

Аналогова схемотехника

Същност на аналоговите електронни схеми

Аналоговите електронни схеми са електротехнически устройства, в които се осъществява управление на предаването на енергия от токозахранващия източник към товара.

Те се делят на линейни и нелинейни.

Към линейните спадат усилвателите.

Представители на нелинейните схеми са генераторите и функционалните преобразуватели – логаритматорите, амплитудните модулатори и др.

Електронните усилватели са предназначени да усилват подадените на входа напрежителни и/или токови сигнали, без да изменят формата им.

В диапазона на разрешените стойности на входния сигнал съществува пропорционалност между моментните стойности на усилваните и усилените сигнали (усилвателите имат линейна предавателна характеристика) и поради това те се причисляват към линейните устройства.

Усилвателите се използват в радиотехниката, комуникационната техника, измервателната техника и др.

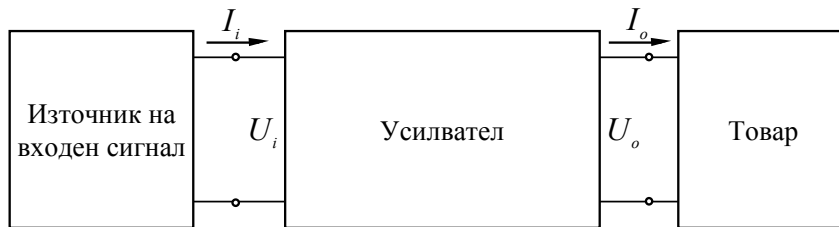
В зависимост от вида на входните сигнали усилвателите се делят на:

- постояннотокови (могат да усилят бавноизменящи се сигнали),
- променливотокови (усилват хармонични сигнали) и
- импулсни.

В зависимост от честотата на усиляваните сигнали променливотоковите усилватели биват:

- за ниски честоти ($20\text{Hz} \div 20\text{kHz}$),
- за средни честоти ($20\text{kHz} \div 20\text{MHz}$) и
- за високи честоти ($20\text{MHz} \div 2\text{GHz}$).

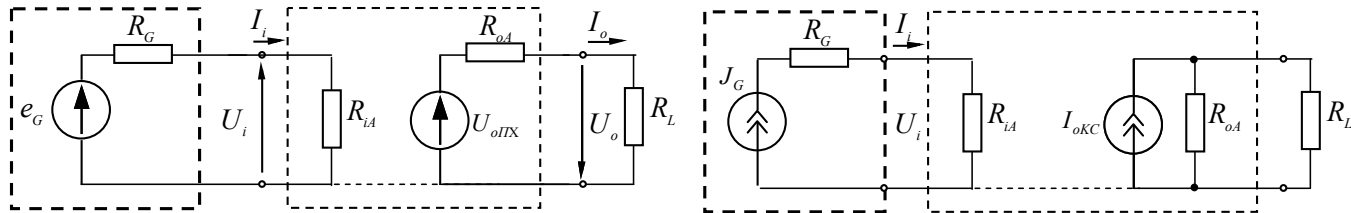
Еквивалентна схема и основни експлоатационни параметри на усилвателите



Фиг. 2.1.

Източникът се представя:

- като идеален (с изходно съпротивление 0Ω) генератор на напрежение и последователно свързан към него резистор със стойност, равна на изходното съпротивление на източника.
- като идеален (с безкрайно голямо изходно съпротивление) генератор на ток и паралелно свързан към него резистор със стойност, равна на изходното съпротивление на източника.



Входът на усилвателя по отношение на източника може да се разглежда като последователно свързан резистор със съпротивление $R_{iA} = U_i / I_i$.

Изходната верига на усилвателя съгласно теоремата на Тевенен може да се представи като източник на напрежение (фиг. 2.2а) със стойност, равна на напрежението на празен ход $U_{oПХ}$, и с вътрешно съпротивление R_{oA} , равно на съпротивлението между изходните клеми,

а съгласно теоремата на Нортон – като източник на ток (фиг. 2.2б) със стойност, равна на тока на късо съединение, и с вътрешно съпротивление R_{oA} , равно на съпротивлението между изходните клеми.

Изходното съпротивление на усилвателя R_{oA} може да се определи и от израза $R_{oA} = U_{o,ПХ} / I_{o,КС}$.

Основните параметри

Коефициент на предаване на входната верига

Входна величина може да бъде:

напрежението U_i , токът I_i или мощността $P_i = U_i I_i$.

Коефициент на предаване на входната верига по напрежение:

$$(2.1) \quad U_i = \frac{R_{iA}}{R_{iA} + R_G} E_G.$$

$$(2.2) \quad A_{i,U} = U_i / E_G = R_{iA} / (R_{iA} + R_G) = 1 / (1 + R_G / R_{iA}).$$

Коефициентът $A_{i,U}$ ще бъде с максимална стойност ($A_{i,U} = 1$), ако $R_G \ll R_{iA}$.

Входното съпротивление на усилвателя трябва да бъде много по-голямо от изходното съпротивление на генератора на напрежение.

Коефициент на предаване на входната верига по ток:

$$(2.3) \quad I_i = \frac{R_G}{R_{iA} + R_G} J_G.$$

$$(2.4) \quad A_{i,I} = \frac{I_i}{J_G} = \frac{R_G}{R_{iA} + R_G} = \frac{1}{1 + R_{iA} / R_G}.$$

$A_{i,I}$ ще бъде с максимална стойност ($A_{i,I} = 1$), ако $R_G \gg R_{iA}$.

Входното съпротивление на усилвателя трябва да бъде много по-малко от изходното съпротивление на генератора на ток.

Коефициент на предаване на входната верига по мощност

$$(2.5) \quad I_i = \frac{1}{R_{iA} + R_G} E_G,$$

$$(2.6) \quad P_i = \frac{R_{iA} * E_G^2}{(R_{iA} + R_G)^2}.$$

Входната мощност ще има максимална стойност при $R_G = R_{iA} = R$.

$$(2.7) \quad P_i = \frac{E_G^2}{4R_G}.$$

$$(2.8) \quad A_{i,P} = \frac{P_i}{P_G} = \frac{R_{iA} * R_G}{(R_{iA} + R_G)^2}, \text{ където } P_G = \frac{E_G^2}{R_G}.$$

Коефициент на предаване на изходната верига

Изходна величина може да бъде:

напрежението U_o , токът I_o или мощността $P_o = U_o * I_o$.

– *коефициента на предаване на изходната верига по напрежение:*

$$(2.9) \quad A_{o,U} = \frac{U_o}{U_{o,ПХ}} = \frac{R_L}{R_{oA} + R_L} = \frac{1}{1 + R_{oA} / R_L};$$

– *коефициента на предаване на изходната верига по ток:*

$$(2.10) \quad A_{o,I} = \frac{I_o}{I_{o,КС}} = \frac{R_{oA}}{R_{oA} + R_L} = \frac{1}{1 + R_L / R_{oA}};$$

– *коефициента на предаване на изходната верига по мощност:*

$$(2.11) \quad A_{o,P} = \frac{P_o}{P_{o,КС}} = \frac{R_{oA} * R_L}{(R_{oA} + R_L)^2}, \text{ където } P_{o,КС} = \frac{U_{o,КС}^2}{R_{oA}}.$$

Максимално предаване по напрежение =>

Максимално предаване по ток =>

Максимално предаване по мощност =>

Усилвателните качества на усилвателя се оценяват с коефициентите на усилване по:

– по напрежение:

$$(2.12) \quad A_U = \frac{U_o}{U_i},$$

– по ток:

$$(2.13) \quad A_I = \frac{I_o}{I_i},$$

– по мощност:

$$(2.14) \quad A_P = \frac{P_o}{P_i}.$$

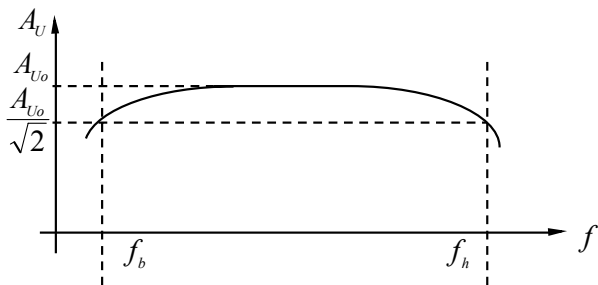
Коефициентите на усилване в логаритмични единици – децибели (dB).

$$(2.15) \quad A_{UdB} = 20 \lg A_U;$$

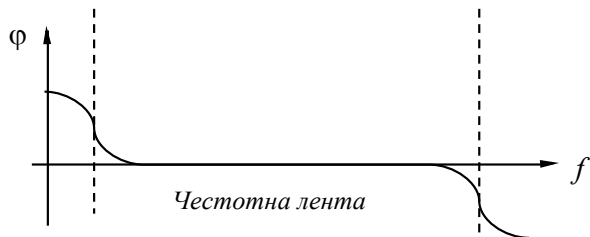
$$(2.16) \quad A_{IdB} = 20 \lg A_I;$$

$$(2.17) \quad A_{PdB} = 10 \lg A_p.$$

Амплитудно-честотна и фазово-честотна характеристика



Фиг. 2.3а



Фиг. 2.3б

$$(2.18) \quad A_U(j\omega) = A_{U_\omega} * e^{j\varphi_\omega}, \text{ където}$$

A_{U_ω} е модулът на коефициента на усилване, а φ_ω – аргумент, характеризиращ фазовия ъгъл между входното и изходното напрежение на усилвателя.

Долна гранична честота ($\omega_b = 2\pi f_b$) и
Горна гранична честота ($\omega_h = 2\pi f_h$).

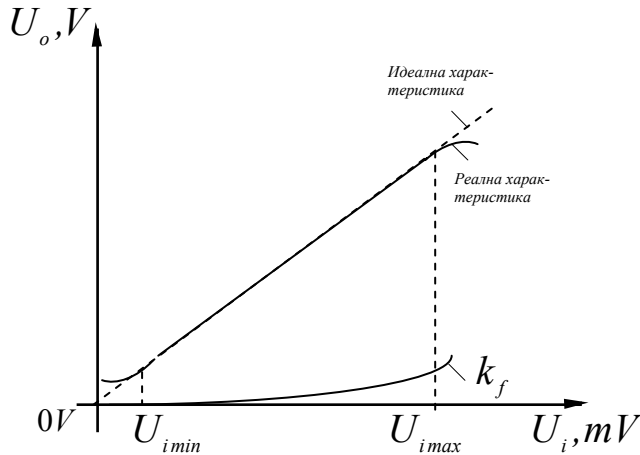
Честотна лента на усилвателя.

коэффициент на честотни изкривявания
 $M = A_{U_\omega} / A_{U_0}$.

В зависимост от характера на АЧХ и ФЧХ усилвателите се класифицират на:

- усилватели на ниски честоти,
- усилватели на високи честоти,
- постояннотокови усилватели,
- широколентови усилватели,
- избирателни усилватели и т.н.

Предавателна характеристика



Фиг. 2.4

Динамичен обхват D на усилвателя:

$$(2.19) \quad D = \frac{U_{i max}}{U_{i min}},$$

$U_{i min}$ зависи от избраното отношение сигнал-шум $SN = U_{i min} / U_N$ и шумовото напрежение U_N на електронната схема.

$U_{i max}$ се определя от максималната амплитуда на изходния сигнал при допустимо ниво на нелинейните изкривявания.

Коефициент на нелинейни изкривявания:

$$(2.20) \quad k_{\text{нел}} = \frac{\sqrt{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots}}{\sqrt{U_{1m}^2 + U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots}},$$

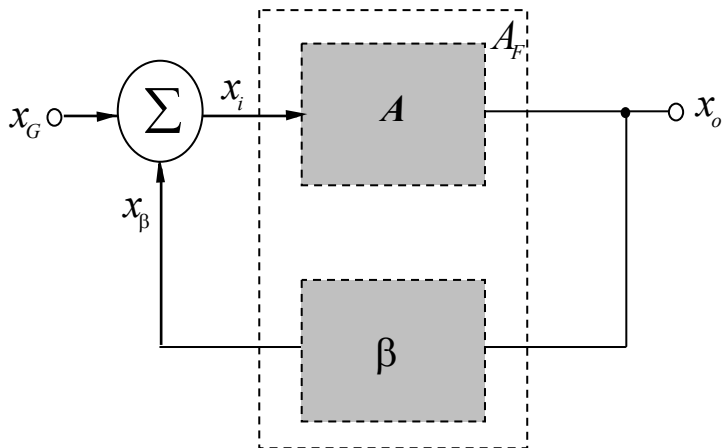
Коефициент на полезно действие

$$(2.21) \quad \eta = \frac{P_o}{P_{cc}},$$

където P_{cc} е консумираната мощност от захранващия източник.

Обратни връзки (ОВ) в усилвателите

Обратната връзка в усилвателните стъпала връща част от изходния сигнал (напрежение или ток) се към входа.



усилвател с коэффициент на усилване A ,

четириполусник на обратна връзка (ОВ) с коэффициент на предаване β .

коэффициент на усилване на схемата с ОВ A_F .

Фиг. 2.5.

Ако входният сигнал x_G и сигналът от ОВ x_β имат противоположна полярност, говорим за отрицателна обратна връзка (ООВ).

$$x_i = x_G - x_\beta.$$

$$(2.22a) \quad A_{F(-)} = \frac{x_o}{x_G} = \frac{x_o}{x_i + x_\beta} = \frac{x_o}{x_i \left(1 + \frac{x_\beta * x_o}{x_i * x_o} \right)} = \frac{A}{1 + \beta * A} = \frac{A}{F},$$

където $A = x_o / x_i$ е коефициент на усилване във веригата на право предаване,

$\beta = x_\beta / x_o$ – коефициент на обратната връзка, а

$F = 1 + \beta * A$ – дълбочина на обратната връзка.

Ако $\beta * A \gg 1$,

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

При голяма дълбочина на ОВ коефициентът на усилване при ООВ $A_{F(-)}$ ще зависи само от коефициента на предаване на обратната връзка.

При положителна обратна връзка (ПОВ) сигналите x_G и x_β се сумират и входният сигнал x_i нараства

$$x_i = x_G + x_\beta$$

$$(2.22в) \quad A_{F(+)} = \frac{x_o}{x_G} = \frac{A}{1 - \beta * A} = \frac{A}{F},$$

където $F = 1 - \beta * A$ е дълбочината на ПОВ.

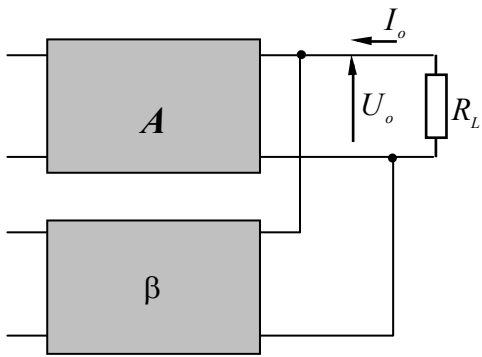
$$\text{При отрицателна ОВ} \quad F > 1 \quad \text{и} \quad A_{F(-)} < A,$$

$$\text{а при положителна} \quad F < 1 \quad \text{и} \quad A_{F(+)} > A.$$

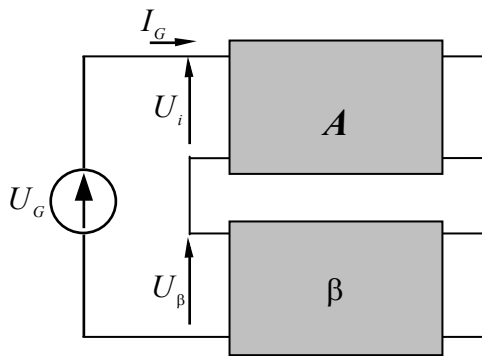
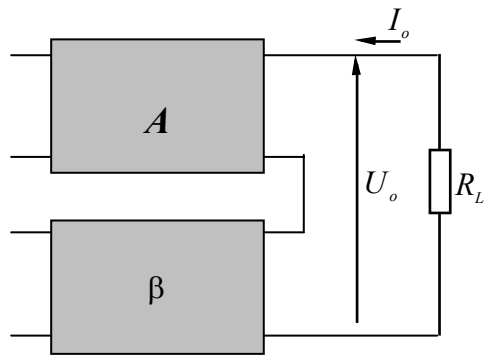
Видове обратни връзки

Обратни връзки по напрежение и ток

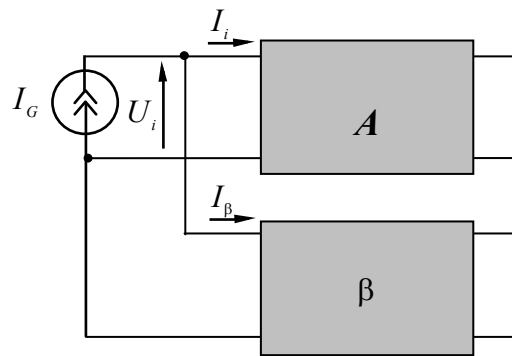
Последователни и паралелни обратни връзки



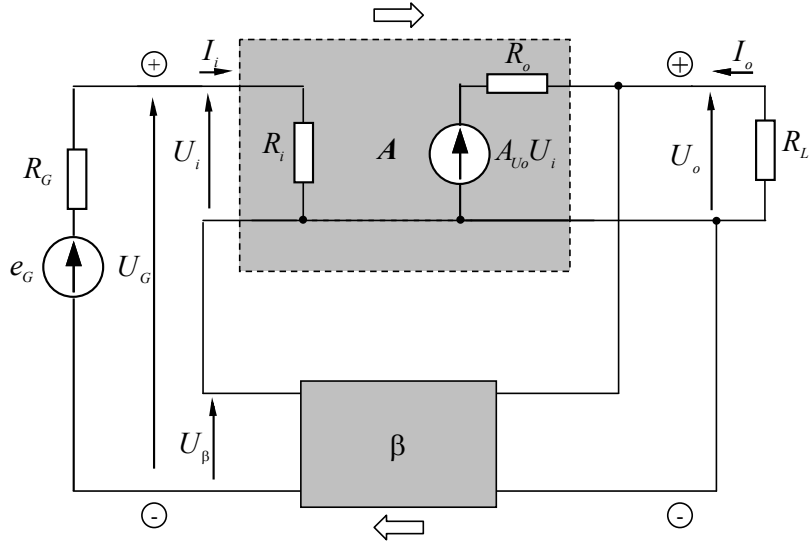
Фиг. 2.6а



Фиг. 2.7а



Анализ на схема с последователна ООВ по напрежение



Фиг. 2.8

$$A = U_o / U_i,$$

$$\beta = U_\beta / U_o.$$

– Коефициент на усилване при ООВ по напрежение

$$(2.23a) \quad A_{F(-)} = \frac{U_o}{U_G} = \frac{U_o}{U_i + U_\beta} = \frac{1}{\frac{U_i}{U_o} + \frac{U_\beta}{U_o}} = \frac{1}{\frac{1}{A} + \beta} = \frac{A}{1 + \beta * A} = \frac{A}{F}.$$

– Входно съпротивление при последователна ООВ

$$(2.23б) \quad R_{iF} = \frac{U_G}{I_G} = \frac{U_i + U_\beta}{I_G} = \frac{U_i(1 + \beta * A)}{I_G} = R_{iA}(1 + \beta * A) = R_{iA} * F,$$

където $R_{iA} = U_i / I_G$ е входното съпротивление на усилвателя без ОВ.

– Изходно съпротивление при ООВ по напрежение

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

Обобщения:

- коефициентът на усилване с ОВ намалява F пъти;
- при последователната ОВ входното съпротивление се увеличава F пъти
- при паралелна ОВ входното съпротивление намалява F пъти;
- при ОВ по напрежение изходното съпротивление намалява F пъти
- при ОВ по ток изходното съпротивление се увеличава F пъти.

При ООВ $F = 1 + \beta * A$ или $F > 1$

при ПОВ $F = 1 - \beta * A$ или $F < 1$

Влияние на обратната връзка върху ширината на честотната лента

$f'_h = f_h * F$ е гранична честота на усилвателя с ОВ при високи честоти.

$f'_b = f_b / F$ е граничната честота на усилвателя с ОВ при ниски честоти.

Следователно при въвеждане на ООВ ($F > 1$) честотната лента на усилвателя се разширява ($f'_h > f_h, f'_b < f_b$),
като коефициентът на усилване намалява ($A_{F0(-)} < A_o$).

Влияние на обратната връзка върху стабилността на коефициента на усилване

$$(2.31) \quad A_{F(-)} = \frac{A}{1 + \beta * A}$$

$$(2.32) \quad \frac{\partial A_{F(-)}}{\partial A} = \frac{1 + \beta * A - \beta * A}{(1 + \beta * A)^2} = \frac{1}{(1 + \beta * A)^2} .$$

$$(2.33) \quad \frac{\Delta A_{F(-)}}{A_{F(-)}} = \frac{\Delta A}{A} * \frac{1}{1 + \beta * A} .$$

$$(2.34) \quad \frac{\Delta A_{F(-)}}{A_{F(-)}} = - \frac{\Delta \beta}{\beta} .$$