

Засилувачи

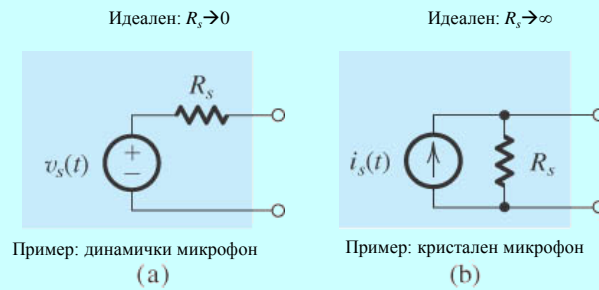
Проф. д-р Јосиф Ќосев
Доц. д-р Томислав Карталов

(во соработка со проф. д-р Методија Камиловски)

Теми

- Поим за сигнал
- Напонски засилувач (дефиниции)
- Параметри и еквивалентни шеми
- Засилувач со BJT на средни фреквенции
- Засилувач со мосфет на средни фреквенции
- Фреквенциска карактеристика

Електричен извор на сигнал



$$\text{Струја при куса врска} \quad i_s = \frac{v_s}{R_s} \quad \begin{array}{l} \text{Напон при отворено коло} \\ \text{Внатрешна отпорност} \end{array}$$

Figure 1.1 Two alternative representations of a signal source: (a) the Thévenin form, and (b) the Norton form.

Електроника, 3FEIT05Z018

3

Временски тек на (аналоген) сигнал

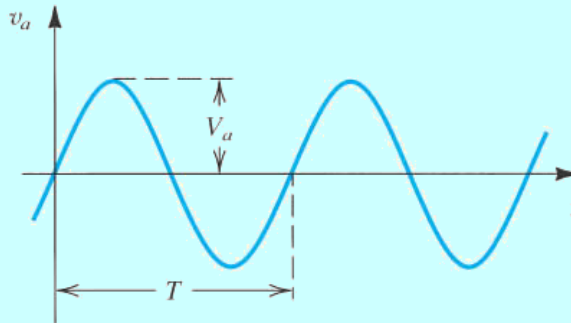


Figure 1.2 An arbitrary voltage signal $v_s(t)$.

Електроника, 3FEIT05Z018

4

Параметри на синусен сигнал



$$v_a = V_a \sin(\omega t + \varphi) = \sqrt{2} V_{a\text{eff}} \sin(2\pi f t + \varphi)$$

Figure 1.3 Sine-wave voltage signal of amplitude V_a and frequency $f = 1/T$ Hz. The angular frequency $\nu = 2\pi f$ rad/s.

+ Почетна фаза (phase) $\varphi=0$

Правоаголен периодичен сигнал – временски приказ

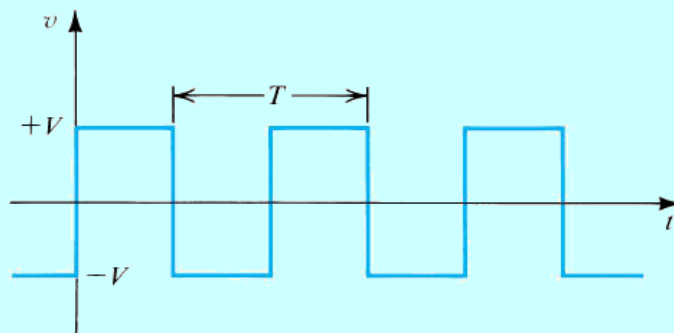


Figure 1.4 A symmetrical square-wave signal of amplitude V .

Правоаголен периодичен сигнал – фреквенциски приказ (амплитуден спектар)

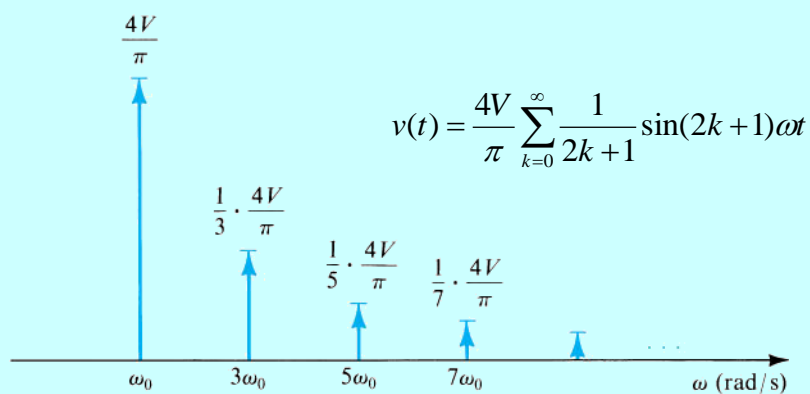
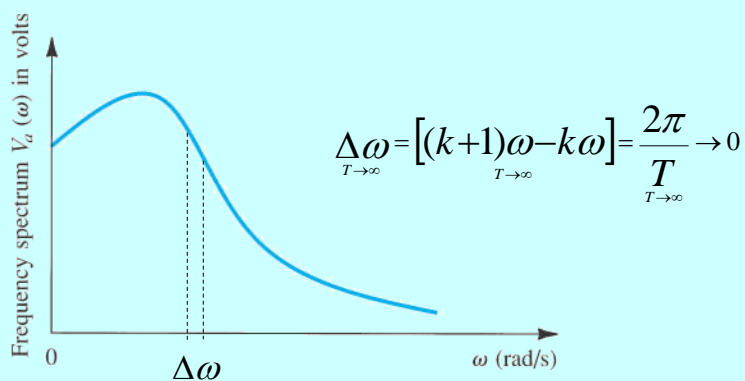


Figure 1.5 The frequency spectrum (also known as the line spectrum) of the periodic square wave of Fig. 1.4.

Електроника, 3FEIT05Z018

7

Спектар на аperiodичен сигнал



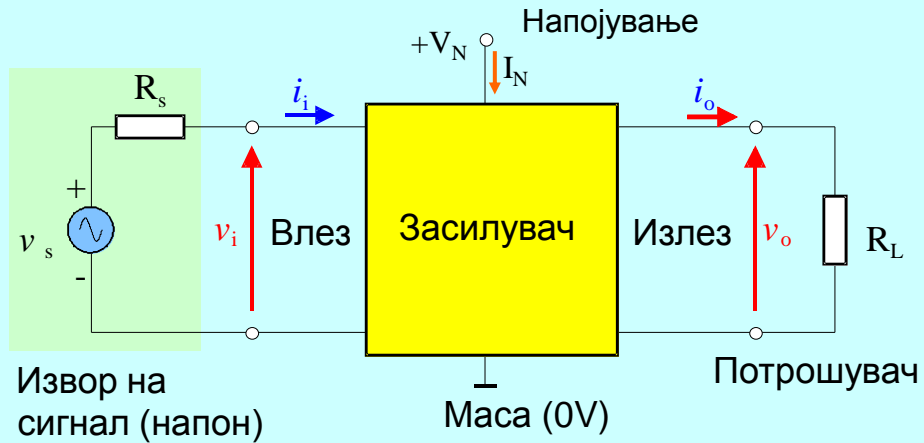
(Математички: со Фуриеова трансформација или со Лапласова трансформација)

Figure 1.6 The frequency spectrum of an arbitrary waveform such as that in Fig. 1.2.

Електроника, 3FEIT05Z018

8

ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ И КАРАКТЕРИСТИКИ НА ЗАСИЛУВАЧИТЕ



Електроника, 3FEIT05Z018

9

- Напонско засилување

$$A_v \equiv \frac{V_o}{V_i}$$

- Струјно засилување

$$A_I \equiv \frac{I_o}{I_i}$$

- Засилување на моќност

$$A_p \equiv \frac{P_o}{P_i} = \left| \frac{V_o I_o}{V_i I_i} \right| = |A_v A_I|$$

Електроника, 3FEIT05Z018

10

Засилување во децибели:

$$a_v (dB) = 20 \log \left| \frac{V_o}{V_i} \right|$$

$$a_I (dB) = 20 \log \left| \frac{I_o}{I_i} \right|$$

$$a_P (dB) = 10 \log \left| \frac{P_o}{P_i} \right|$$

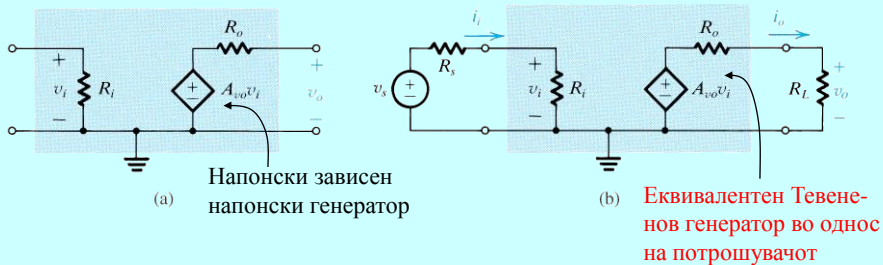
- Коефициент на полезно дејство η :
 - сооднос меѓу испорачаната моќност во потрошувачот и превземената моќност од изворот за напојување

$$\eta = \frac{P_o}{P_N} \cdot 100\%$$

Параметри на засилувачот

- Влезна отпорност: $R_i \equiv \frac{V_i}{I_i} (\Omega)$
- Излезна отпорност:
= еквивалентна
Тевененова отпорност
на колото во однос на
потрошувачот $R_o = \frac{V_o}{I_o} \Big|_{V_s=0, R_L=\infty}$

Еквивалентна шема (напонска)



- Напонско засилување при отворен излез:

$$A_{vo} = \frac{V_o}{V_i} \Big|_{R_L \rightarrow \infty}$$

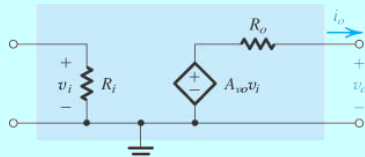
$$V_i = V_s \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

$$V_o = A_{vo} V_i \cdot \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

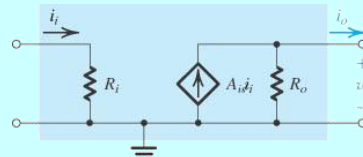
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

$$A_{vs} = \frac{V_o}{V_s} = \dots$$

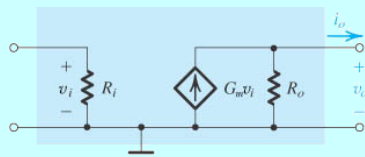
Четири можни еквивалентни шеми



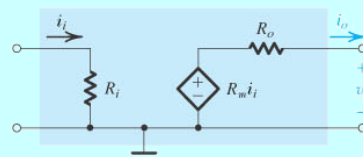
- Напонска (A_{vo} , R_i , R_o)



- Струјна (A_{is} , R_i , R_o)



- Транскондуктивна (G_{ms} , R_i , R_o)



- Трансрезистивна (R_{mo} , R_i , R_o)

Четири можни еквивалентни шеми

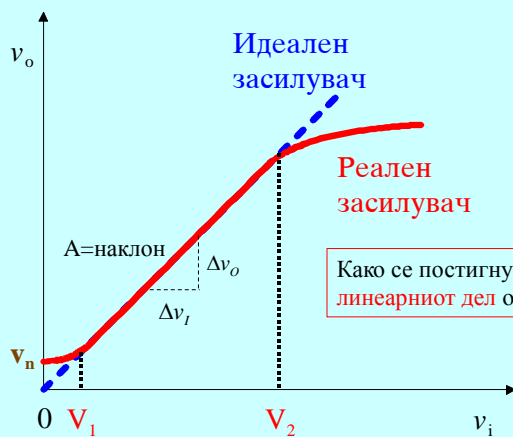
- Секое од засилувањата може едноставно да биде изразено преку било кое од другите три.
- Пример, сите преку A_v (A_{vo}):

$$A_i = \left. \frac{I_o}{I_i} \right|_{R_L=0} = \frac{A_{vo} V_i / R_o}{V_i / R_i} = A_{vo} \frac{R_i}{R_o}$$

$$G_m = \left. \frac{I_o}{V_i} \right|_{R_L=0} = \frac{A_{vo} V_i / R_o}{V_i} = \frac{A_{vo}}{R_o}$$

$$R_m = \left. \frac{V_o}{I_i} \right|_{R_L=\infty} = \frac{A_{vo} V_i}{V_i / R_i} = A_{vo} R_i$$

Амплитудно-амплитудна карактеристика на засилувачот

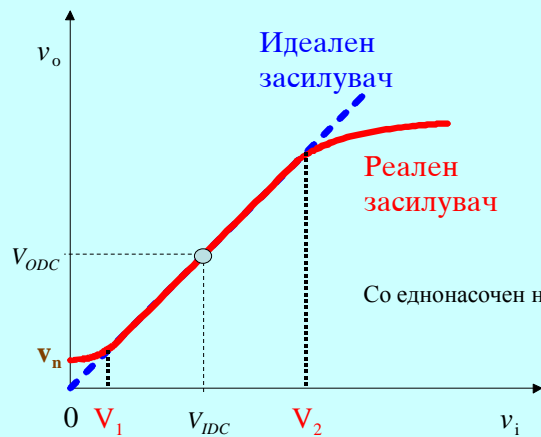


Како се постигнува сигналите да бидат во
линеарниот дел од карактеристиката?

Електроника, 3FEIT05Z018

17

Поставување во работна точка (поларизација)

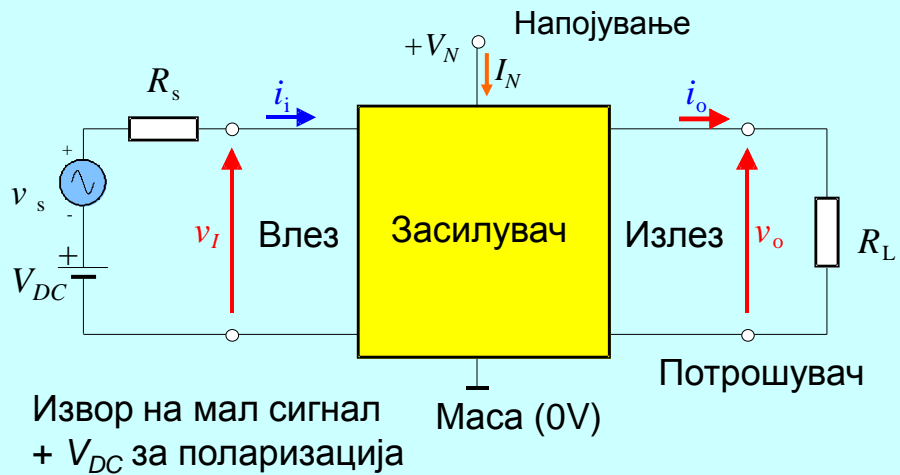


Со еднонасочен напон за **поларизација**.

Електроника, 3FEIT05Z018

18

ПОСТАВУВАЊЕ ВО РАБОТНА ТОЧКА (ПОЛАРИЗАЦИЈА)

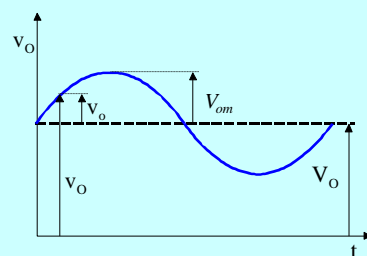
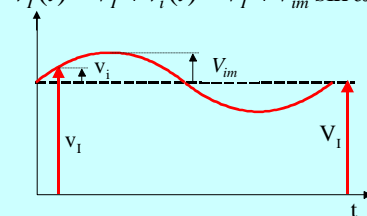


Електроника, 3FEIT05Z018

19

Компоненти на напоните и струите

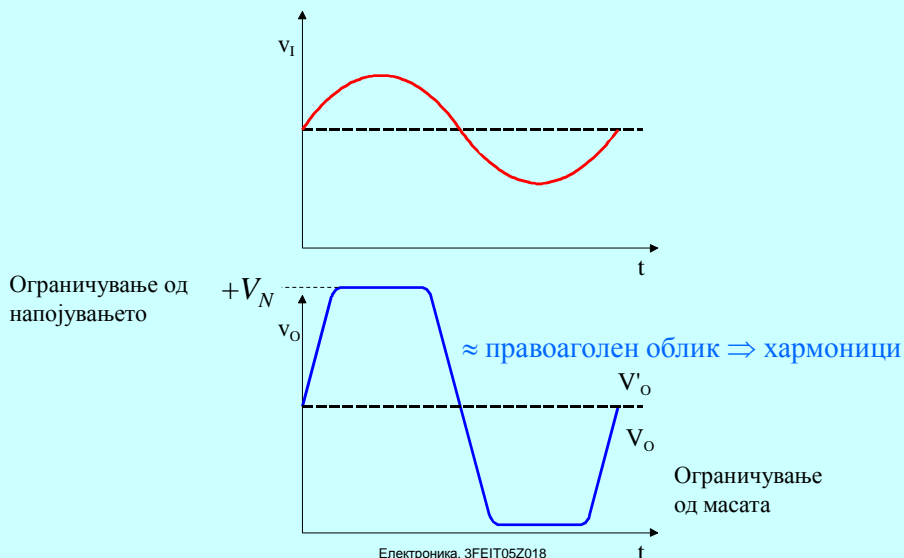
$$v_I(t) = V_I + v_i(t) = V_I + V_{im} \sin \omega t = V_I + \sqrt{2}V_i \sin \omega t$$



Електроника, 3FEIT05Z018

20

Ограничувања во работата и нелинеарни изобличувања



Фактор на изобличување (клир фактор)

Однос помеѓу:

- Вкупната ефективна вредност на повисоките хармоници,
- Ефективна вредност на основниот хармоник

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{i=2,3,\dots} U_{ief}^2}}{U_{1ef}} 100(\%)$$

Со два извори за напојување работната точка може да се постави на потенцијал 0V ...

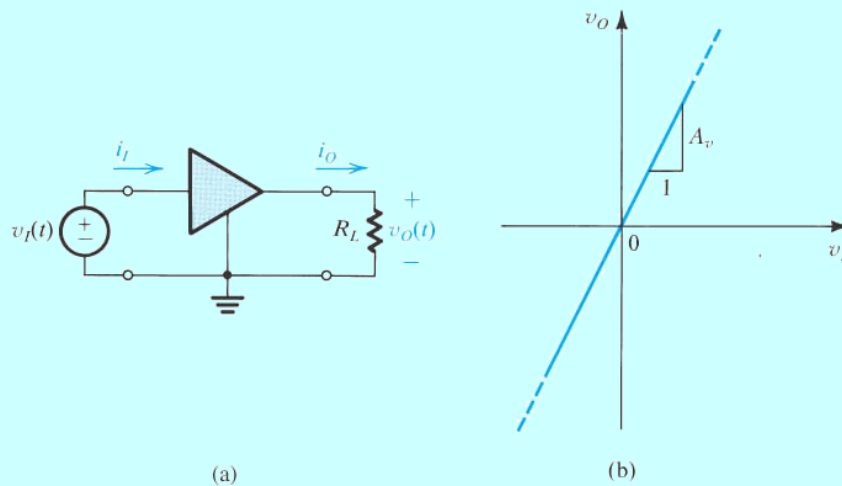
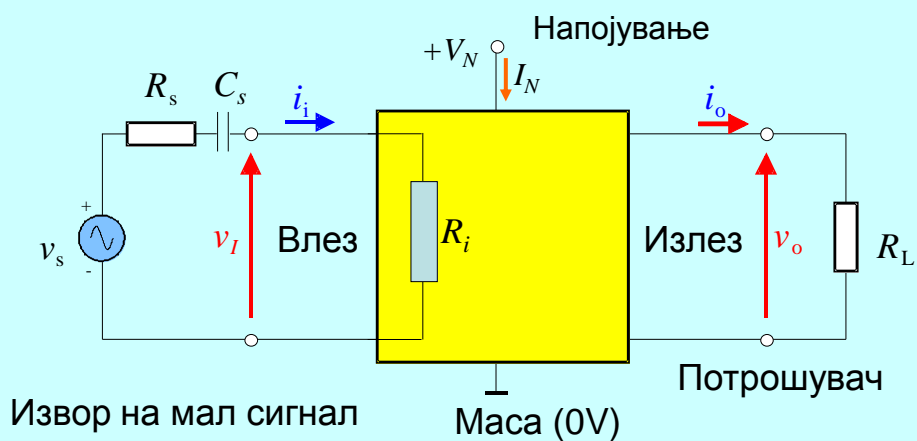


Figure 1.11 (a) A voltage amplifier fed with a signal $v_I(t)$ and connected to a load resistance R_L . (b) **Transfer characteristic** of a linear voltage amplifier with voltage gain A_v .

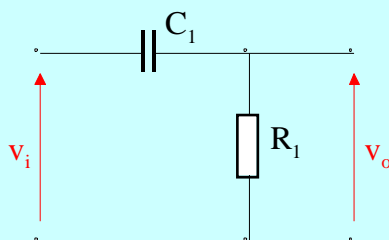
... или може да се раздвои со (спрежен) кондензатор



Како влијае кондензаторот врз засилувањето?

Нека е, за сега, $R_s \ll R_i$ па ќе го занемариме.

Добиваме т.н. CR-коло (ознаките се локални за колото):



Го анализираме „засилувањето“ на импедансниот делител C_1 - R_1 :
 $A_L = V_o/V_i$ (сооднос на комплексните претставници или Лапласовите трансформации...)

Електроника, 3FEIT05Z018

25

$$A_L = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = \frac{1}{1 - j\left[\frac{f_L}{f}\right]}$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi C_1 R_1}$$

Долна гранична
фреквенција

$$|A_L| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{f_L}{f}\right]^2}}$$

Електроника, 3FEIT05Z018

26

- Амлитудна карактеристика (модул):

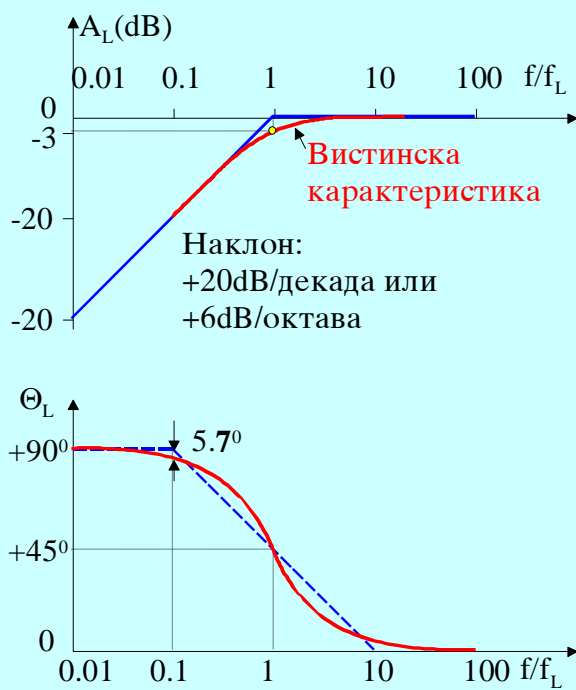
$$A_L(dB) = -20 \log \sqrt{1 + \left[\frac{f_L}{f}\right]^2}$$

- Фазна карактеристика (аргумент):

$$\theta_L = \arctg \frac{f_L}{f}$$

Електроника, 3FEIT05Z018

27

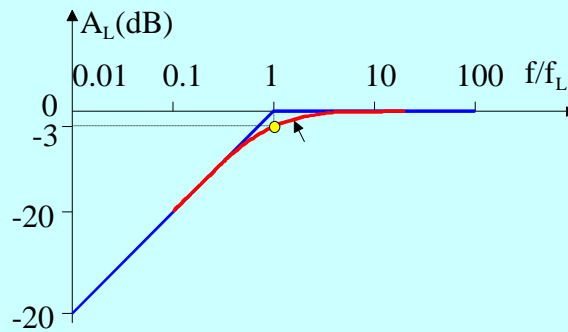


Електроника, 3FEIT05Z018

28

Фреквенциско поведение

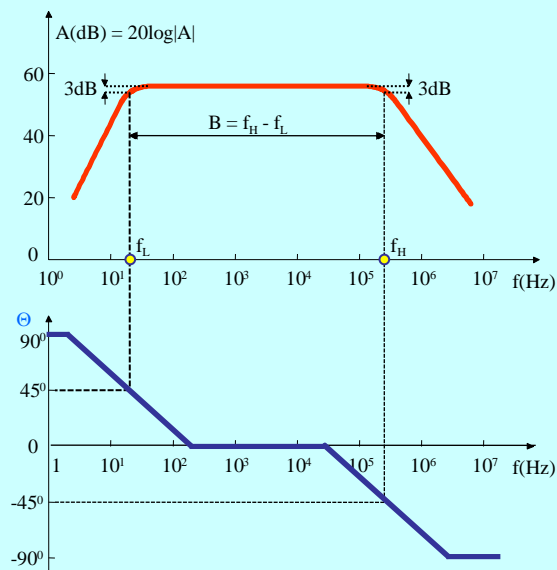
- Над f_L сигналот комплетно минува (т.н. подрачје на **средни фреквенции**)
- **Високопропусен филтер**



Електроника, 3FEIT05Z018

29

Типична амплитудно-фреквенциска карактеристика и фазно-фреквенциска карактеристика

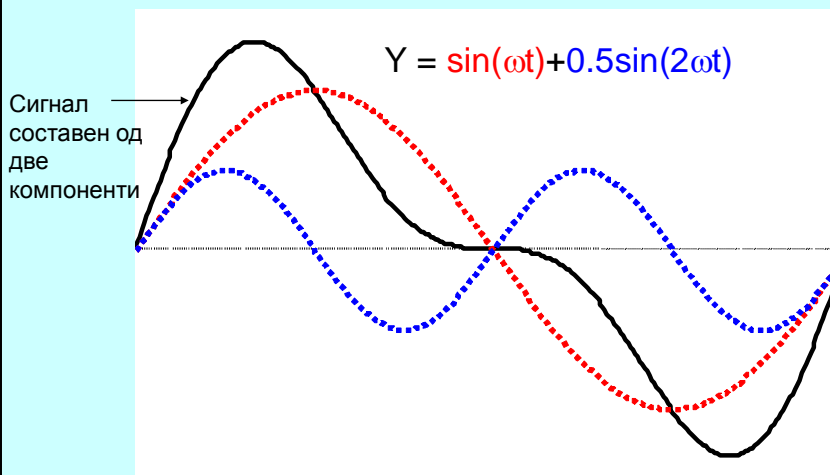


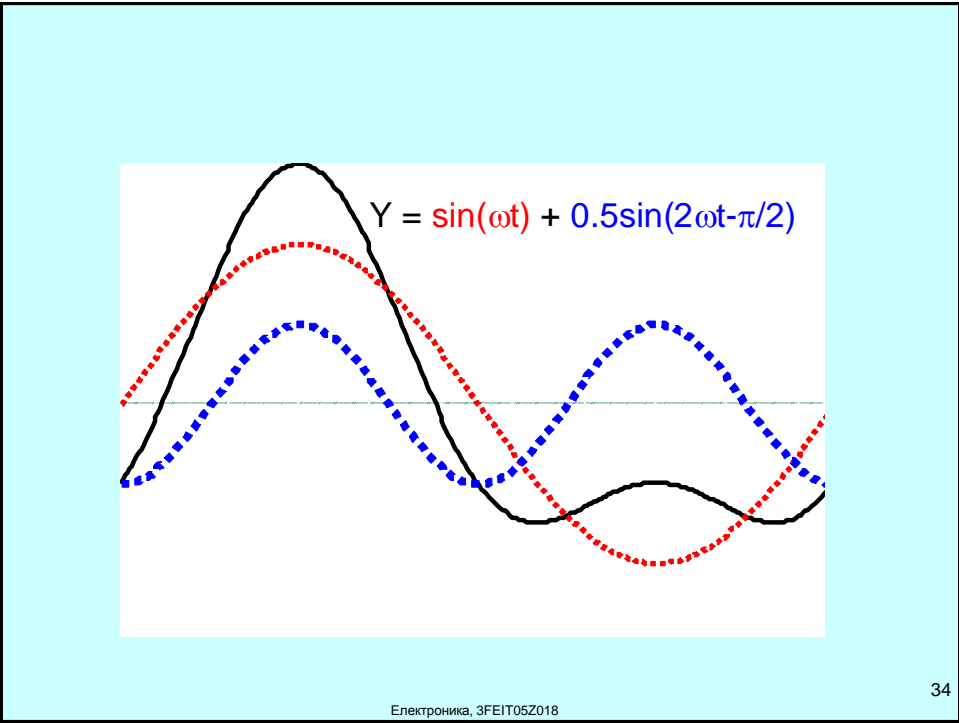
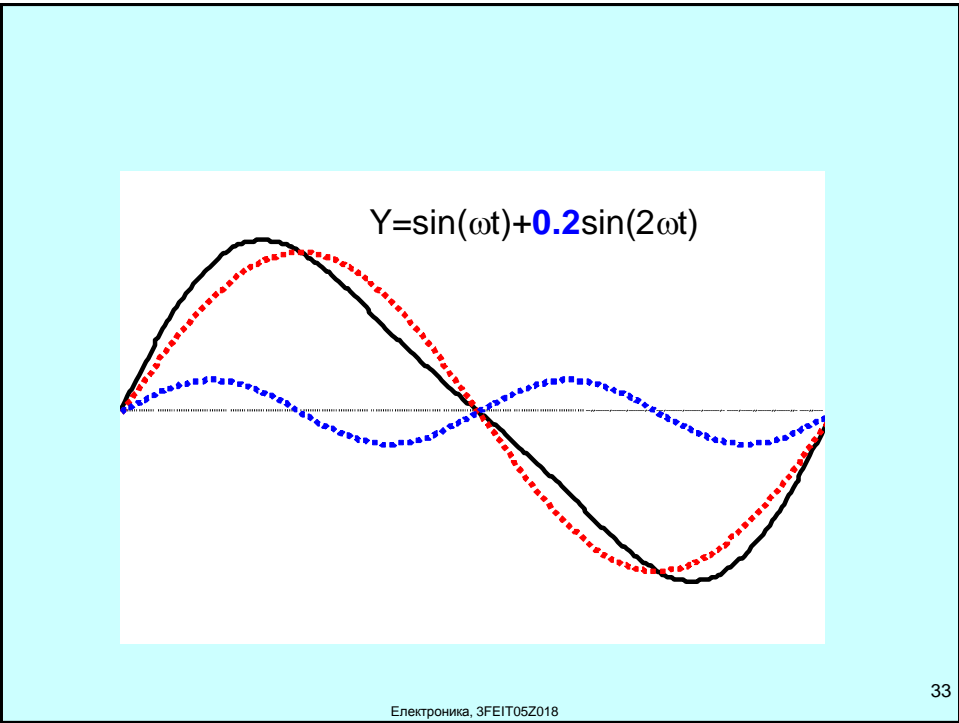
Електроника, 3FEIT05Z018

30

- f_L - Долна гранична фреквенција
- f_H - Горна гранична фреквенција
- $B = f_H - f_L$ - Фреквенциски појас
- Како влијае различното засилување на различни фреквенции?

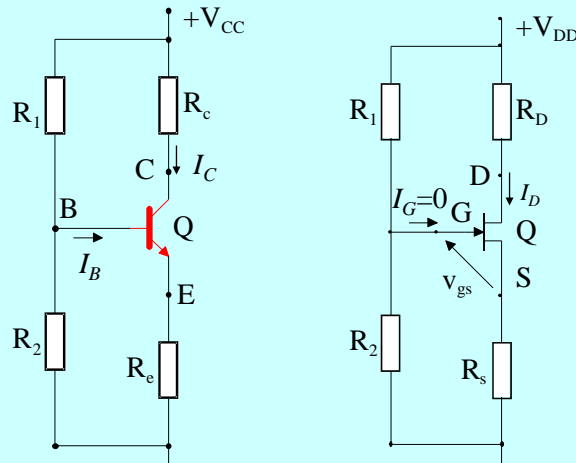
Линеарни изобличувања (информативно)





Поларизација на транзисторите

- Шема со еден извор:

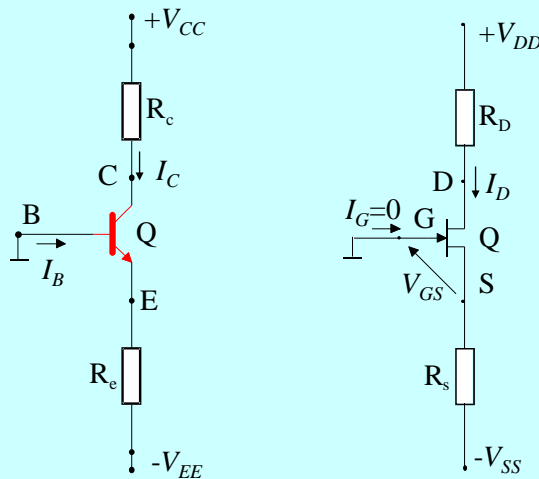


Електроника, 3FEIT05Z018

35

Поларизација на транзисторите

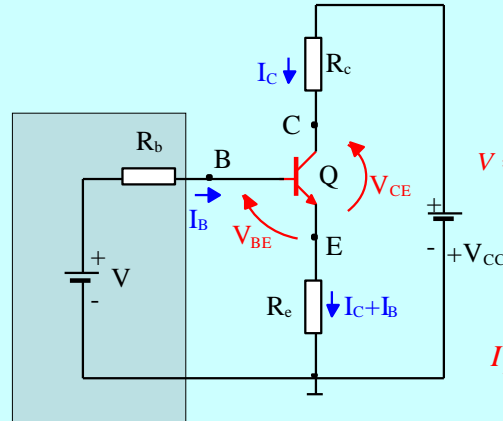
- Шема со два извора (информативно):



Електроника, 3FEIT05Z018

36

Одредување на статичката работна линија (права) и работна точка



Тевененово коло во базата

$$V = \frac{V_{CC} R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_b = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V = R_b I_B + V_{BEON} + (I_B + I_C) R_e$$

$$V_{BEON} = 0,7 \text{ V}$$

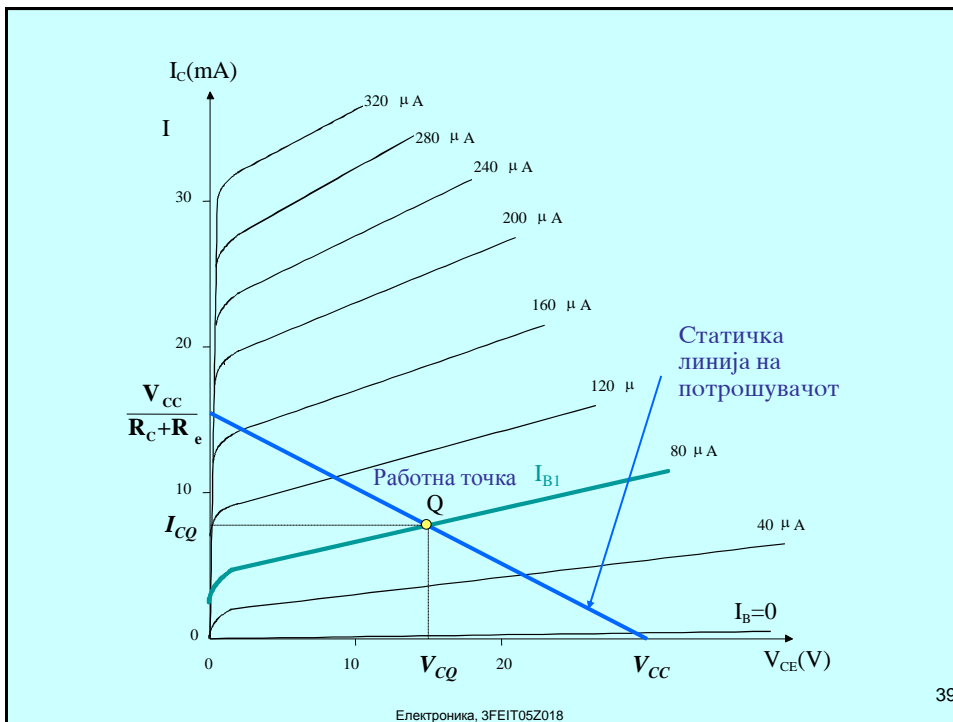
$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$I_B = \frac{V - V_{BEON}}{R_b + (1 + \beta) R_e} = I_{B1}$$

- За колото на колекторот $I_C \gg I_B \approx 0$:

$$V_{CC} = V_{CE} + I_C (R_c + R_e)$$

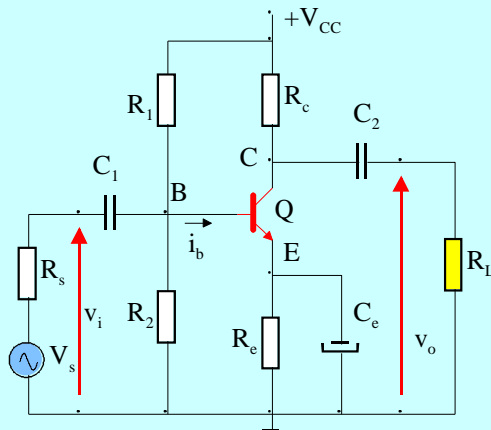
- Ова е **статичка линија на потрошувачот**.



Приклучување на сигналот и потрошувачот

- Преку спрежни кондензатори
- Премостување на заедничката електрода кон маса (со кондензатор)

ЗАСИЛУВАЧ СО ТРАНЗИСТОР ВО СПОЈ СО ЗАЕДНИЧКИ ЕМИТЕР



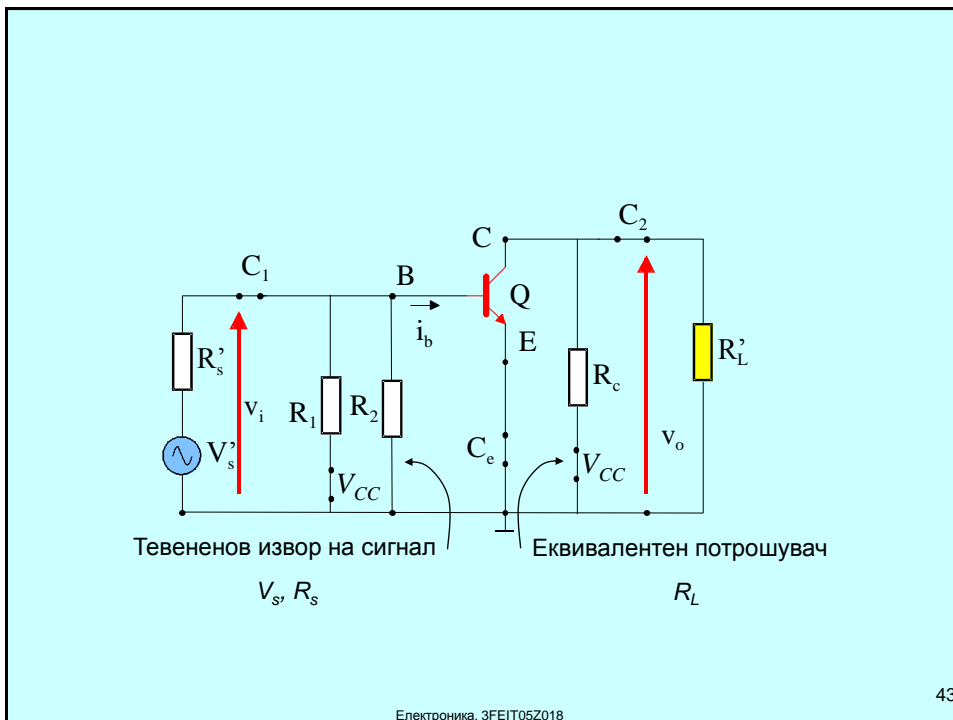
Електроника, 3FEIT05Z018

41

1. За подрачје на средни фреквенции кондензаторите C_1 , C_2 и C_e имаат многу мала импеданција и претставуваат **куса врска**.
2. Батеријата е **куса врска** за наизменичен сигнал.
3. Во режим на мали сигнали транзисторот е **линеарен** елемент.

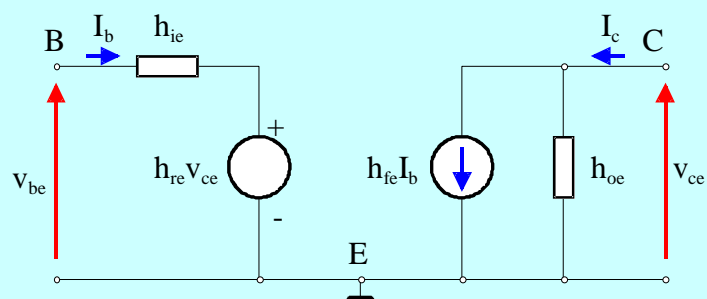
Електроника, 3FEIT05Z018

42



(информативно)

За транзистор во спој со **3Е**, еквивалентен хибриден- h модел со 4 параметри.



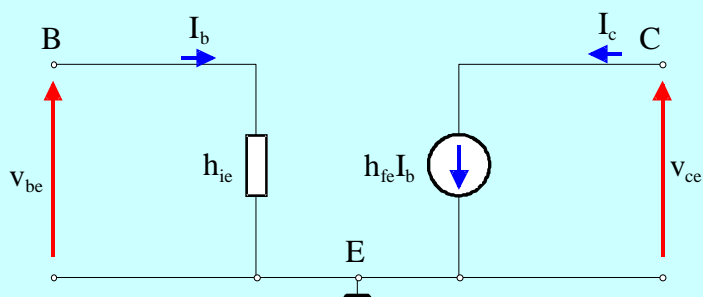
(информативно)

- $h_{ie} = 1\text{k}\Omega$; $h_{re} = 10^{-4}$ (ќе занемариме)
- $h_{fe} = 100$; $h_{oe} = 10^{-25}\mu\text{S}$ (ќе занемариме)

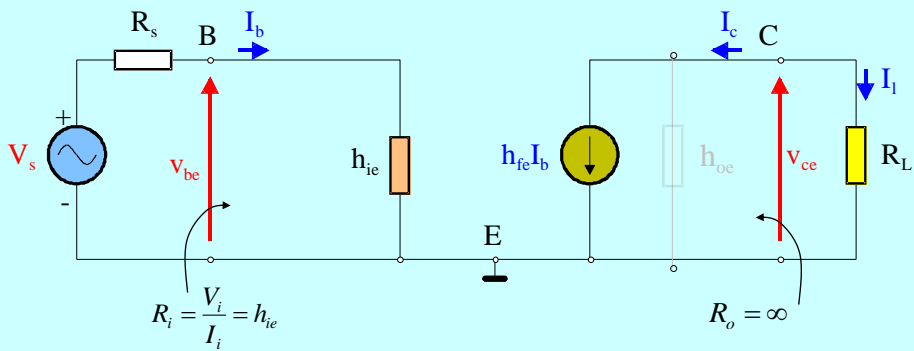
$$V_{be} = h_{ie} I_b + h_{re} V_{ce}$$

$$I_c = h_{fe} I_b + h_{oe} V_{ce}$$

За транзистор во спој со **ЗЕ**, еквивалентен хибриден-h модел со 2 параметри.



Еквивалентна шема на засилувач со
транзистор во спој со ЗЕ за мал
(наизменичен) сигнал



$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{-I_c}{I_b} = -h_{fe}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-I_c R_L}{I_b h_{ie}} = -h_{fe} \frac{R_L}{h_{ie}} = -h_{fe} \frac{R_L}{R_i}$$

Електроника, 3FEIT05Z018

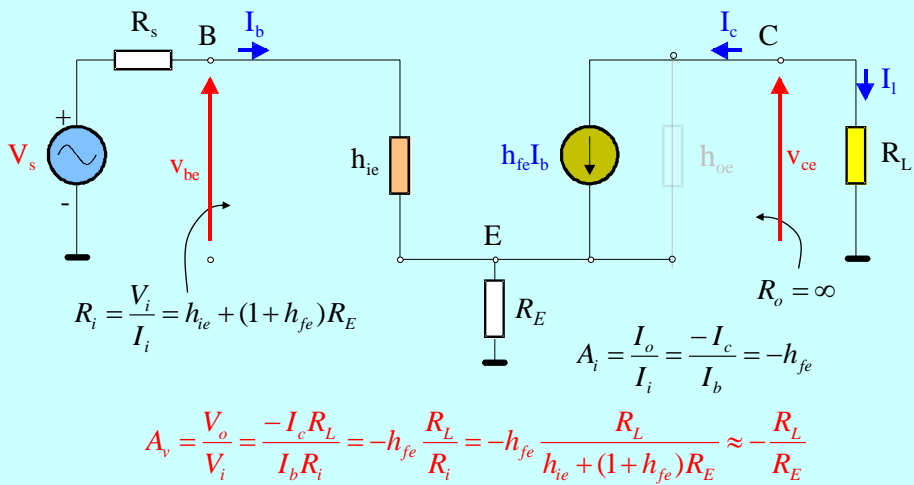
47

- Негативно засилување !!!
- = инвертирање на сигналот
- = промена на фазата за π

Електроника, 3FEIT05Z018

48

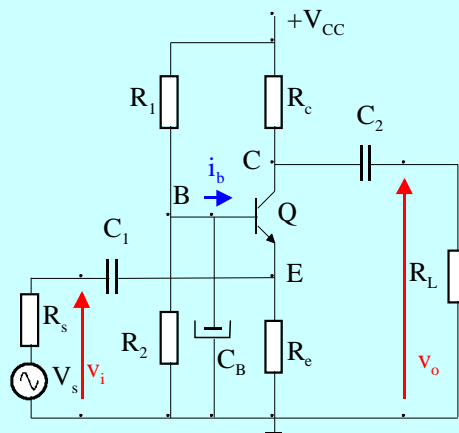
Што ќе се случи ако емитерскиот отпорник не се премости?



Електроника, 3FEIT05Z018

49

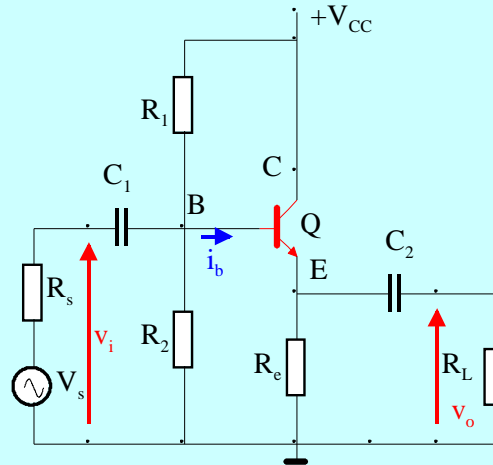
Засилувач со ВЈТ во спој со заедничка база (информативно)



Електроника, 3FEIT05Z018

50

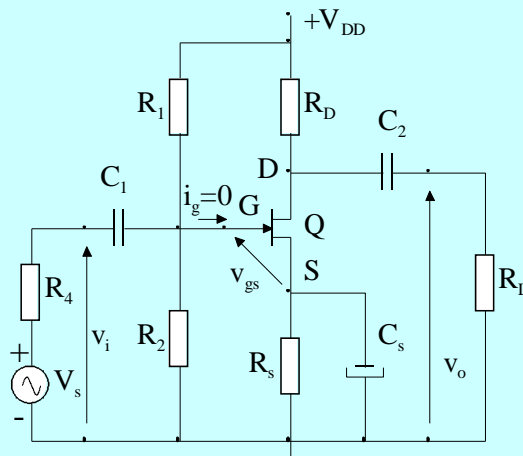
Засилувач со транзистор во спој со заеднички колектор (информативно)



Електроника, 3FEIT05Z018

51

Засилувач со фет (или мосфет) во спој со заеднички сорс (информативно)



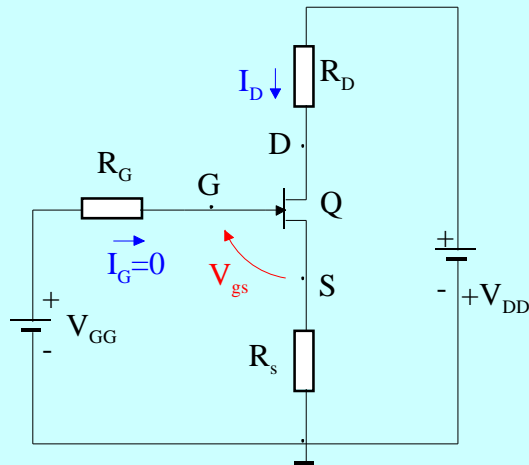
Електроника, 3FEIT05Z018

52

Работна права и точка

$$R_G = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{GG} = V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



Електроника, 3FEIT05Z018

53

Систем равенки за одредување на Q:

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \quad \text{услов: } V_{GS} > V_T$$

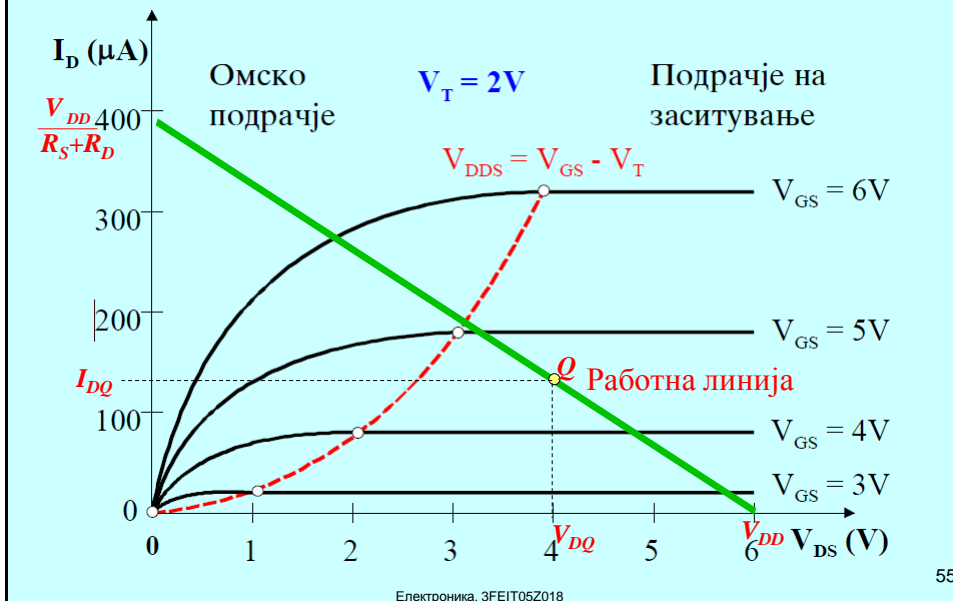
$$V_{DD} = R_D I_D + V_{DS} + R_S I_D \quad \text{проверка: } V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

$$V_{GG} = V_{GS} + R_S I_D$$

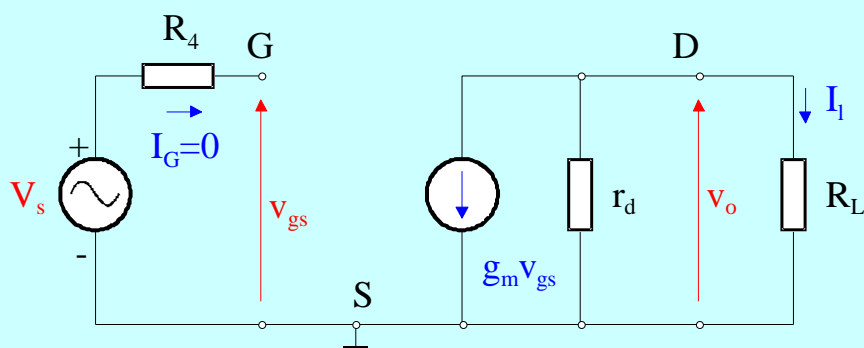
Електроника, 3FEIT05Z018

54

- Треба да биде во ПКС (подрачје на заситување):



За мали сигнали и средни
фреквенции



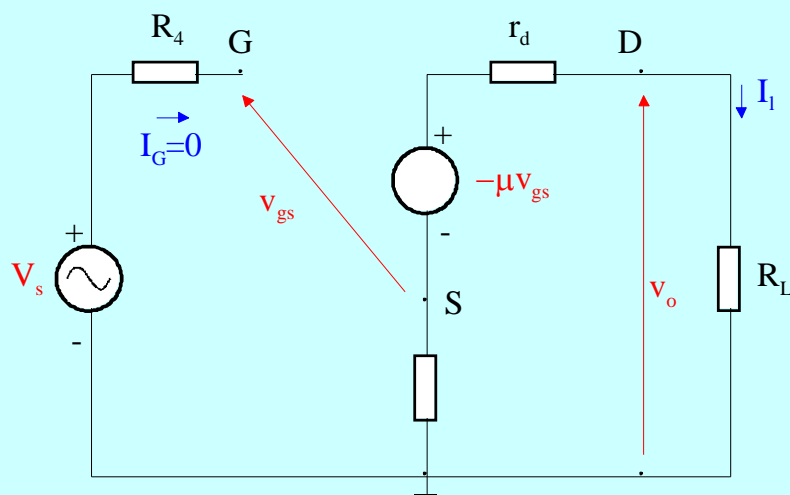
- $g_m = 2 \cdot 10^{-3}(\text{S})$,
 $r_d = 50 \text{ k}\Omega$, $\mu = 100$.

$$A_v = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_o}{V_{gs}} = -g_m \frac{r_d R_L}{r_d + R_L}$$

$$A_v = -\frac{\mu R_L}{r_d + R_L} \cong -g_m R_L \quad g_m r_d = \mu$$

$$R_o = r_d$$

Ако R_s не биде премостен (информативно):

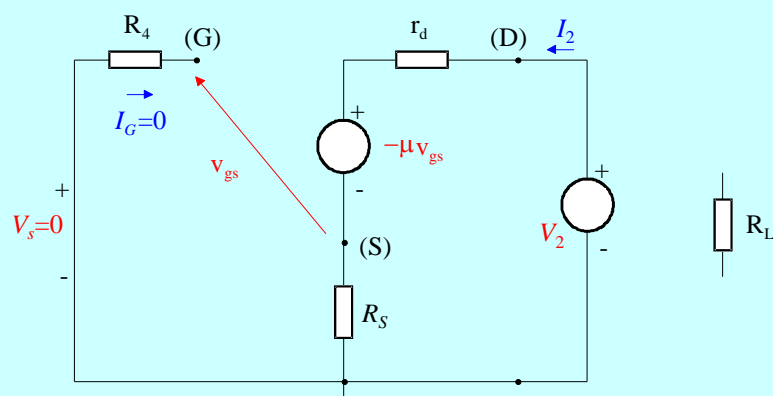


За вежба :

$$A_V = \frac{V_o}{V_s} = -\frac{\mu R_L}{r_d + R_L + (1 + \mu)R_s} \cong -\frac{R_L}{R_s}$$

$$R_o = \frac{V_2}{I_2} = r_d + (1 + \mu)R_s$$

Помошно коло за одредување на R_o :



$$V_{gs} = -V_{(s)} = -R_s I_2 \quad V_2 = r_d I_2 - \mu(-R_s I_2) + R_s I_2$$

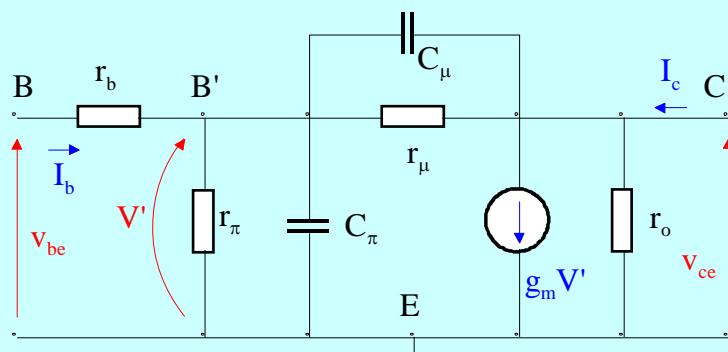
$$R_o = \frac{V_2}{I_2} = r_d + (1 + \mu)R_s$$

Засилувачи на високи фреквенции (информативно)

Електроника, 3FEIT05Z018

61

Хибриден- π модел на транзистор (информативно)



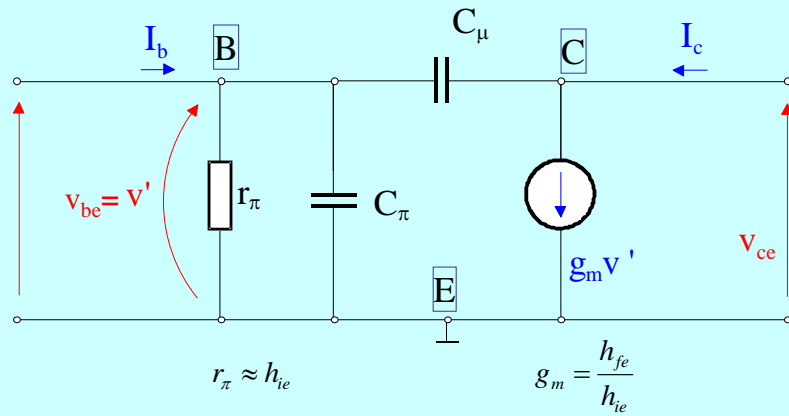
Електроника, 3FEIT05Z018

62

Упростен хибриден- π модел на транзистор

Ова е основниот модел со додадени капацитивности:

- Meѓу база и емитер дифузна капацитивност на рп-спојот
- Meѓу база и колектор бариерна капацитивност на рп-појот



Електроника, 3FEIT05Z018

63

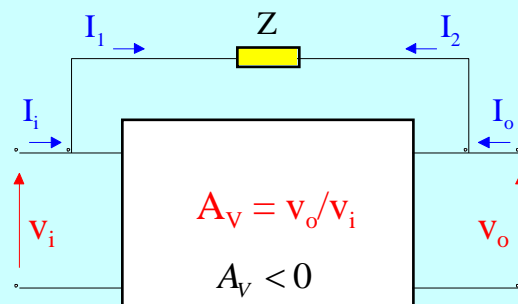
• Типични вредности:

- $r_{\pi} = 0,9 \text{ k}\Omega$.
- $C_{\pi} = 100 \text{ pF}$
- $C_{\mu} = 3 \text{ pF}$
- $g_m = 40 \text{ mS}$

Електроника, 3FEIT05Z018

64

Милеров ефект



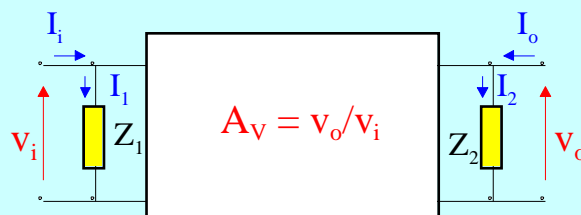
Инвертирачки засилувач !

Електроника, 3FEIT05Z018

65

Пресликани импеданси:

$$Z_1 = Z/(1-A_V) \quad Z_2 = A_V Z/(1-A_V)$$



Електроника, 3FEIT05Z018

66

Доказ:

$$I_1 = \frac{V_i - V_o}{Z} = \frac{V_i}{Z_1} \quad I_2 = \frac{V_o - V_i}{Z} = \frac{V_o}{Z_2}$$

$$Z_1 = \frac{Z}{1 - A_v} \quad Z_2 = \frac{-A_v Z}{1 - A_v}$$

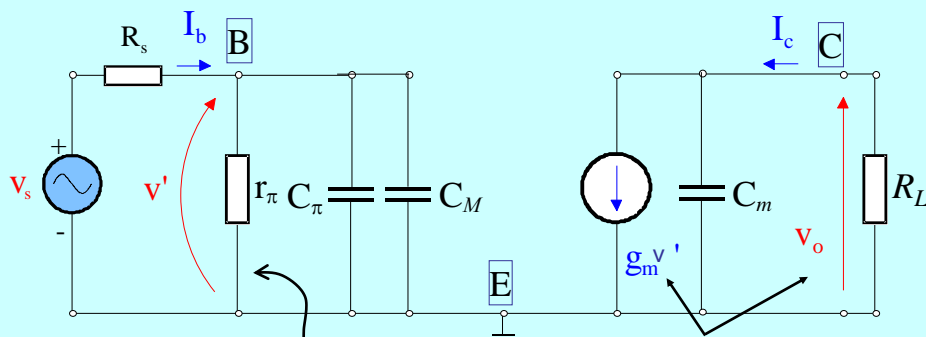
Електроника, 3FEIT05Z018

67

Милеров ефект - примена

$$A_v = A_{v0} = \frac{v_o}{v'} = -g_m R_L \quad (g_m R_L \approx > 10 - 100)$$

$$C_M = C_\mu (1 + g_m R_L) \gg C_\pi \quad C_m = C_\mu \frac{1 + g_m R_L}{g_m R_L} \approx C_\mu$$



Тевененова теорема ...

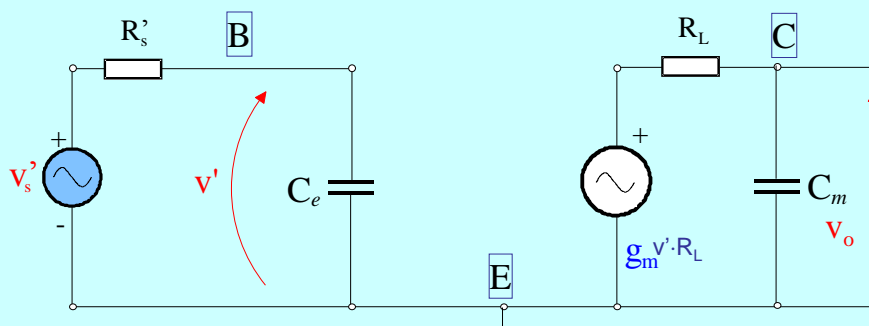
Трансформација струен → напонски ...

Електроника, 3FEIT05Z018

68

Милеров ефект - влијание врз фреквенциската карактеристика

$$C_e = C_\pi + C_M \quad R_s' = \frac{r_\pi R_s}{r_\pi + R_s} \quad v_s' = v_s \frac{r_\pi}{r_\pi + R_s}$$



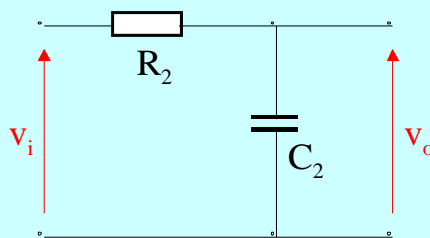
Се појавуваат **две R-C кола**.

Да го испитае нивното поведение...

Електроника, 3FEIT05Z018

69

Фреквенциска карактеристика на RC коло

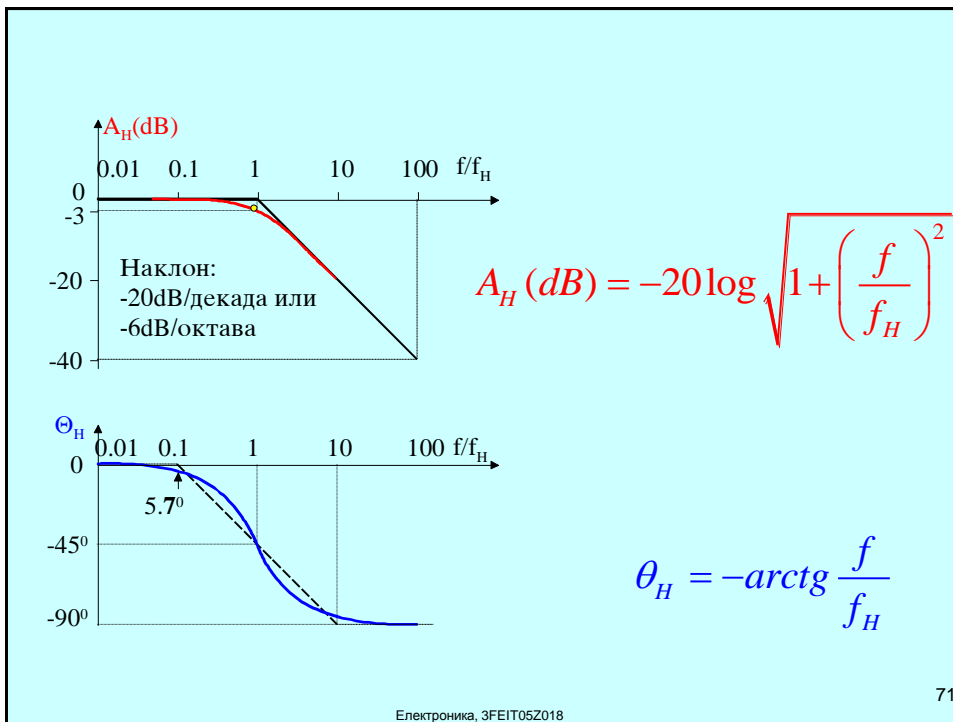


$$A_H = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + j\omega C_2 R_2} = \frac{1}{1 + j\left[\frac{f}{f_H}\right]}$$

Горна гранична фреквенција: $f_H = \frac{1}{2\pi C_2 R_2}$

Електроника, 3FEIT05Z018

70

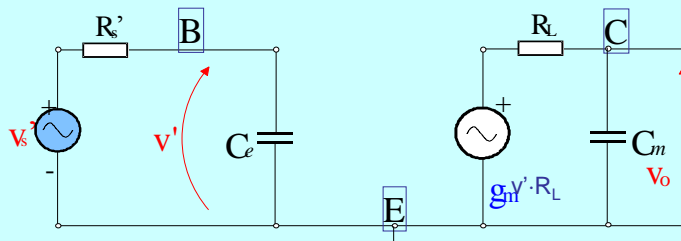


Назад на фреквенциската карактеристика од засилувачот...

$$\frac{V'_s}{V_s} = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_1}} \quad \frac{V_o}{V'} = -g_m R_L \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_2}}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_s' C_e} \quad f_2 = \frac{1}{2\pi R_L C_m} \quad R_L \approx R_s' \Rightarrow f_2 \gg f_1$$

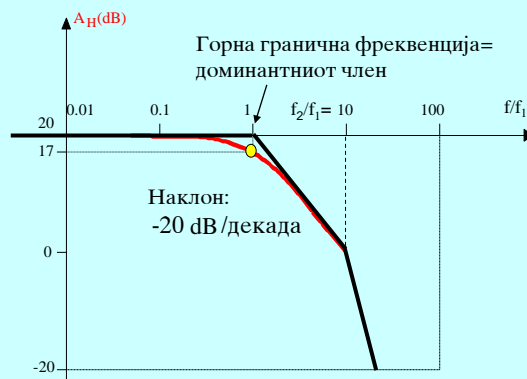
Горната гранична фреквенција е одредена со понискиот член f_1 (доминантен член).



Двете R-C кола се поврзани **каскадно**.

72

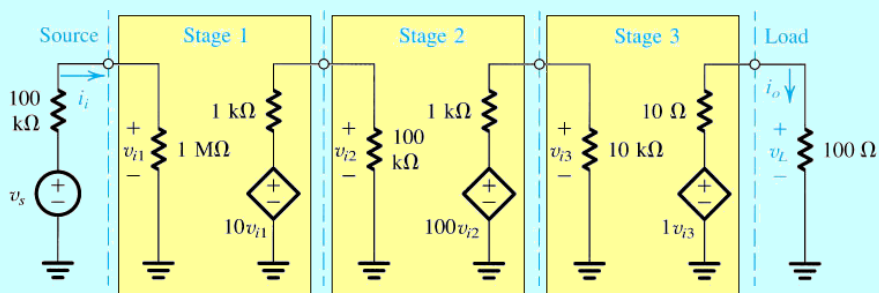
Пример: $f_2=10f_1$, $g_m R_L=10 \Rightarrow A_{H0}(\text{dB})=20$



Електроника, 3FEIT05Z018

73

Каскада од засилувачи (инф.)



$$A_{Vs} = \frac{V_L}{V_S} = \frac{V_L}{V_{o3}} \frac{V_{o3}}{V_{i3}} \frac{V_{i3}}{V_{o2}} \frac{V_{o2}}{V_{i2}} \frac{V_{i2}}{V_{o1}} \frac{V_{o1}}{V_{i1}} \frac{V_{i1}}{V_S}$$

$$A_{Vs} = \frac{100\Omega}{100\Omega + 10\Omega} \cdot 1 \cdot \frac{10k}{10k + 1k} \cdot 100 \cdot \frac{100k}{100k + 1k} \cdot 10 \cdot \frac{1M}{100k + 1M} = 0,91 \cdot 1 \cdot 0,91 \cdot 100 \cdot 0,99 \cdot 10 \cdot 0,91 = 746$$

Електроника, 3FEIT05Z018

74

Горна гранична фреквенција на каскада

$$|A_{V1}| = |A_{V2}| = \dots = |A_{Vn}| = \frac{A_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_H}\right)^2}} \Rightarrow |A_{VN}| = \frac{A_0^n}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_H}\right)^2}\right)^n}$$

Дефиниција: На горната гранична фреквенција засилувањето опаѓа за 3dB (или $\sqrt{2}$ пати)

$$f = f_{HN} \Rightarrow \frac{A_0^n}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{f_{HN}}{f_H}\right)^2}\right)^n} = \frac{A_0^n}{\sqrt{2}} \Rightarrow f_{HN} = f_H \sqrt{\sqrt[n]{2} - 1}$$

Пример:

$$n = 2 \Rightarrow f_{HN} = f_H \sqrt{1,41 - 1} = 0,64 f_H \quad 20kHz \rightarrow 12,8kHz$$

Електроника, 3FEIT05Z018

75

Општ облик на фреквенциска карактеристика (1) - дефиниции

- Извор на сигнал = **екситација**
- Сигнал (напон или струја) што настанува како последица = **одзив**
- **Преносна функција** = сооднос меѓу Лапасовите трансформации на одзивот и екситацијата = сооднос на два полинома од комплексна независна променлива **s (комплексна фреквенција)** со реални коефициенти

Електроника, 3FEIT05Z018

76

Општ облик на фреквенциска карактеристика (2) – нули и полови

$$T(s) = \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0} \quad m \geq n$$

- Гаус покажал дека полиномите можат да се прикажат во т.н. **факторизиран облик**:

$$T(s) = \frac{s^{n_0} (s - z_{n_1})^{n_1} (s - z_{n_2})^{n_2} \dots (s - z_{n_k})^{n_k}}{(s - p_{m_1})^{m_1} (s - p_{m_2})^{m_2} \dots (s - p_{m_l})^{m_l}} \quad \begin{matrix} n_0 + n_1 + \dots + n_k = n \\ m_1 + m_2 + \dots + m_l = m \end{matrix}$$

- Нулите на броителот z_{ni} се т.н. **нули на преносната функција со кратност n_i**
- Нулите на именителот p_{mi} се т.н. **полови на преносната функција со кратност m_i**
- Членот s^{n_0} се нарекува **нула во нулата со кратност n_0** .

Електроника, 3FEIT05Z018

77

Општ облик на фреквенциска карактеристика (3) - $j\omega$ домен

- Во стационарен режим на сигналите исчезнува влијанието на реалниот дел од комплексната фреквенција и таа станува **$s=j\omega$** , а $T(j\omega)$ може да се прикаже како:

$$T(j\omega) = K \frac{(j\omega)^{n_0} \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_{n_1}}\right)^{n_1} \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_{n_2}}\right)^{n_2} \dots \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_{n_k}}\right)^{n_k}}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_{m_1}}\right)^{m_1} \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_{m_2}}\right)^{m_2} \dots \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_{m_l}}\right)^{m_l}} \Rightarrow$$

$$20 \log |T(j\omega)| = 20 \log |K \omega^{n_0}| + \sum_{i=1}^k 20 n_i \log \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{n_i}}\right)^2} - \sum_{j=1}^l 20 m_j \log \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{m_j}}\right)^2}$$

Електроника, 3FEIT05Z018

78

Општ облик на фреквенциска карактеристика (4) – Бодев дијаграм

1. Се одбира почетна точка на фреквенција $\omega_{start} \ll \omega_{ni}, \omega_{mj}$ (најзгодно е ако може $\omega_{start}=1\text{s}^{-1}$) и се пресметува:

$$T_{start} \approx 20\log|T(j\omega_{start})| = 20\log K\omega_{start}^{n_0}$$

2. На ω -оската се означуваат сите нули и полови ω_{ni} , ω_{mj} .
3. Во точката $(\omega_{start}, T_{start})$ се повлекува права под наклон $20n_0\text{dB/dec}$. (Ако нема нула во нулата $n_0=0$ и правата е хоризонтална.)
4. Во секоја наредна точка ω_{ni} **наклонот** на линијата се зголемува за 20dB/dec , а во секоја наредна точка ω_{mj} наклонот се намалува за 20dB/dec .
(Најчесто е тоа $+20\text{dB/dec}$ односно -20dB/dec .)