

Elektronički sklopovi – Frekvencijska karakteristika elektroničkih sklopova

Elektronika – 10. predavanje

- S obzirom na frekvenciju priključenog signala rad elektroničkih sklopova može se podijeliti u tri frekvencijska područja:

1) područje niskih frekvencija

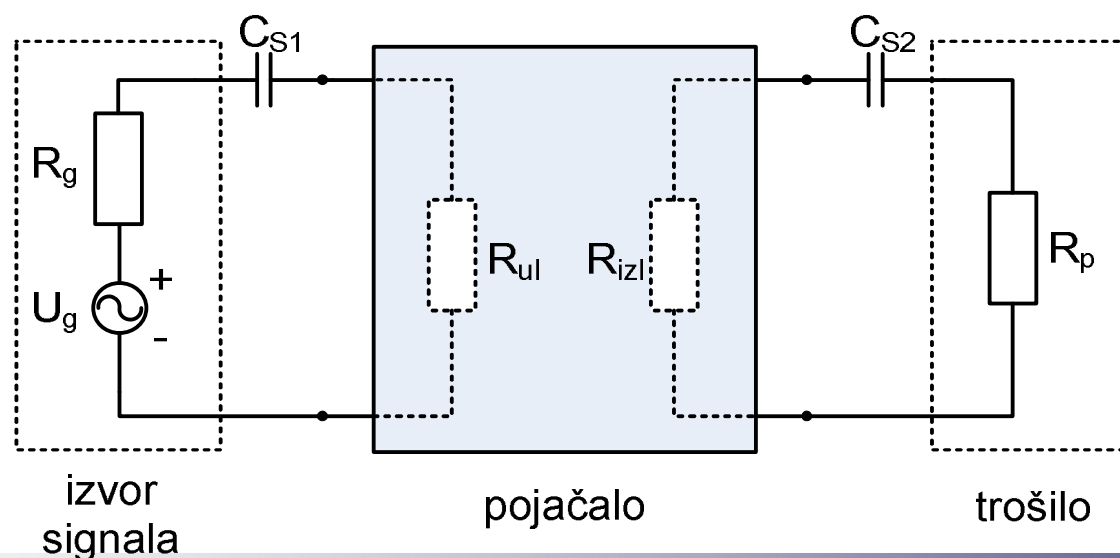
2) područje srednjih frekvencija

3) područje visokih frekvencija



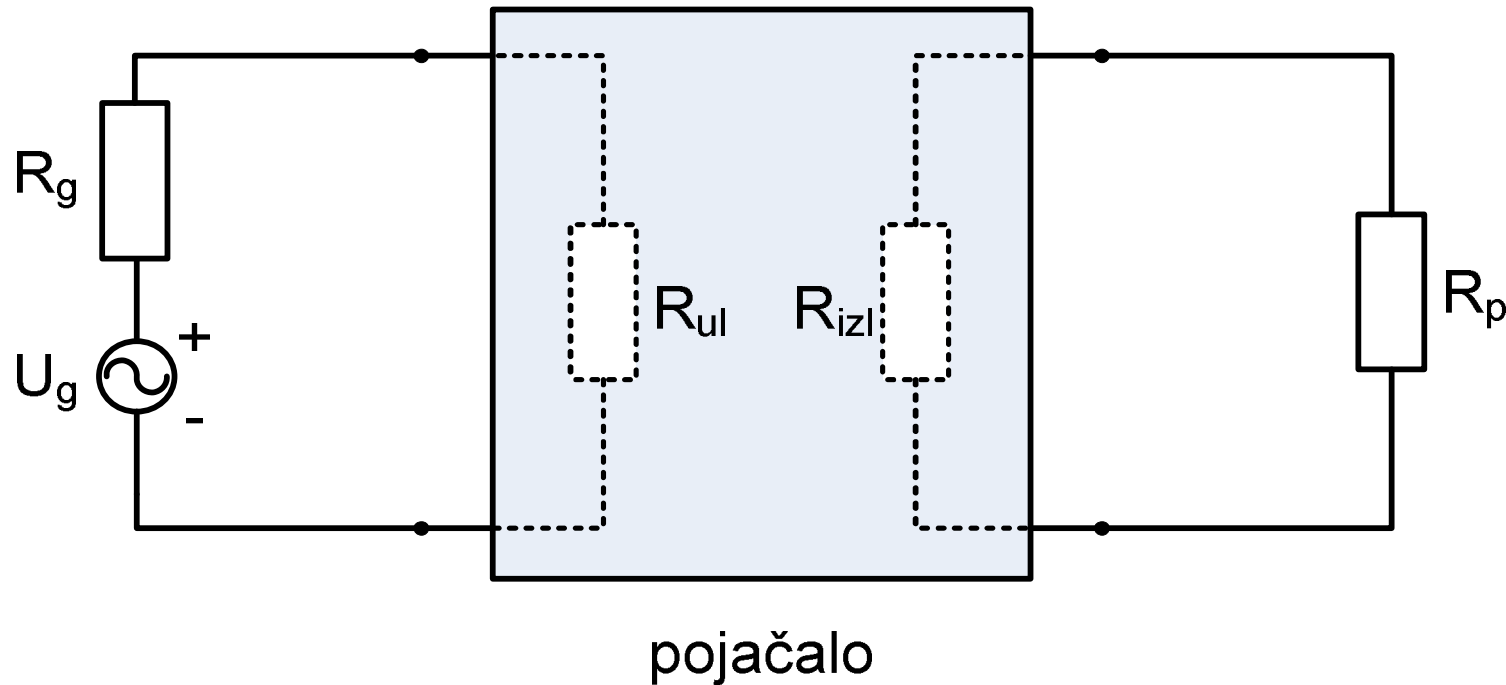
1) Područje niskih frekvencija

- U području niskih frekvencija potrebno je uzeti u obzir pad napona na kondenzatorima koji su serijski vezani u sklopu.
- Na slici je prikazano pojačalo s veznim kondenzatorima C_{S1} i C_{S2} koji u statičkim uvjetima odjeljuju izvor signala i trošilo od sklopa pojačala.



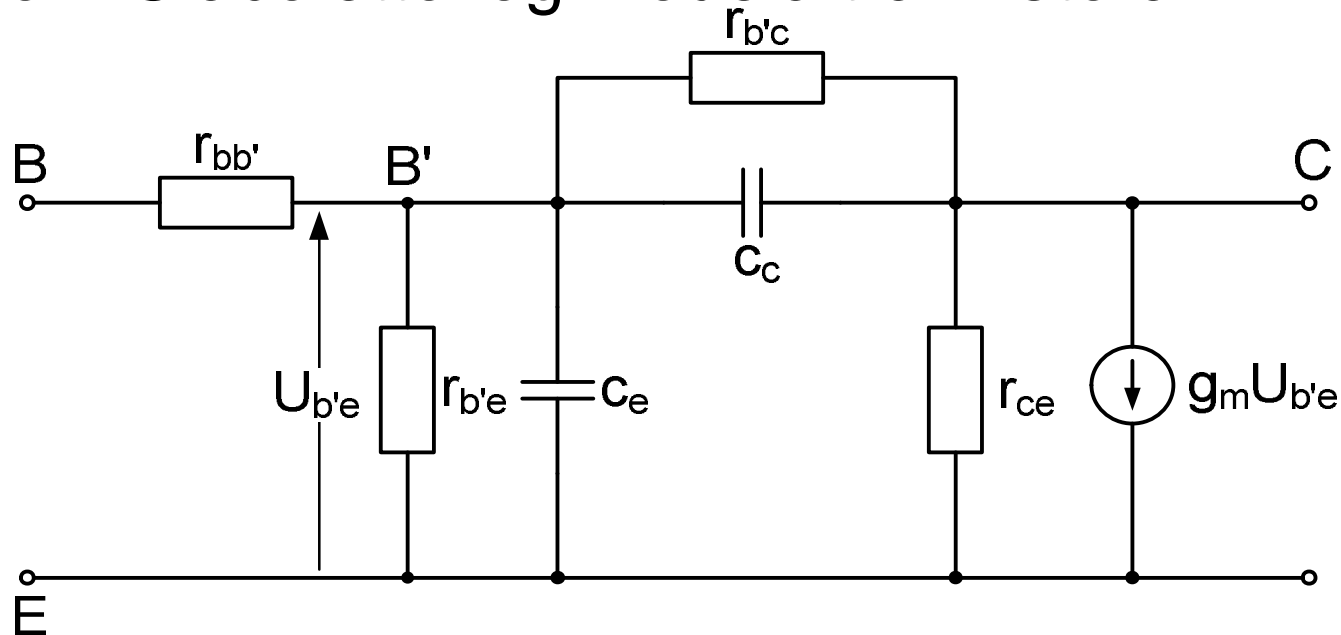
2) Područje srednjih frekvencija

- Mogu se zanemariti utjecaji kapacitivnih komponenata sklopa.
- U dinamičkim uvjetima vezni se kondenzatori u ulaznom i izlaznom krugu pojačala kratko spajaju:



3) Područje visokih frekvencija

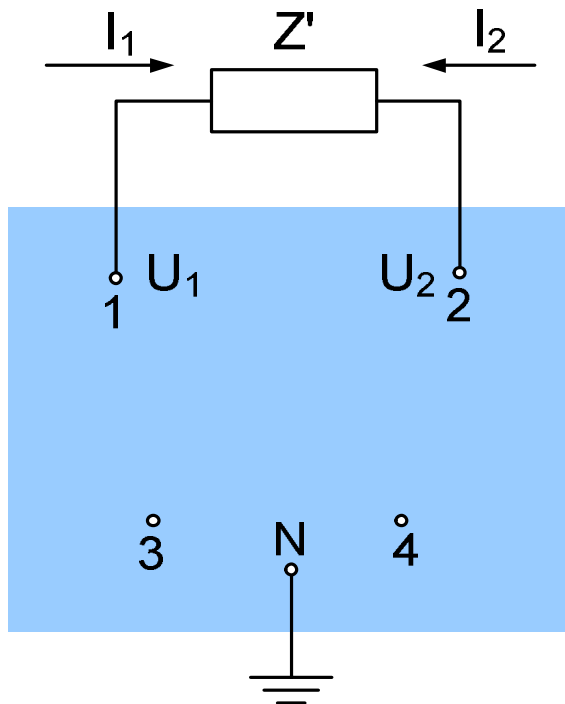
- Pojave na visokim frekvencijama moguće je analizirati primjenom Giacolettovog modela tranzistora:



- Giacolettov model (hibridni π -model) uključuje barijernu i difuzijsku kapacitivnost tranzistora koje su ključne za ponašanje tranzistora na visokim frekvencijama.

Millerov teorem

- Neka je u proizvoljnoj mreži N različitih točaka (1,2,3,...,N) s naponima $U_1, U_2, U_3, \dots, U_N$ gdje je N referentna točka ($U_N=0$).
- Točke 1 i 2 spojene su preko impedancije Z' .



- Pretpostavka: poznat je omjer $U_2/U_1=K$.

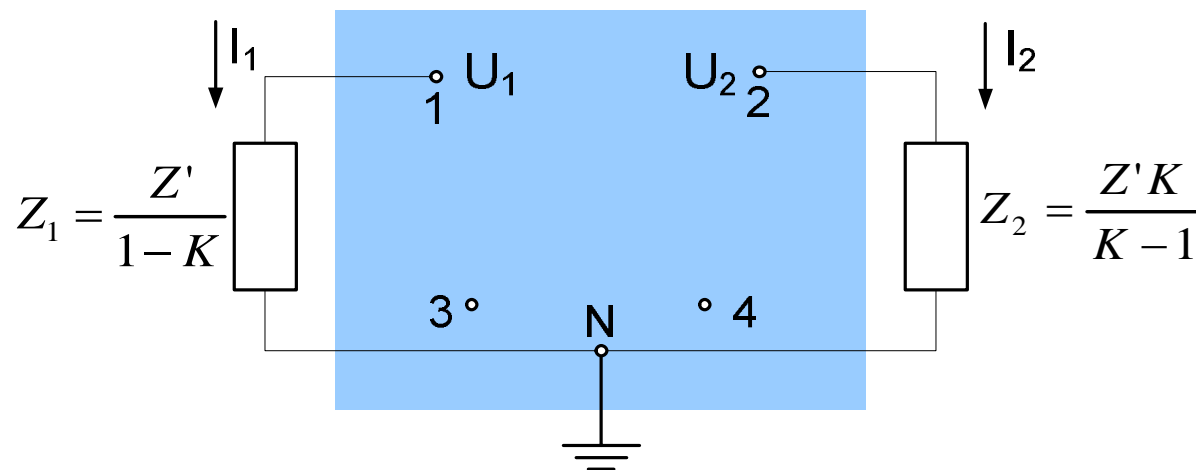
- Struja I_1 jednaka je:

$$I_1 = \frac{U_1 - U_2}{Z'} = \frac{U_1 \cdot (1 - K)}{Z'} = \frac{U_1}{\frac{Z'}{1 - K}} = \frac{U_1}{Z_1}$$

- Dakle, struja I_1 iz točke 1 ostala bi ista kad bi se točka 1 spojila s točkom N preko impedancije $Z_1 = Z'/(1-K)$.
- Na isti način određuje se struja I_2 koja teče iz točke 2:

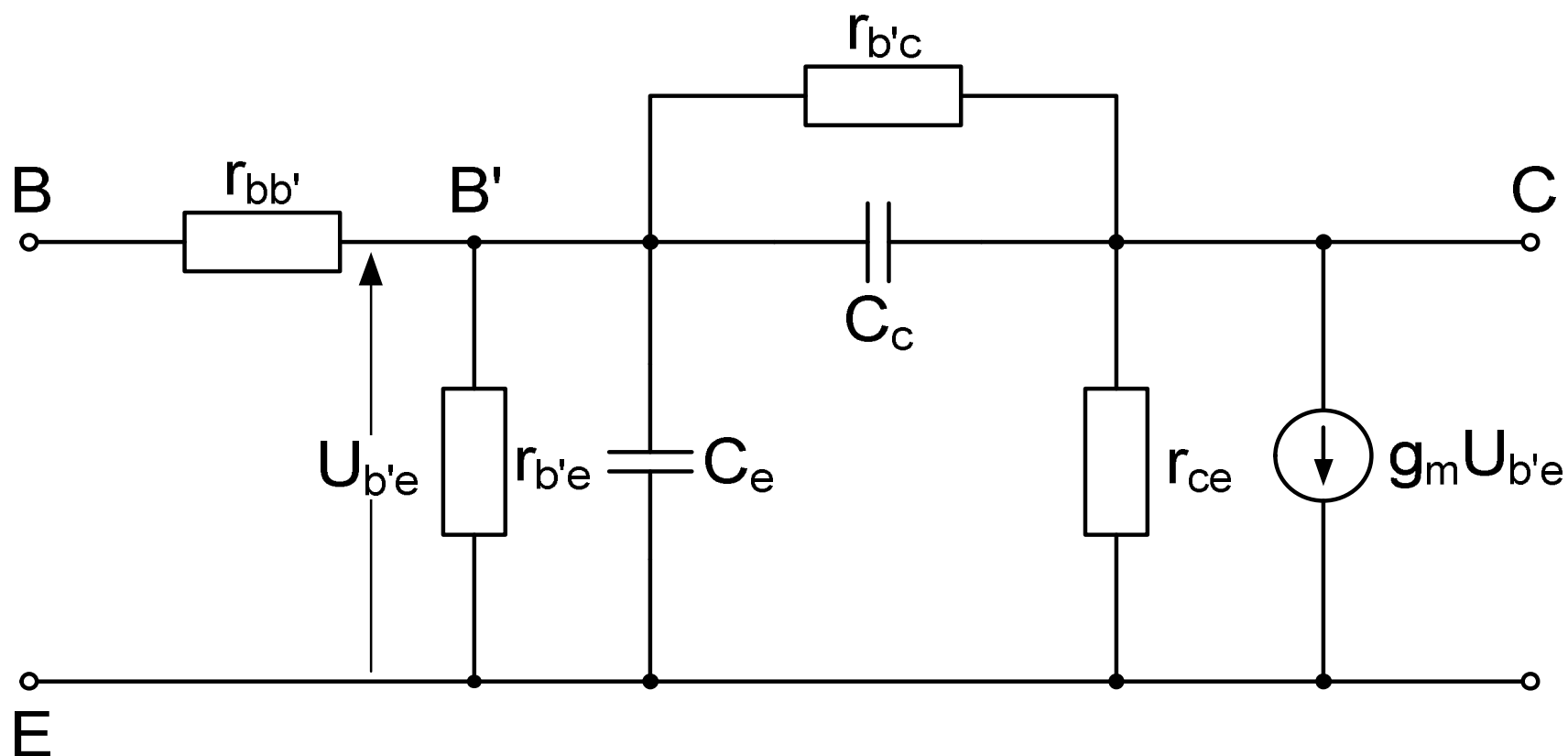
$$I_2 = \frac{U_2 - U_1}{Z'} = \frac{U_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right)}{Z'} = \frac{U_2}{Z' \cdot \frac{K}{K-1}} = \frac{U_2}{Z_2}$$

- Struja I_2 iz točke 2 ostala bi ista ako se točka 2 spoji s točkom N preko impedancije $Z_2 = Z'K/(K-1)$.
- Ekvivalentna mreža:



Primjena Millerovog teorema na Giacolettov model

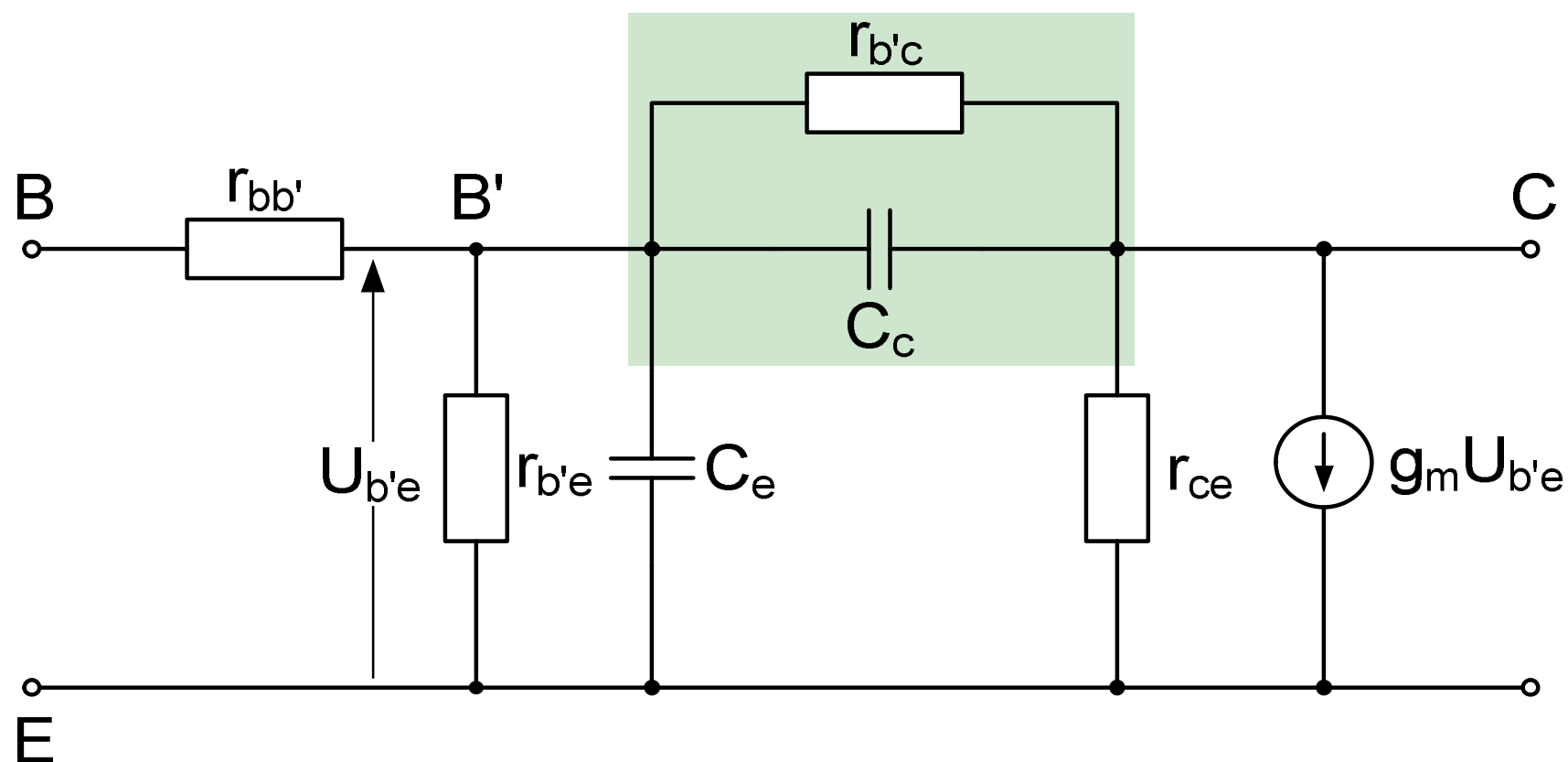
■ Giacolettov model:



Primjena Millerovog teorema na Giacolettov model

■ Giacolettov model:

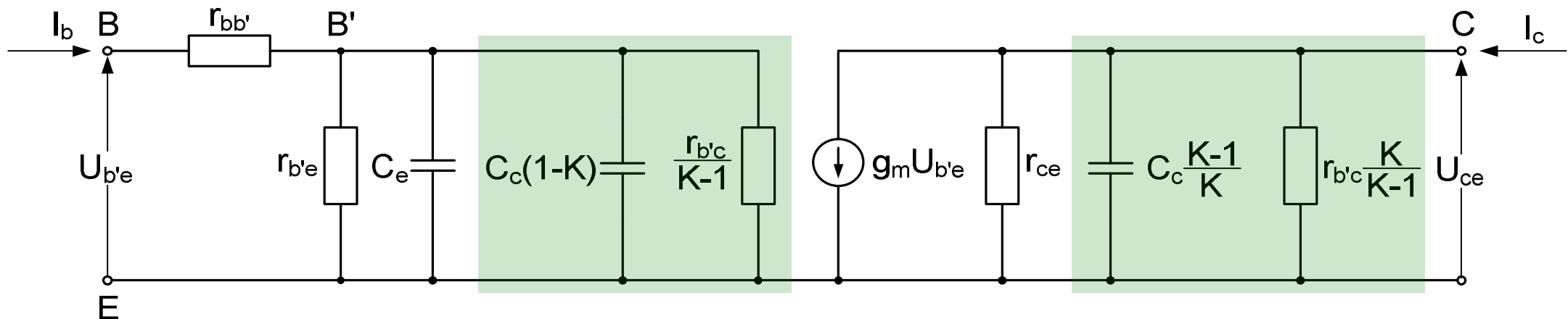
Millerov teorem



Primjena Millerovog teorema na Giacolettov model

■ Giacolettov model:

Millerov teorem

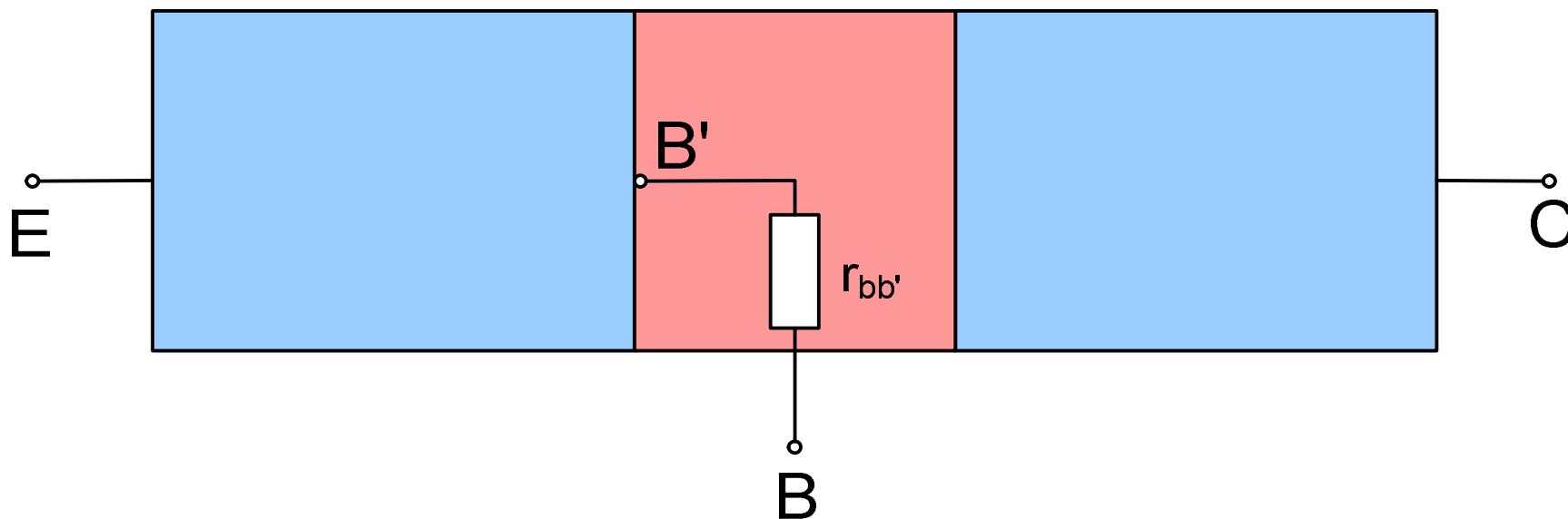


gdje je:

$$K = \frac{U_{ce}}{U_{b'e}}$$

Definicija parametara Giacolettovog modela

- Otpor $r_{bb'}$ je raspodijeljeni serijski otpor između vanjskog priključka baze B i aktivnog područja baze ispod emitera (tzv. interna baza B'), prema slici:



- Tipična vrijednost otpora $r_{bb'}$ iznosi od 10 do 100 Ω .

- Otpor $r_{b'e}$ je dinamički otpor pn-spoja između interne baze i emitera. Tipična vrijednost ovog otpora iznosi 1 k Ω .
- Kapacitet C_e je ukupni kapacitet između interne baze i emitera. Taj kapacitet jednak je sumi difuzijskog i barijernog kapaciteta, a tipična mu je vrijednost od 10-100 pF.
- Otpor $r_{b'c}$ nastaje kao posljedica Earlyjeva efekta, a tipična vrijednost mu je reda veličine 1 M Ω .
- Kapacitet C_c je tranzitni (barijerni) kapacitet pn spoja kolektor-baza koji je u normalnim aktivnim uvjetima rada tranzistora nepropusno polariziran. Tipičan iznos je reda veličine 1 pF.

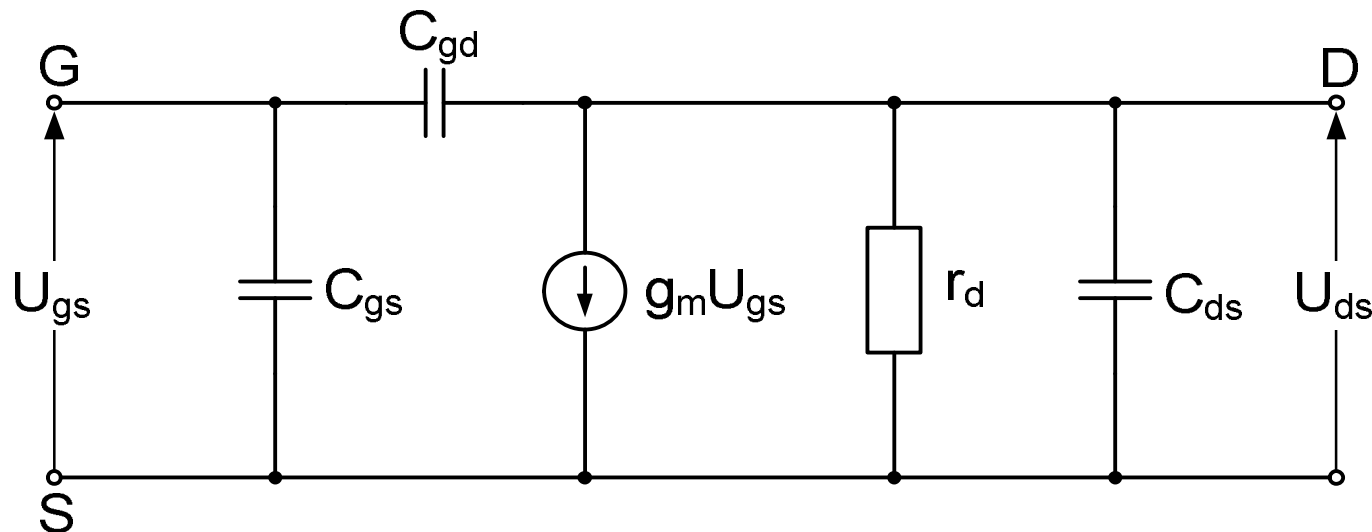


- Otpor r_{ce} je dinamički otpor između kolektora i emitera tranzistora. Tipičan iznos tog otpora je nekoliko desetaka $k\Omega$.
- Strujni izvor $g_m U_{b'e}$ određen je strminom tranzistora u odgovarajućoj radnoj točki i naponom između interne baze i emitera.



Nadomjesni sklop unipolarnog tranzistora u području visokih frekvencija

- Model unipolarnog tranzistora u području visokih frekvencija prikazan je na slici:



Definicija parametara prikazanog modela

- Kapacitet C_{gs} je parazitni kapacitet između vrata i uvoda.
- Kapacitet C_{gd} je parazitni kapacitet između vrata i odvoda.
- Kapacitet C_{ds} je parazitni kapacitet odvoda prema uvodu.
- Parametar r_d je dinamički otpor u odabranoj radnoj točki tranzistora. Strujni izvor $g_m U_{gs}$ određen je strminom tranzistora u odabranoj radnoj točki i naponom između vrata i uvoda, U_{gs} .



Određivanje parametara Giacolettovog modela

- Na temelju definirane statičke radne točke tranzistora i zadanih vrijednosti hibridnih parametara moguće je odrediti parametre Giacolettovog modela putem jednadžbi:

$$g_m = \frac{I_{CQ}}{U_T} \frac{\text{(struja } I_C \text{ u statičkoj radnoj točki)}}{\text{(naponski temperaturni ekvivalent)}}$$

$$r_{b'e} = \frac{h_{fe}}{g_m}$$

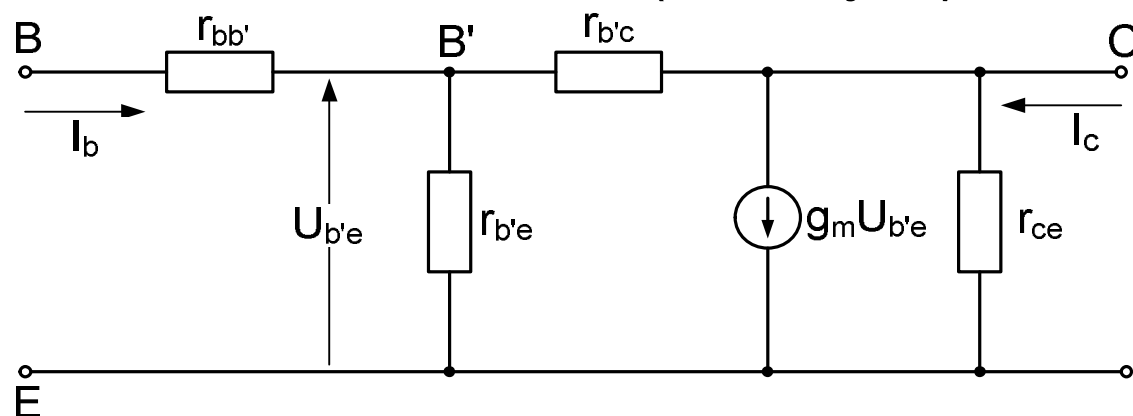
$$r_{b'b} = h_{ie} - r_{b'e}$$

$$r_{b'c} = \frac{r_{b'e}}{h_{re}}$$

$$\frac{1}{r_{ce}} = h_{oe} - \frac{1 + h_{fe}}{r_{b'c}}$$



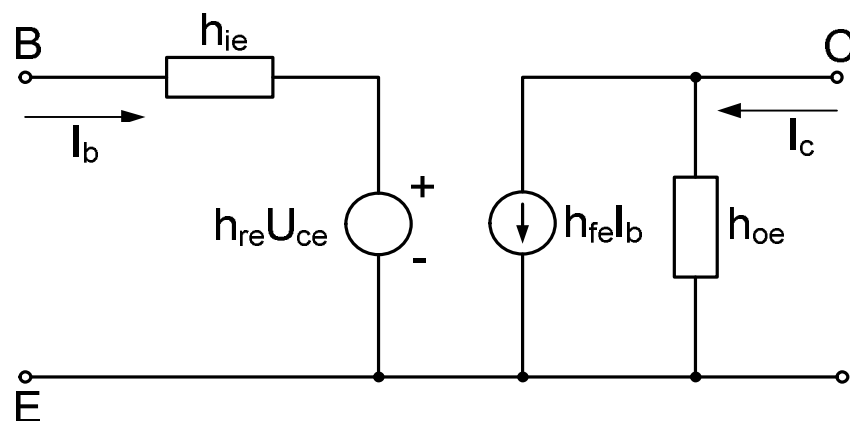
■ π -model na niskim (srednjim) frekvencijama:



$$g_m = \frac{I_{CQ}}{U_T}$$

$$U_T = \frac{T}{11605}$$

■ h-model:



$$U_{b'e} \approx I_b \cdot r_{b'e} \quad (\text{jer je } r_{b'c} \gg r_{b'e})$$

$$I_c = g_m \cdot U_{b'e} \approx g_m \cdot I_b \cdot r_{b'e}$$

(kolektorska struja kratkog spoja)

$$h_{fe} = \left. \frac{I_c}{I_b} \right|_{U_{ce}=0} = g_m \cdot r_{b'e}$$

$$r_{b'e} = \frac{h_{fe}}{g_m}$$



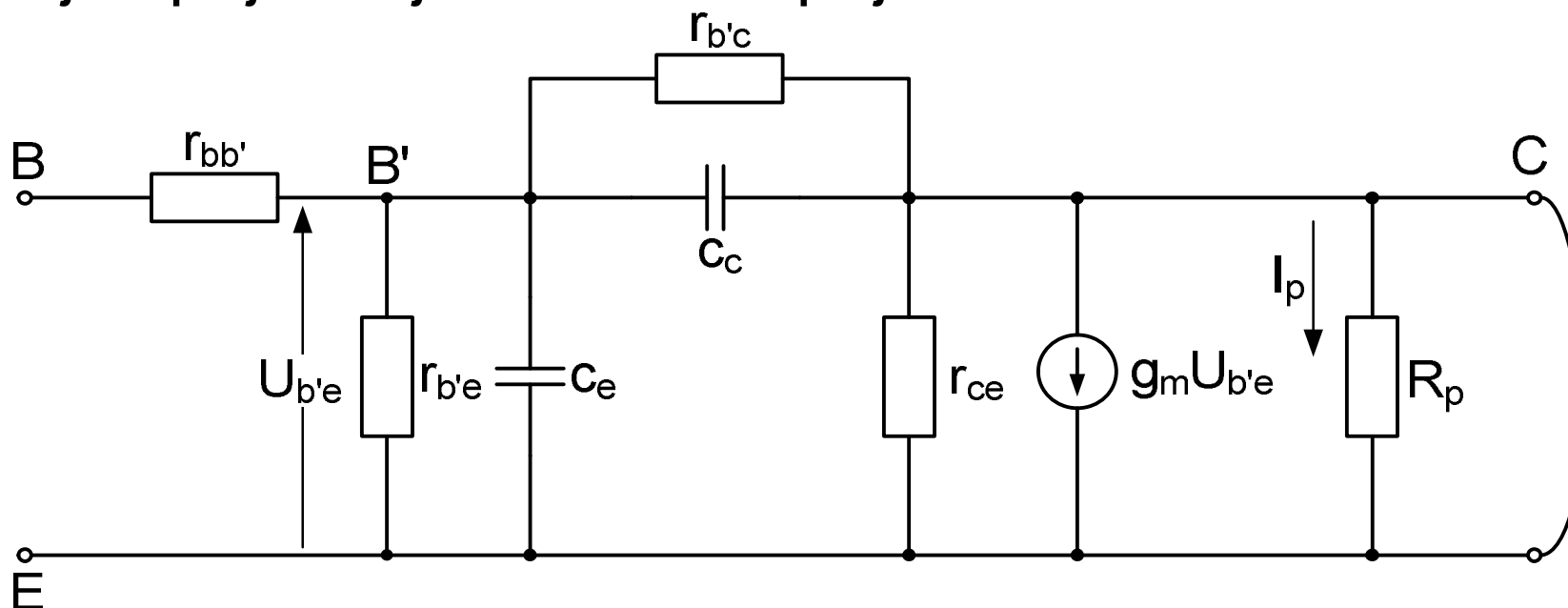
- Ulazni otpor pri $U_{ce}=0$ je h_{ie} u h-modelu, a u π -modelu je $r_{bb'} + (r_{b'e} \parallel r_{b'c} \approx r_{b'e})$ pa je:

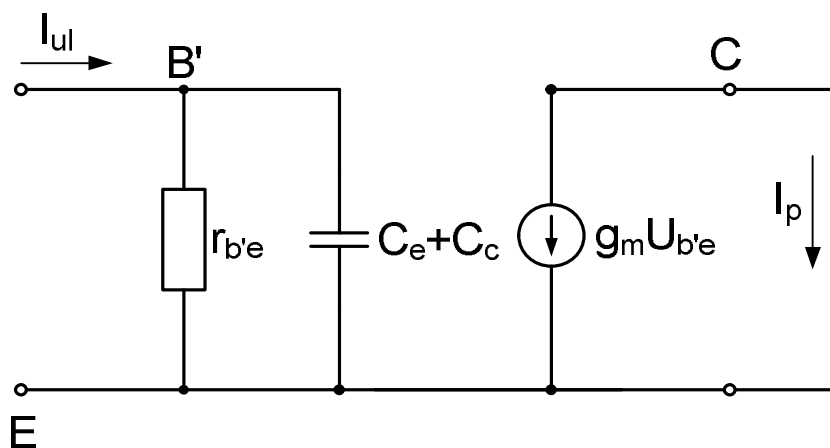
$$h_{ie} = r_{bb'} + r_{b'e}$$

odnosno:

$$r_{bb'} = h_{ie} - r_{b'e}$$

- Strujno pojačanje uz kratkospojeni izlaz:





$$I_p = -g_m U_{b'e}$$

$$U_{b'e} = \frac{I_{ul}}{g_{b'e} + j\omega \cdot (C_e + C_c)}$$

$$g_{b'e} = \frac{1}{r_{b'e}}$$

■ Strujno pojačanje:

$$A_i = \frac{I_p}{I_{ul}} = \frac{-g_m}{g_{b'e} + j\omega \cdot (C_e + C_c)}$$

$$|A_i| = \frac{h_{fe}}{\left[1 + (f/f_g)^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$f_g = \frac{g_{b'e}}{2\pi \cdot (C_e + C_c)} = \frac{1}{h_{fe}} \cdot \frac{g_m}{2\pi \cdot (C_e + C_c)}$$

■ Parametar f_T :

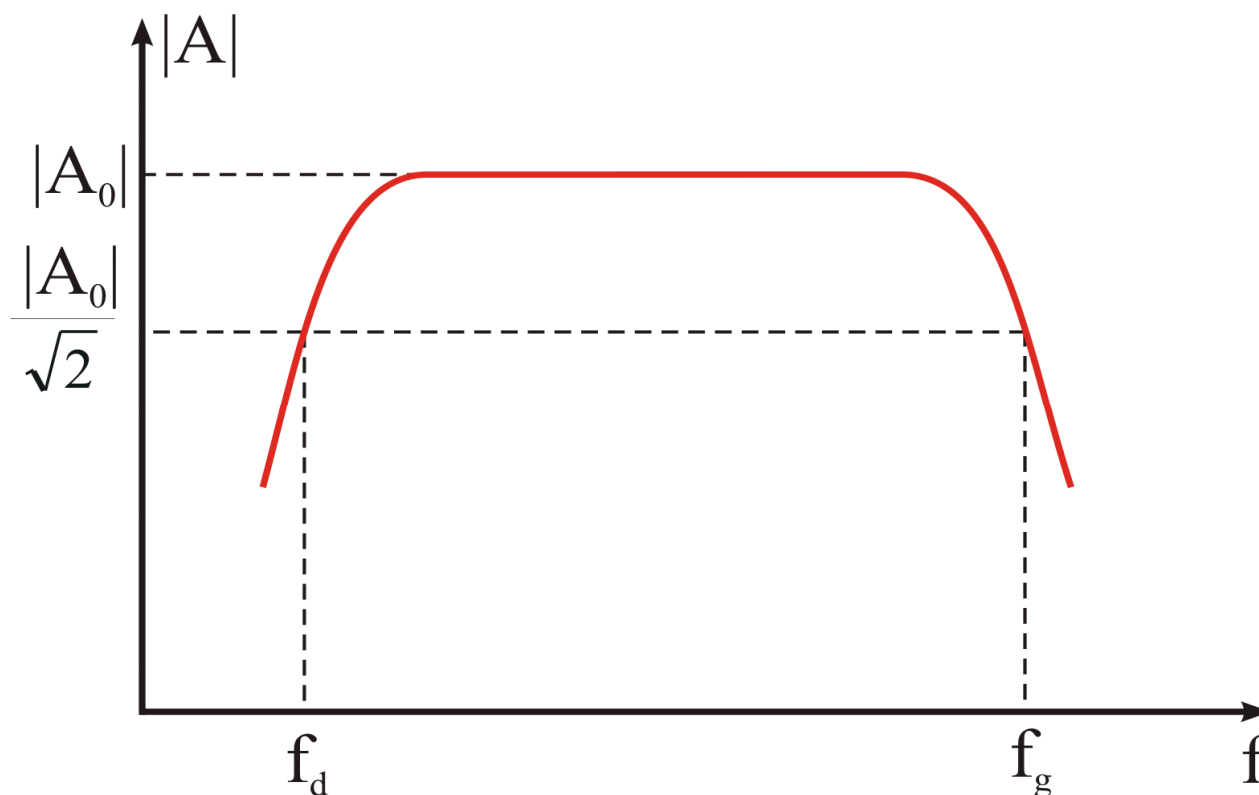
Definiran je kao frekvencija na kojoj strujno pojačanje za kratkospojeni izlaz spoja zajedničkog emitera ima jediničnu

vrijednost:
$$f_T = h_{fe} \cdot f_g = \frac{g_m}{2\pi \cdot (C_e + C_c)} \approx \frac{g_m}{2\pi \cdot C_e}$$



Frekvencijska karakteristika pojačala

- Frekvencijska karakteristika pojačala – ovisnost pojačanja o frekvenciji



- U području srednjih frekvencija pojačanje ne ovisi o frekvenciji (referentno pojačanje A_0).
- U točkama u kojima je vrijednost pojačanja $A_0/\sqrt{2}$ definirane su dvije karakteristične frekvencije: gornja i donja granična frekvencija.
- Postojanje donje granične frekvencije uvjetovano je konstrukcijom sklopa (vezni kondenzatori na ulazu i izlazu pojačala).
- Gornja granična frekvencija je rezultat fizikalnih pojava u radu tranzistora.
- Gornja granična frekvencija može se povećati izborom odgovarajućeg tranzistora i konstrukcijom sklopa, ali je njen iznos uvijek konačan.
- Frekvencijska karakteristika idealnog pojačala bila bi horizontalan pravac.

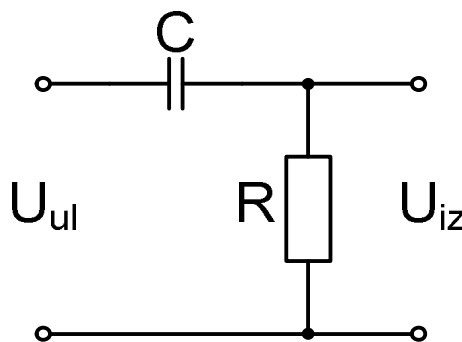


- Realna pojačala uvijek unose određeni fazni pomak između izlaznog i ulaznog signala. Taj pomak je posljedica konačnog vremena nabijanja i pražnjenja barijernih kapaciteta, konačnog vremena proleta nosilaca naboja kroz tranzistor i djelovanja vremenskih konstanti pasivnih dijelova pojačala.



Bodeov prikaz frekvencijskih karakteristika

- Grafički prikaz: pojačanje (izraženo u dB) i fazni kut kao funkcija frekvencije (logaritamsko mjerilo) – **Bodeov prikaz**.
- Prikaz pojačanja u ovisnosti o frekvenciji – amplitudna karakteristika.
- Prikaz faznog kuta u ovisnosti o frekvenciji – fazna karakteristika.
- **Primjer**: Jednostavna pasivna RC-mreža



- Prijenosna funkcija prikazanog RC-člana je:

$$A = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{R - j\frac{1}{\omega C}} = \frac{1}{1 - j\frac{f_d}{f}}, \quad (1)$$

gdje je:

$$f_d = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2)$$

- Prijenosna funkcija može se prikazati u obliku:

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_d}{f}\right)^2}} \exp\left[j \arctg\left(\frac{f_d}{f}\right)\right] \quad (3)$$

- odnosno:

$$A = |A| \exp[j \phi], \quad (4)$$

gdje je $|A|$ apsolutni iznos ili amplituda određena relacijom:

$$|A| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_d}{f}\right)^2}}, \quad (5)$$

a ϕ fazni kut je:

$$\phi = \arctg\left(\frac{f_d}{f}\right) \quad (6)$$

- U skladu s relacijom (5), pri $f=f_d$, amplituda stoga je f_d donja granična frekvencija. $|A| = \frac{1}{\sqrt{2}}$
- Pri frekvenciji $f \gg f_d$, $|A|=1$.



- Za Bodeov prikaz potrebno je relaciju (5) izraziti u decibelima:

$$|A|[\text{dB}] = -20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{f_d}{f}\right)^2} \quad (7)$$

- Kada je $f \ll f_d$ može se zanemariti jedinica pod korijenom u izrazu (7) te je:

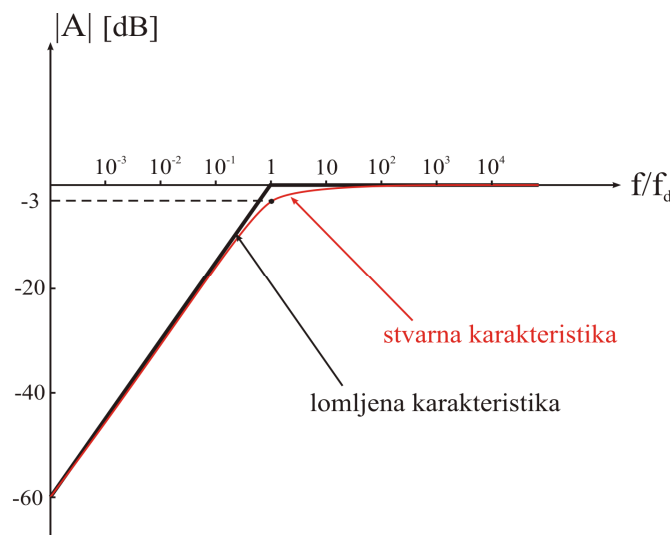
$$|A|[\text{dB}] = -20 \log \left(\frac{f_d}{f}\right) \quad (8)$$

- Kada je $f \gg f_d$ može se zanemariti $(f_d/f)^2$ pa je:

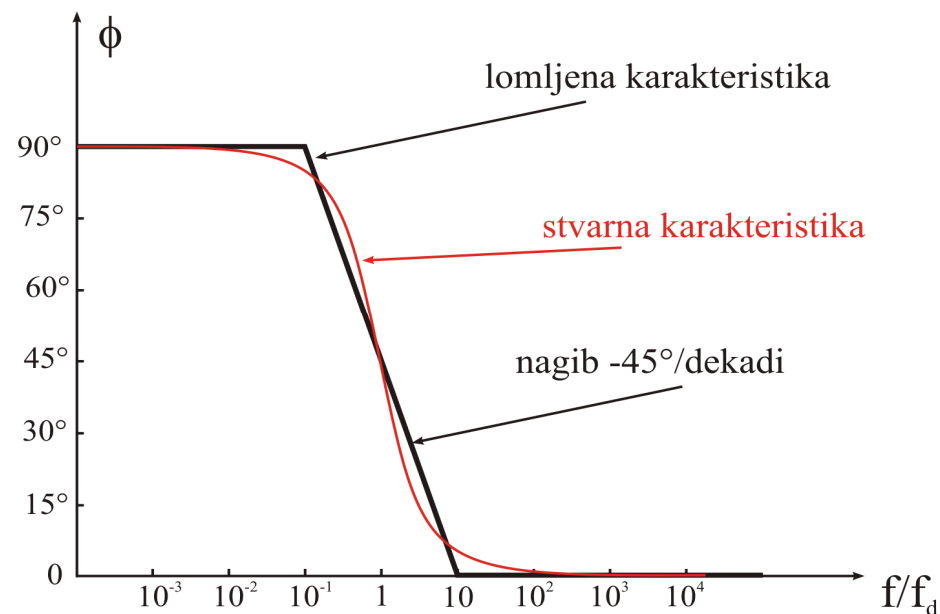
$$|A|[\text{dB}] = 0 \quad (9)$$

- Na frekvenciji $f=f_d$ $|A|=-3$ dB.

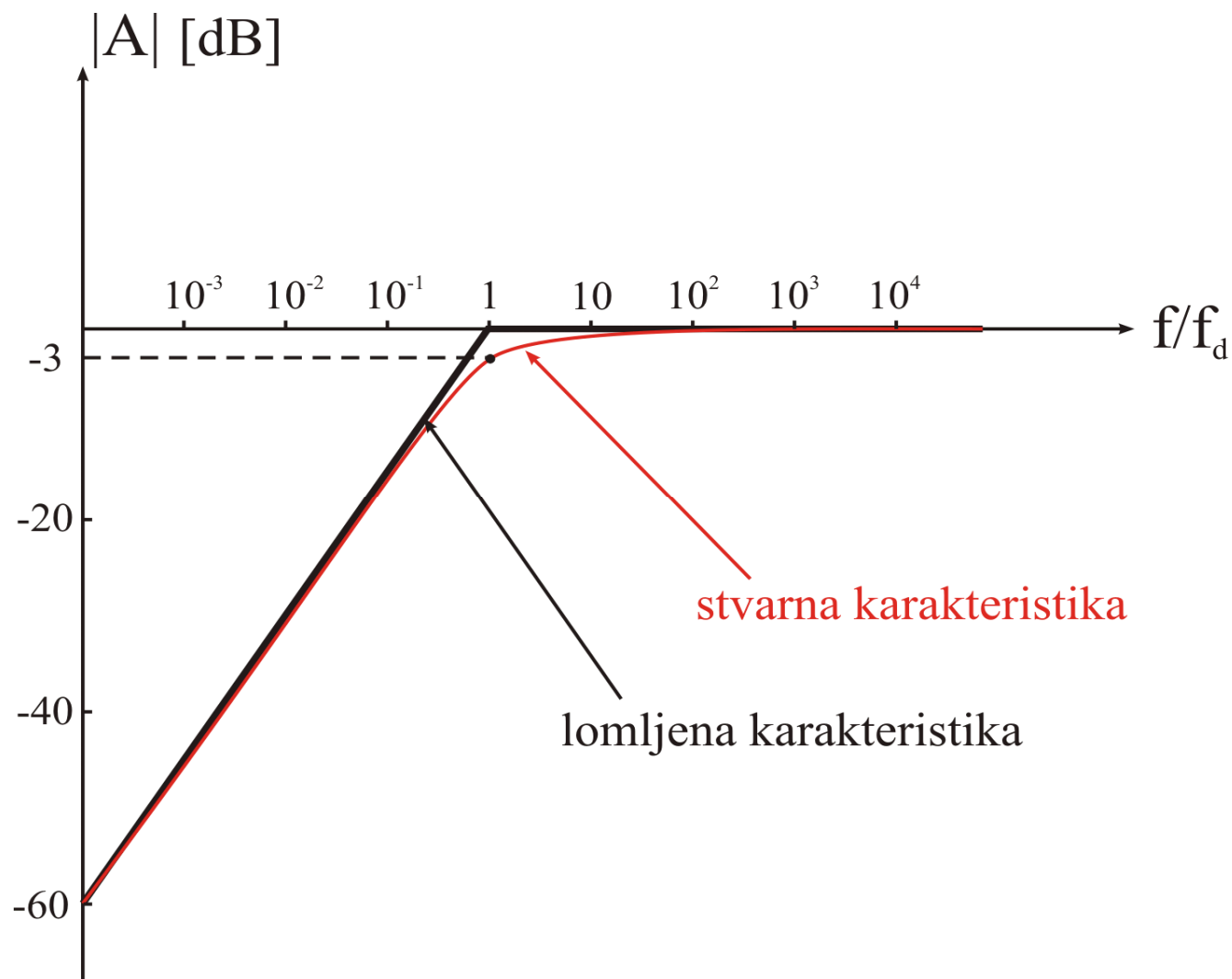
- Karakteristiku određenu relacijom (7) možemo aproksimirati s dva segmenta određena relacijama (8) i (9).
- Segmenti se sastaju u točki $f=f_d$ i to je točka loma pa se i sama karakteristika naziva lomljena karakteristika.
- U točki loma odstupanje lomljene od stvarne karakteristike po ordinati iznosi 3 dB, a kod svih ostalih frekvencija odstupanje je manje od 3 dB.



- Fazna karakteristika određena je relacijom (6). Lomljena karakteristika dobivena je tako da je za $0 < f < 0,1f_d$ fazna karakteristika aproksimirana faznim kutom $\phi=90^\circ$, dok je za $0,1f_d \leq f \leq 10f_d$ fazna karakteristika aproksimirana pravcem koji kroz točke s koordinatama $f=f_d$ i $\phi=45^\circ$ prolazi pod nagibom -45° po dekadi.



Amplitudna karakteristika



Fazna karakteristika

