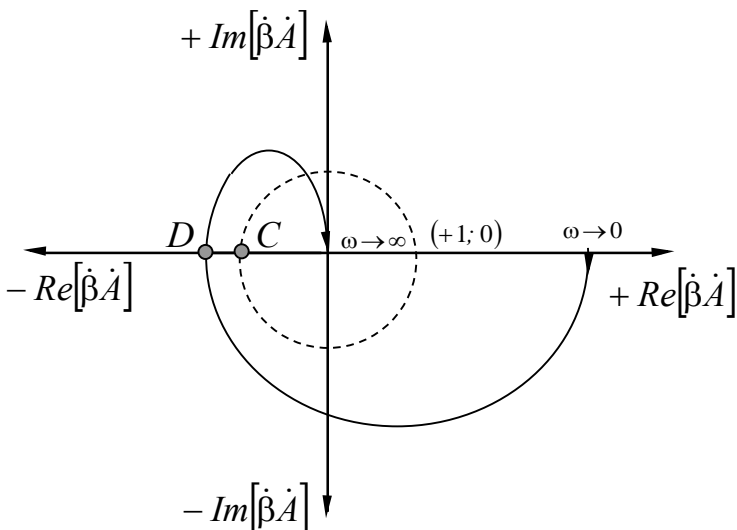
Проверка на устойчивостта по критерия на Найкуист

$$\dot{A}_{F(-)} = \frac{\dot{A}}{1 + \beta \dot{A}}$$

Устойчива схема



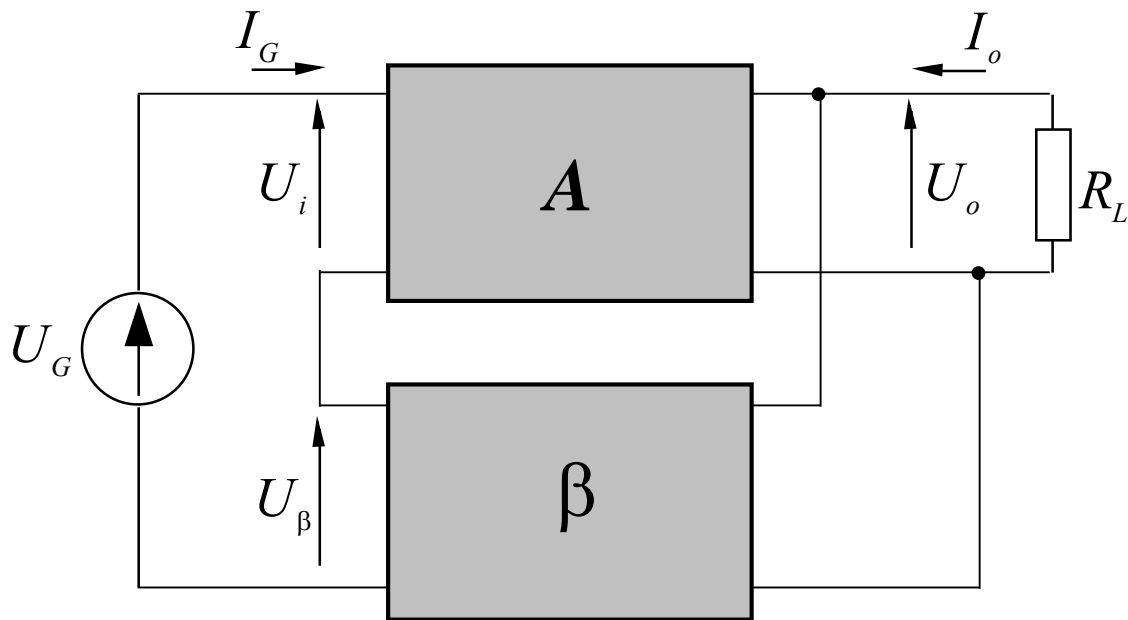
Неустойчива схема



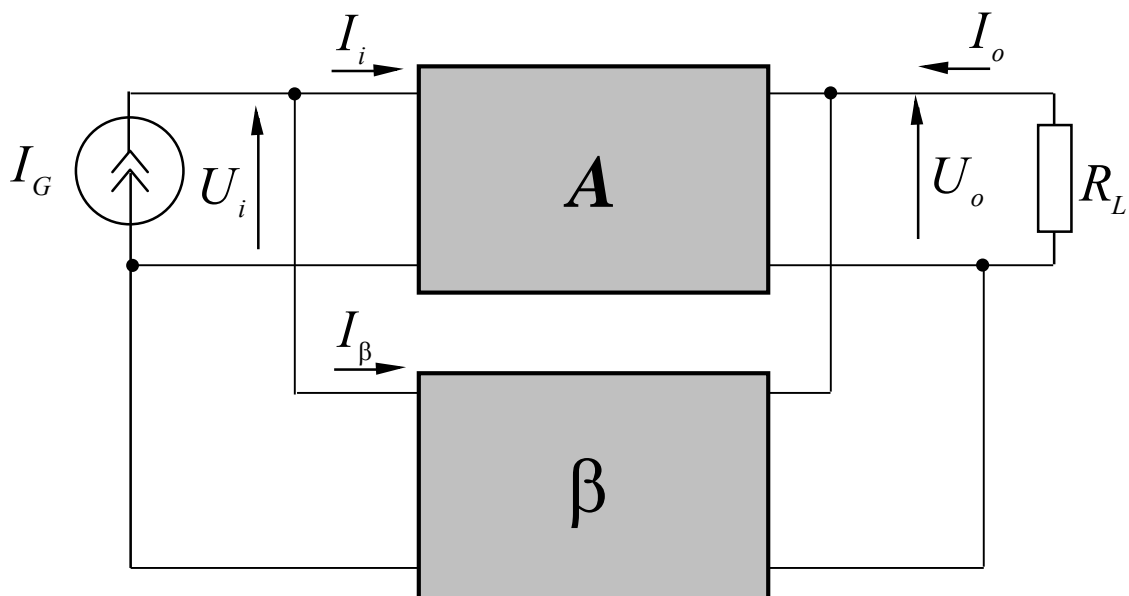
Обратни връзки в усилвателите

Видове обратни връзки

-Последователна обратна връзка по напрежение



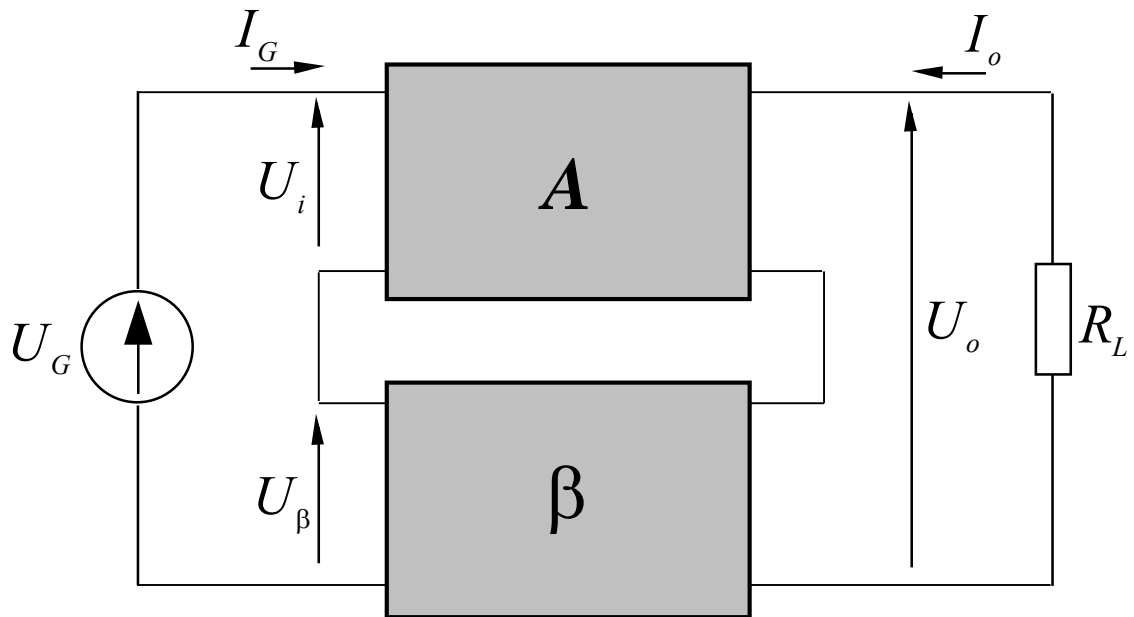
-Паралелна обратна връзка по напрежение



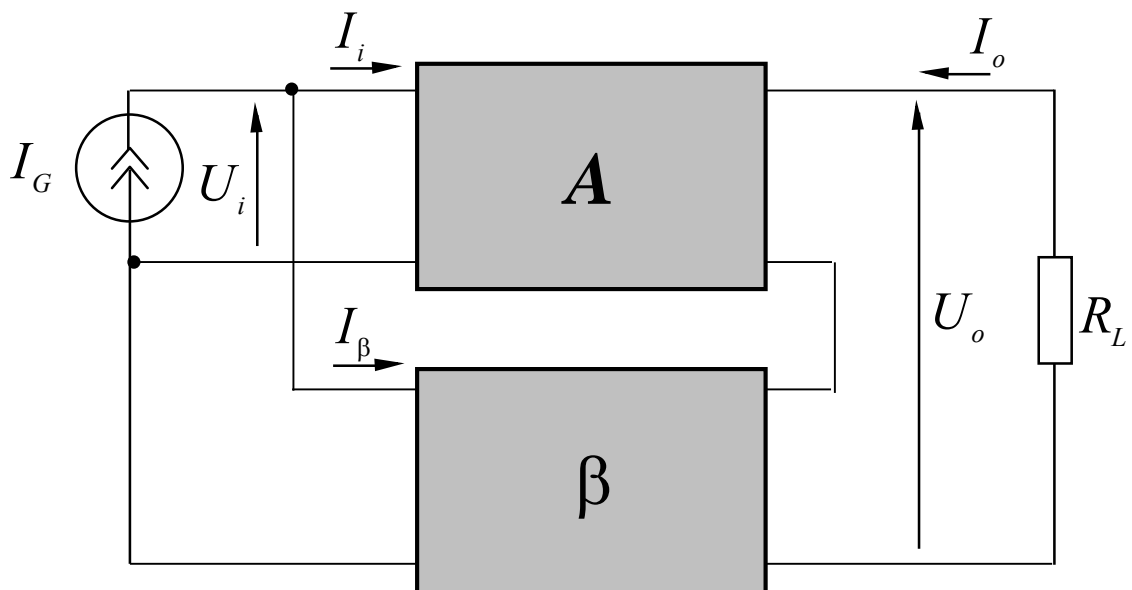
Обратни връзки в усилвателите

Видове обратни връзки

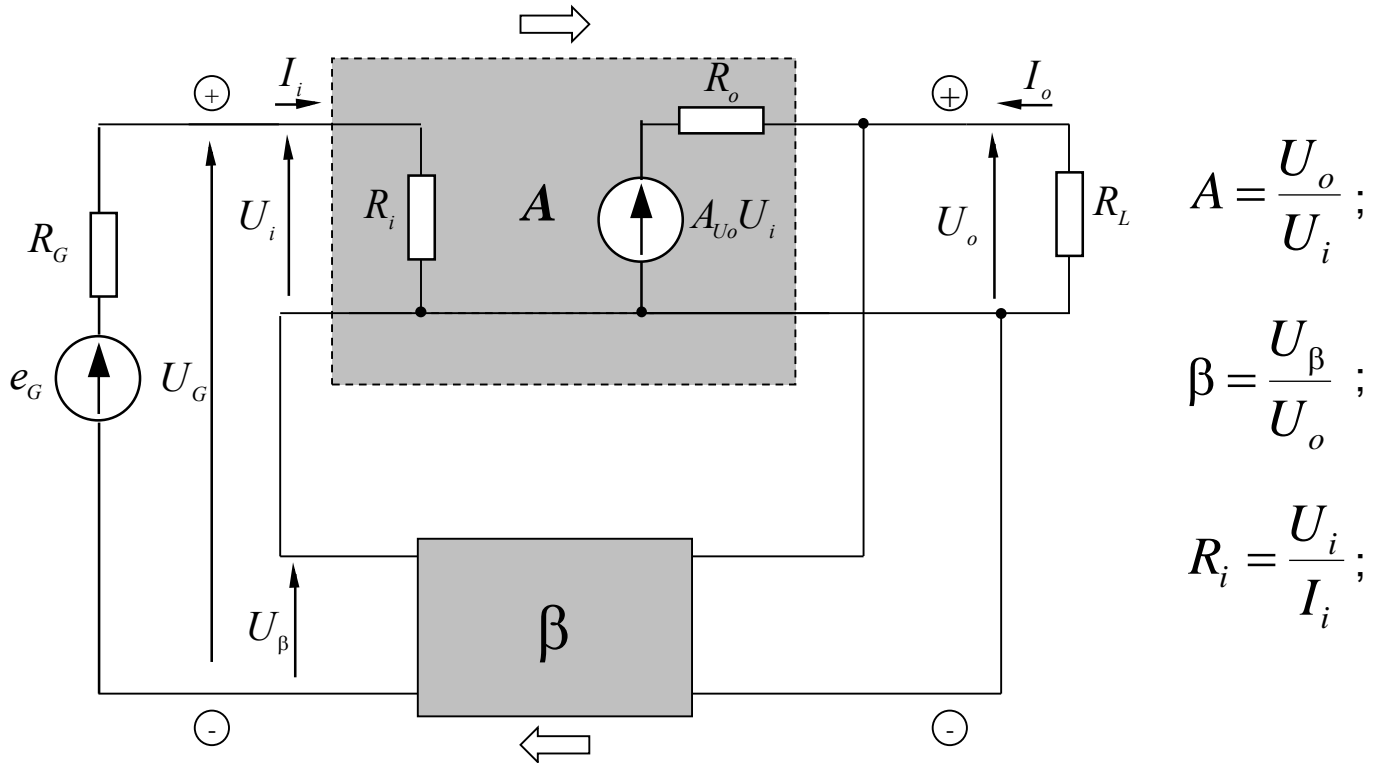
-Последователна обратна връзка по ток



-Паралелна обратна връзка по ток



Анализ на схема с последователна ООВ по напрежение



$$A = \frac{U_o}{U_i};$$

$$\beta = \frac{U_\beta}{U_o};$$

$$R_i = \frac{U_i}{I_i};$$

Коефициент на усилване

$$A_{F(-)} = \frac{U_o}{U_G} = \frac{U_o}{U_i + U_\beta} = \frac{1}{\frac{U_i}{U_o} + \frac{U_\beta}{U_o}} = \frac{1}{\frac{1}{A} + \beta} = \frac{A}{1 + \beta A} = \frac{A}{F}$$

Входно съпротивление

$$R_{iA} = \frac{U_G}{I_G} = \frac{U_i + U_\beta}{I_G} = \frac{U_i + \beta U_o}{I_G} = \frac{U_i + \beta U_i A}{I_G} = R_i(1 + \beta A)$$

Изходно съпротивление

$$R_{oA} = \frac{A_{Uo} U_i}{I_{os}} \quad R_L = 0; \quad U_o = U_\beta = 0; \quad U_G = U_i$$

$$I_{os} = \frac{A_{Uo} U_G}{R_o} \text{ - изходен ток при късо съединение}$$

$$R_{oA} = \frac{A_{Uo} U_i}{\frac{A_{Uo} U_G}{R_o}} = R_o \frac{U_i}{U_i + U_\beta} = R_o \frac{1}{1 + \frac{U_\beta}{U_i}} = R_o \frac{1}{1 + \frac{\beta U_o}{U_i}} = \frac{R_o}{1 + \beta A} = \frac{R_o}{F}$$

Обратни връзки в усилвателите

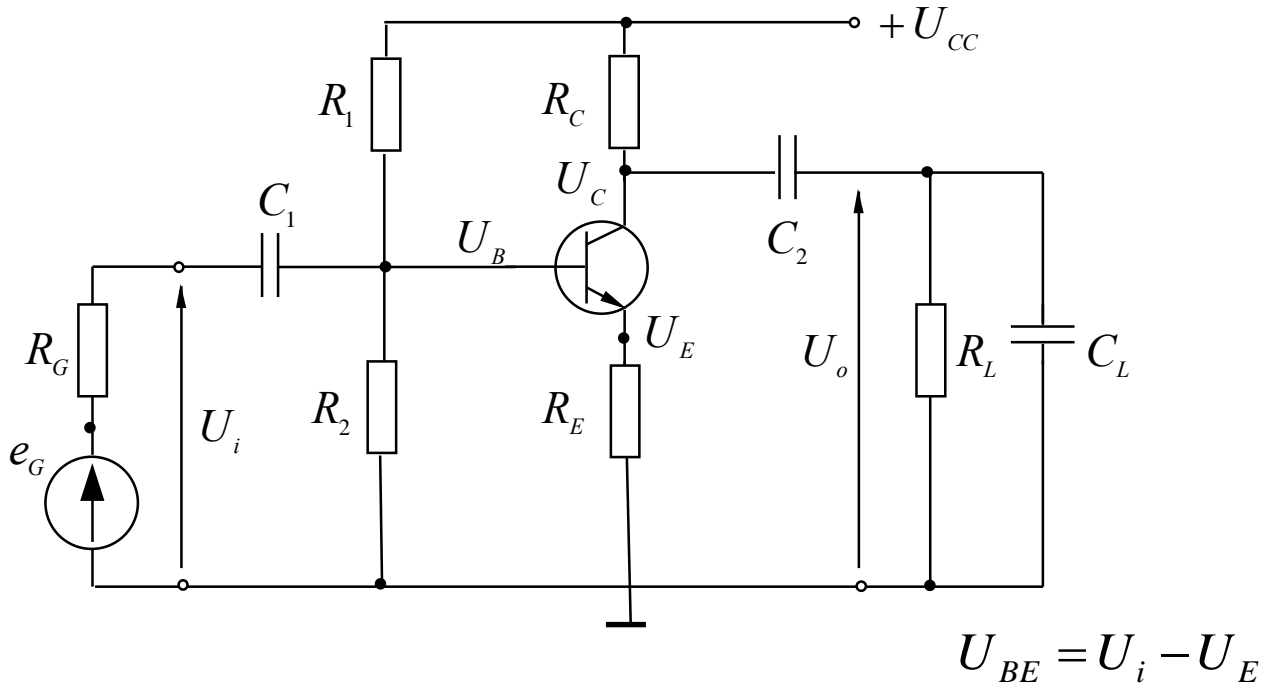
Обобщение на основните видове обратни връзки

Вид на обратната връзка	Коефициент на предаване с ОВ	Входно съпротивление	Изходно съпротивление	Забелжка
Последователна по напрежение	$A_F = \frac{A}{1 + \beta A}$	$R_{iA} = R_i(1 + \beta A)$	$R_{oA} = \frac{R_o}{1 + \beta A}$	$A = \frac{U_o}{U_i}, \beta = \frac{U_\beta}{U_o}$
Паралелна по напрежение	$\frac{A}{1 + \beta A}$	$\frac{R_i}{1 + \beta A}$	$\frac{R_o}{1 + \beta A}$	$A = \frac{U_o}{I_i}, \beta = \frac{I_\beta}{U_o}$
Последователна по ток	$\frac{A}{1 + \beta A}$	$R_i(1 + \beta A)$	$R_o(1 + \beta A)$	$A = \frac{I_o}{U_i}, \beta = \frac{U_\beta}{I_o}$
Паралелна по ток	$\frac{A}{1 + \beta A}$	$\frac{R_i}{1 + \beta A}$	$R_o(1 + \beta A)$	$A = \frac{I_o}{I_i}, \beta = \frac{I_\beta}{I_o}$

Обратни връзки в усилвателите

Схеми на усилватели с отрицателна обратна връзка

Едностъпален усилвател с ООВ по ток (схема ОЕ с емитерно съпротивление)



Коефициент на усилване

$$A_U = \frac{u_o}{u_i} = \frac{\Delta u_C}{\Delta u_B} = \frac{-\Delta i_C R_C}{\Delta U_{BE} + \Delta i_E R_E} = \frac{-S R_C}{1 + S R_E} \quad \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_C} \approx \frac{1}{S}$$

При $S R_E \gg 1$ за коефициента на усилване се получава: $A_U = -\frac{R_C}{R_E}$

При включване на товар в изхода на схемата усилването е:

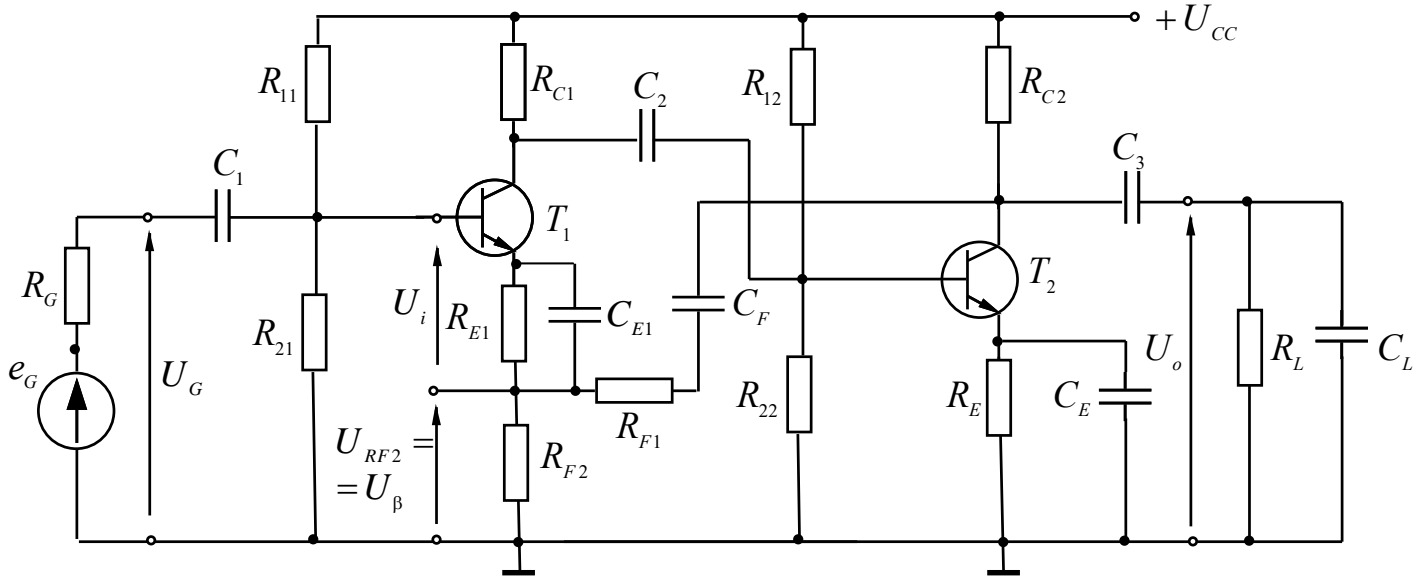
$$A_U = -\frac{R_C \parallel R_L}{R_E}$$

Изходно съпротивление

$$R_{oA} = [r_{CE} (1 + S R_E)] \parallel R_C \stackrel{R_C \ll r_{CE}}{\approx} R_C; \quad r_{CE} \approx \frac{1}{h_{22e}}$$

Обратни връзки в усилвателите

Двустъпален усилвател с последователна ООВ по напрежение



$$A_U = \frac{u_o}{u_i} = A_{U1} \cdot A_{U2};$$

$$A_{U1} = -\frac{R_{C1} // R_{iA2}}{R_{F2}}; \quad A_{U2} = -S(R_{C2} // R_L)$$

$$A_{F(-)} = \frac{U_o}{U_G} = \frac{A_U}{1 + \beta_U A_U}, \text{ където } \beta_U = \frac{U_\beta}{U_o} = \frac{R_{F2}}{R_{F2} + R_{F1}}$$

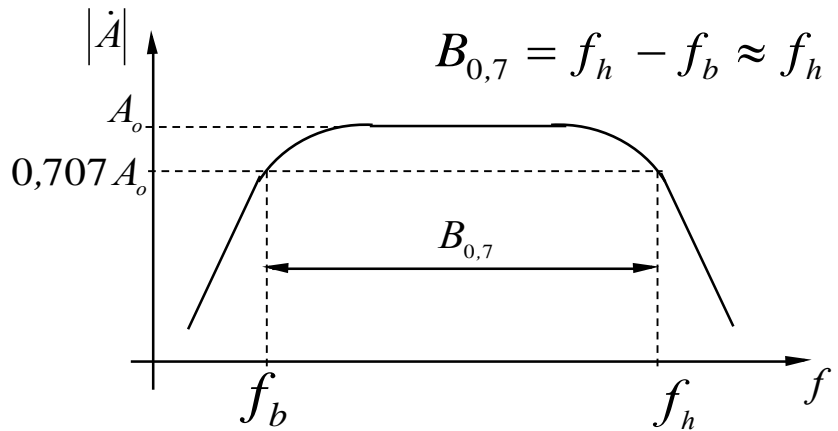
При $\beta_U A_U \gg 1$

$$A_{F(-)} \approx \frac{1}{\beta_U} = \frac{R_{F2} + R_{F1}}{R_{F2}} = 1 + \frac{R_{F1}}{R_{F2}}$$

Влияние на обратните връзки върху ширината на честотната лента

$$\dot{A}_{F(-)} = \frac{\dot{A}}{1 + \beta \dot{A}}$$

$$\dot{A} = \frac{A_o}{\left(1 - j \frac{f_z}{f}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_h}\right)}$$



$$GBP = A_{F0(-)} B_{0,7} \approx A_o f_h; \quad f_h \gg f_b$$

Влияние на ОБ върху високата гранична честота f_h

$$\dot{A} = \frac{A_o}{1 + j \frac{f}{f_h}}; \quad \dot{A}_{F(-)} = \frac{\dot{A}}{1 + \beta \dot{A}} = \frac{A_o}{1 + \beta A_o} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_h'}} = \frac{A_{F0(-)}}{1 + j \frac{f}{f_h'}}$$

$$f_h' = f_h (1 + \beta A_o) = f_h F \quad \text{- висока гранична честота с ОБ}$$

$A_{F0(-)} = A_o / (1 + \beta A_o)$ - коефициент на усилване с ОБ за средни честоти

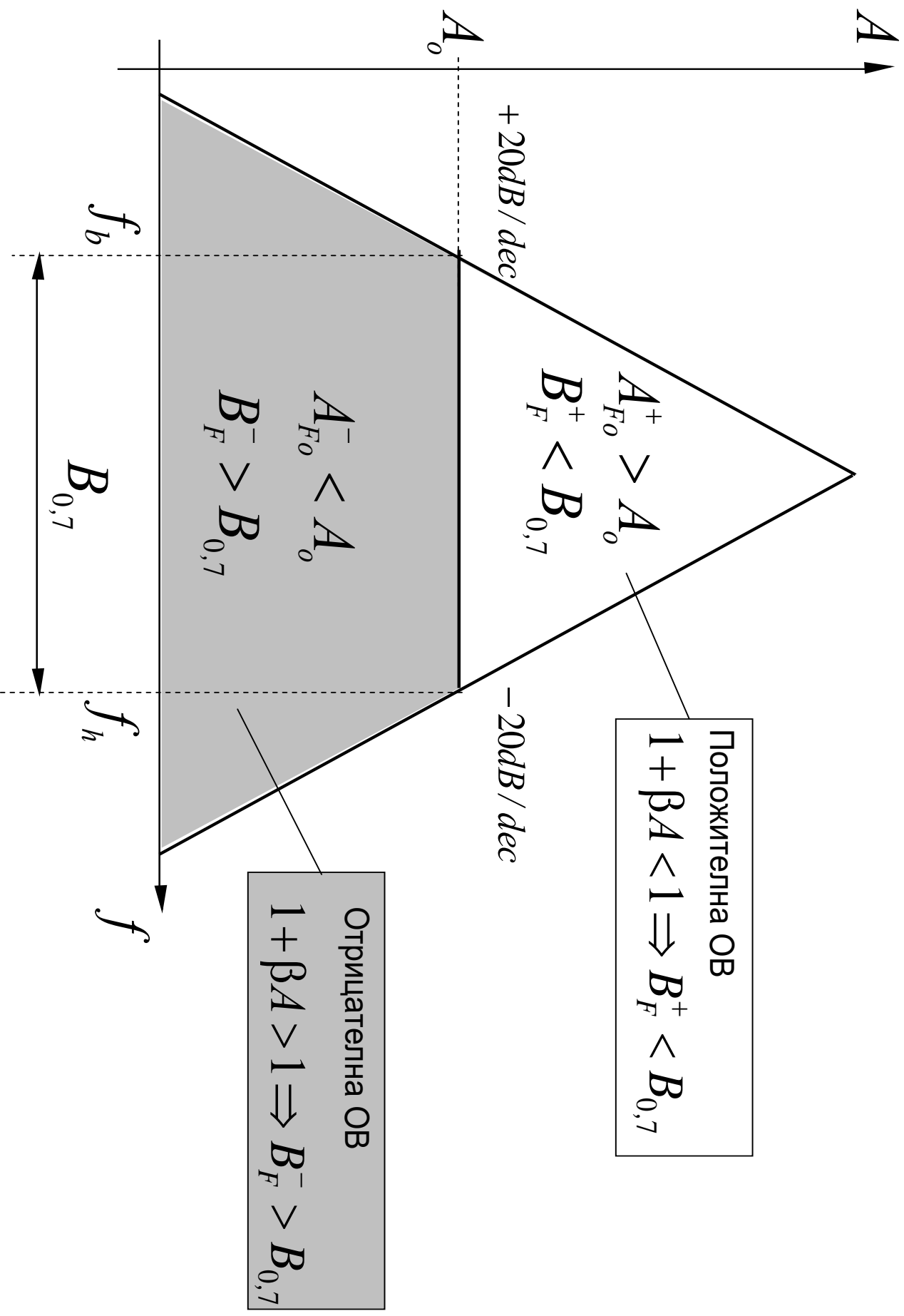
Влияние на ОБ върху ниската гранична честота f_b

$$\dot{A} = \frac{A_o}{1 - j \frac{f_b}{f}}; \quad \dot{A}_{F(-)} = \frac{\dot{A}}{1 + \beta \dot{A}} = \frac{A_o}{1 + \beta A_o} \cdot \frac{1}{1 - j \frac{f_b}{f'}} = \frac{A_{F0(-)}}{1 - j \frac{f_b}{f'}}$$

$$f_b' = \frac{f_b}{1 + \beta A_o} = \frac{f_b}{F} \quad \text{- ниска гранична честота с ОБ}$$

Следователно при въвеждане на ООБ, честотната лента на усилвателя ($f_h' > f_h$, $f_b' < f_b$) се разширява, а коефициентът на усилване намалява ($A_{F0(-)} < A_o$), като произведението честота – усилване (площ на усилването) се запазва $GBP = A_{F0(-)} (f_h' - f_b') = A_o (f_h - f_b) = const$

Влияние на обратните връзки върху ширината на честотната лента



Влияние на обратните връзки върху нелинейните изкривявания

Предавателна характеристика на биполярен транзистор

$$i_C = a_1 u_{BE} + a_2 u_{BE}^2; \quad u_{BE} = U \cdot \cos \omega t$$

$$i_C = a_1 u_{BE} + a_2 u_{BE}^2 = a_1 U \cos \omega t + a_2 U^2 \cos^2 \omega t =$$

$$= a_1 U \cos \omega t + a_2 U^2 \frac{1 + \cos 2\omega t}{2}$$

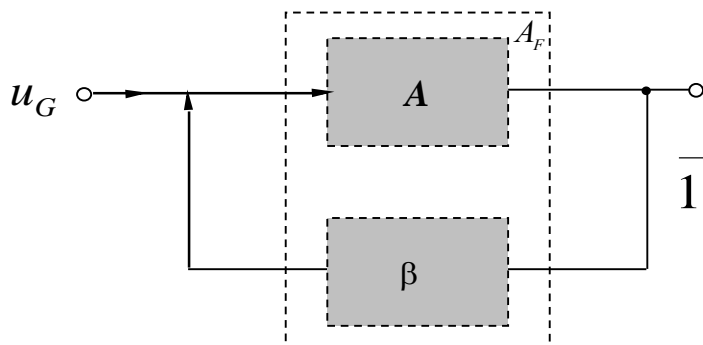
Коефициент на нелинейни изкривявания

$$THD = k_h = \frac{\sqrt{u_{2m}^2 + u_{3m}^2 + \dots}}{\sqrt{u_{1m}^2 + u_{2m}^2 + u_{3m}^2 + \dots}} \approx \frac{\sqrt{u_{2m}^2 + u_{3m}^2 + \dots}}{u_{1m}} = \frac{u_h}{u_{1m}},$$

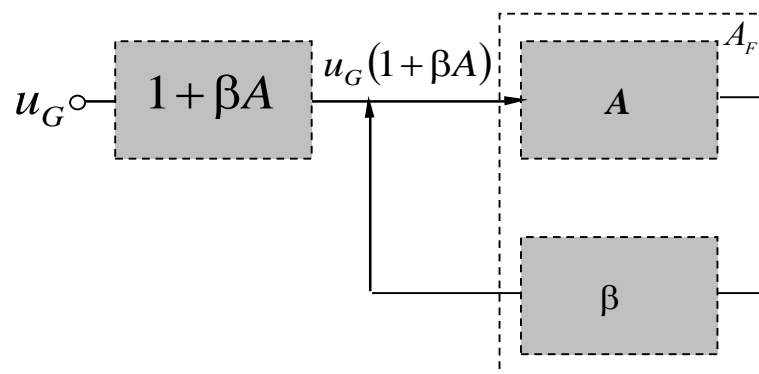
където $u_h = \sqrt{u_{2m}^2 + u_{3m}^2 + \dots}$ - ср. стойност на харм. съставки

$$u_o = u_1 + u_h = A \cdot u_G + u_h - \text{за схема без ОВ}$$

Усилвателно стъпало с ОВ



$$\frac{u_o}{1 + \beta A} = \frac{A u_G + u_h}{1 + \beta A} = \frac{A u_G}{1 + \beta A} + \frac{u_h}{1 + \beta A}$$



$$\frac{u_o}{1 + \beta A} = \frac{A u_G (1 + \beta A) + u_h}{1 + \beta A} =$$

$$= A u_G + \frac{u_h}{1 + \beta A}$$

Коефициент на нелинейни
изкривявания с ОВ

$$k_F = \frac{\frac{u_h}{1 + \beta A}}{A u_G} = \frac{k_h}{1 + \beta A}$$