

Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za elektroniku, mikroelektroniku,
računalne i inteligentne sustave

Elektronika 2

Željko Butković

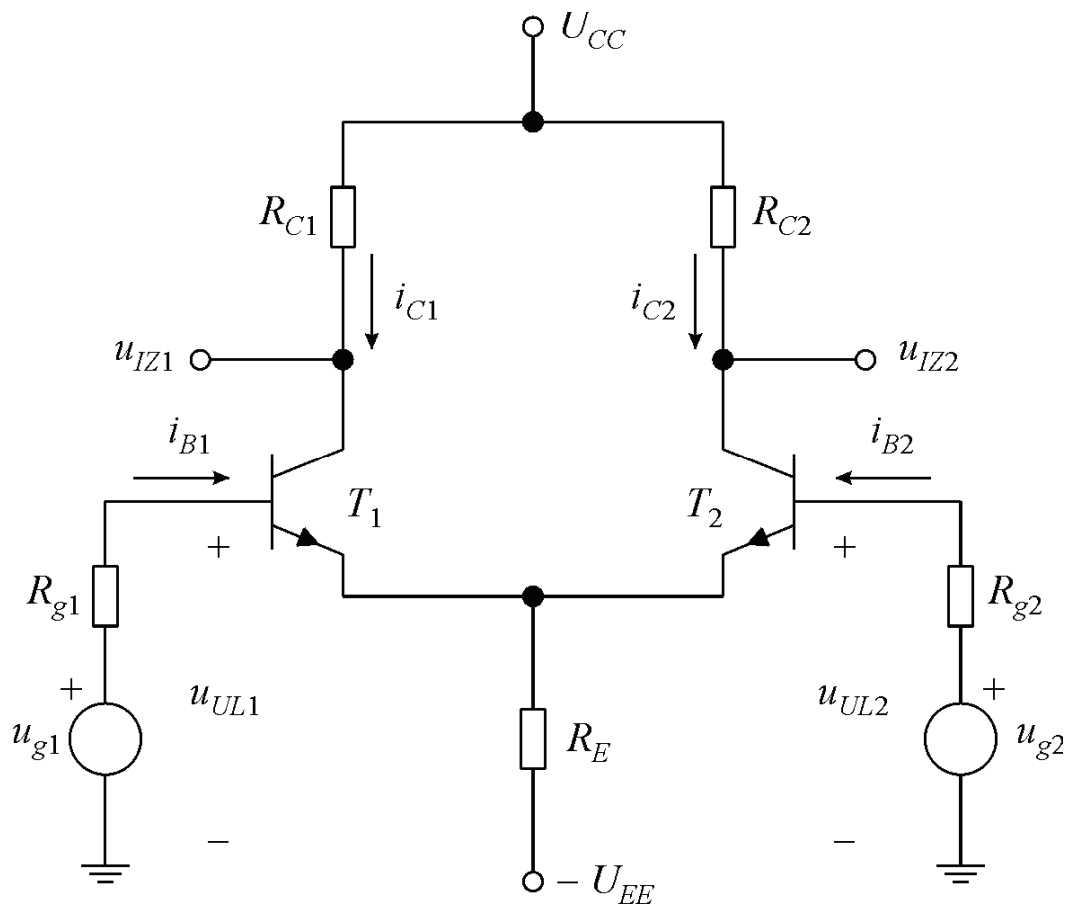
1. Diferencijska pojačala

Diferencijska pojačala

Diferencijsko pojačalo

- ☐ jedno od najznačajnijih tranzistorskih pojačala
- ☐ ulazni stupanj u operacijskim pojačalima, komparatorima, stabilizatorima
- ☐ primjena u mjernoj tehnici
- ☐ najbolja svojstva postižu se u integriranoj tehnici, koja osigurava dobru simetriju sklopa
- ☐ ima dva ulaza i jedan ili dva izlaza
- ☐ realizira se s najmanje dva tranzistora

Bipolarno diferencijsko pojačalo s emitterskim otpornikom



2 ulaza $\rightarrow u_{ul1}$ i u_{ul2}

2 izlaza $\rightarrow u_{iz1}$ i u_{iz2}

koristi se:

□ samo u_{iz1} ili $u_{iz2} \rightarrow$
asimetrični izlaz

□ razlika $u_{iz} = u_{iz2} - u_{iz1} \rightarrow$
diferencijski ili simetrični
izlaz

istosmjerno pojačalo

Statička analiza

u statiči $\rightarrow u_{g1} = u_{g2} = 0$

uz simetrične grane :

$$T_1 = T_2, R_{g1} = R_{g2}, R_{C1} = R_{C2} \rightarrow I_{B1} = I_{B2}, I_{C1} = I_{C2}$$

za ulazni krug tranzistora T_1 :

$$U_{EE} = I_{BQ1} R_{g1} + U_{BEQ1} + 2(1 + \beta) I_{BQ1} R_E$$

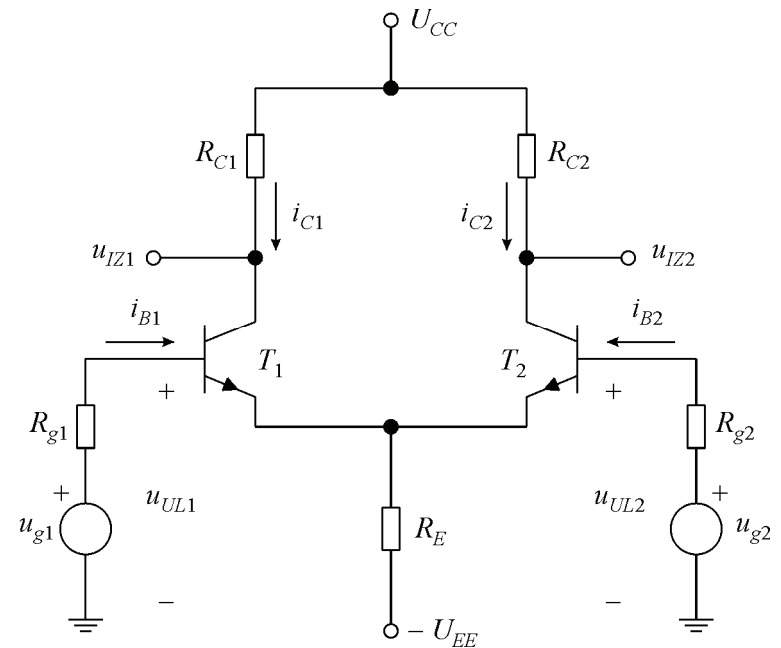
$$I_{BQ1} = I_{BQ2} = \frac{U_{EE} - U_{BEQ1}}{R_{g1} + 2(1 + \beta) R_E}$$

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = \beta I_{BQ1}$$

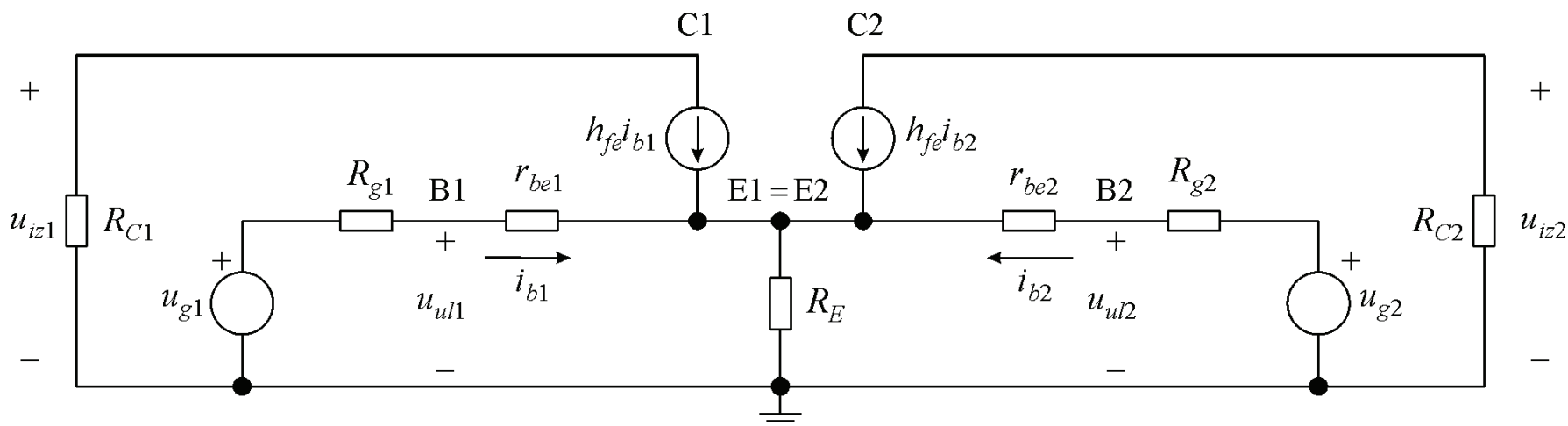
$$\begin{aligned} U_{CEQ1} = U_{CEQ2} &= U_{CC} + U_{EE} - [\beta R_{C1} + 2(1 + \beta) R_E] I_{BQ1} \approx \\ &\approx U_{CC} + U_{EE} - (R_{C1} + 2 R_E) I_{CQ1}. \end{aligned}$$

Primjer 1.1

U diferencijskom pojačalu sa slike
zadano je: $U_{CC} = U_{EE} = 15 \text{ V}$,
 $R_{g1} = R_{g2} = 500 \text{ } \Omega$, $R_{C1} = R_{C2} = 1,5 \text{ k}\Omega$
i $R_E = 4,5 \text{ k}\Omega$. Parametri oba
bipolarna tranzistora su $\beta = 100$ i
 $U_\gamma = 0,7 \text{ V}$. Odrediti struje i napone
tranzistora u statičkoj radnoj točki.



Dinamička analiza – nadomjesni sklop pojačala za mali signal



pojednostavljeni modeli tranzistora s ulaznim dinamičkim otporom r_{be} i
ovisnim izvorom $h_{fe}i_b$
zanemareni serijski otpori baze r_{bb} , i izlaznim dinamičkim otporom r_{ce}

Zajednički i diferencijski signal

Naponi u_{g1} i u_{g2} rastavljaju se na:

- ❑ zajednički signal u_z i
- ❑ diferencijski signal u_d

$$u_z = \frac{u_{g1} + u_{g2}}{2}$$

$$u_d = u_{g2} - u_{g1}$$

Pojedinačni ulazni naponi u_{g1} i u_{g2} su:

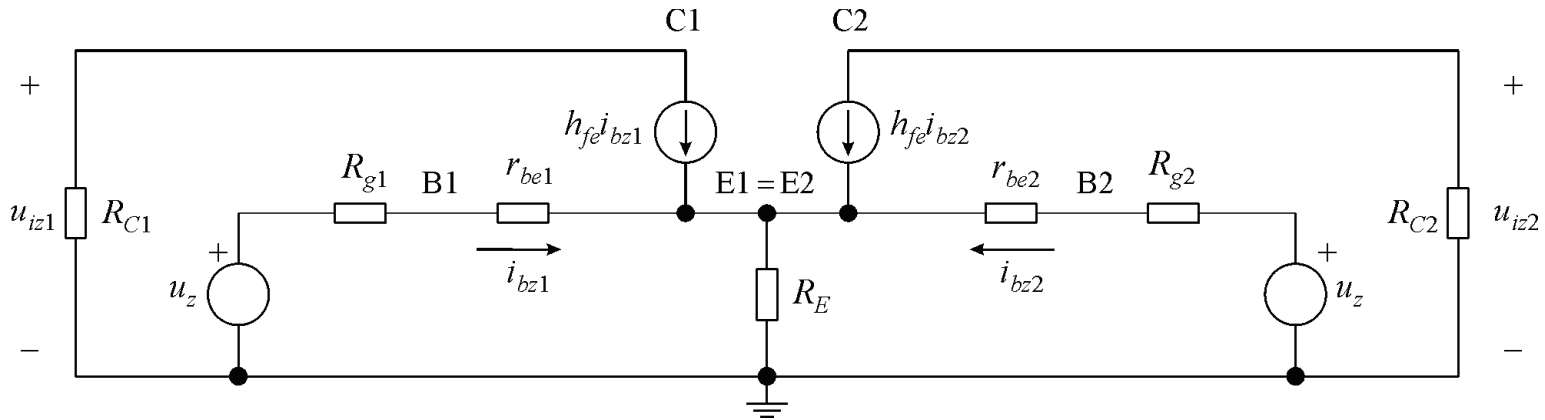
$$u_{g1} = u_z - u_d / 2$$

$$u_{g2} = u_z + u_d / 2$$

Analiza metodom superpozicije – posebno za zajednički, a posebno za diferencijski signal

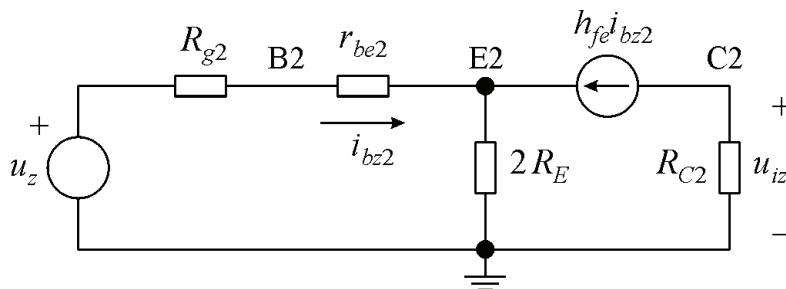
Pojačanje zajedničkog signala

Na oba je ulaza zajednički signal $\rightarrow u_{g1} = u_{g2} = u_z$



Uz simetriju $\rightarrow i_{bz1} = i_{bz2}$; za $u_{iz} = u_{iz2}$

$$u_{iz} = -h_{fe} i_{bz2} R_{C2}$$

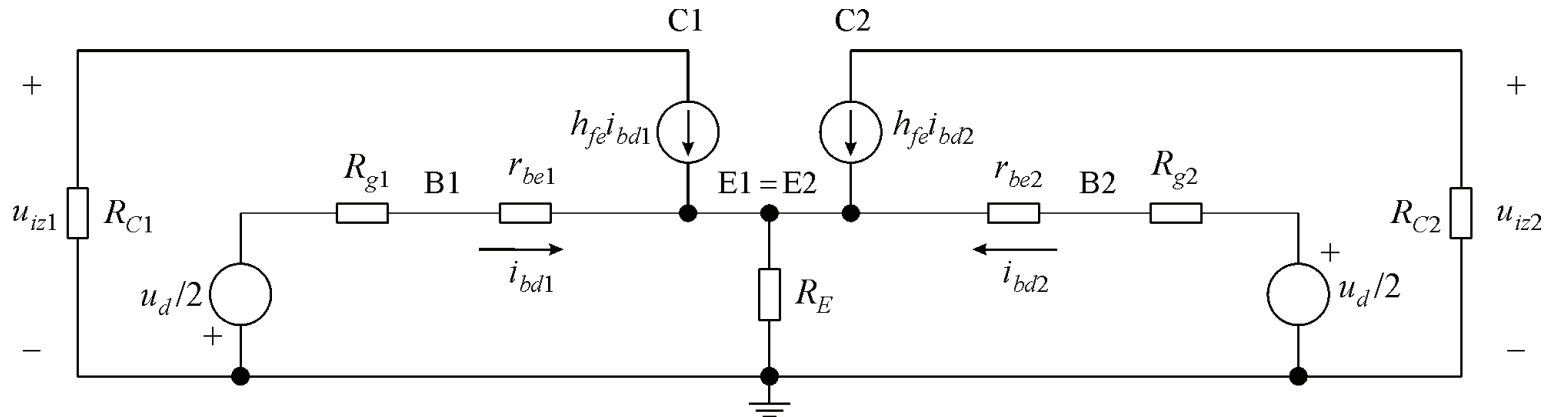


$$u_z = i_{bz2} [R_{g2} + r_{be2} + 2R_E (1 + h_{fe})]$$

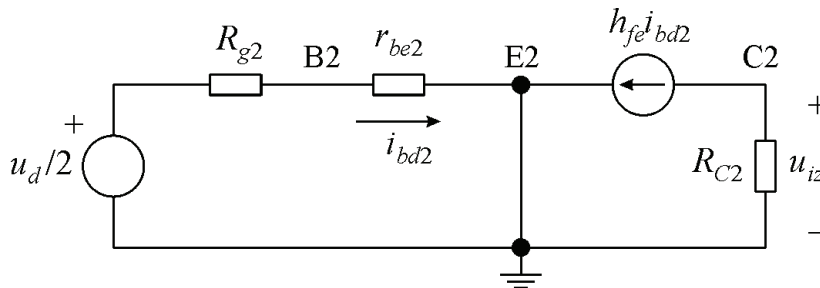
$$A_{Vz} = \frac{u_{iz}}{u_z} = \frac{-h_{fe} R_{C2}}{R_{g2} + r_{be2} + 2R_E (1 + h_{fe})}$$

Pojačanje diferencijuskog signala

Između oba ulaza je diferencijски signal $u_d \rightarrow u_{g2} = -u_{g1} = u_d/2$



Uz simetriju $\rightarrow i_{bd2} = -i_{bd1} \rightarrow$ nema pada napona na R_E ; za $u_{iz} = u_{iz2}$



$$u_{iz} = -h_{fe} i_{bd2} R_{C2}$$

$$u_d/2 = i_{bd2} (R_{g2} + r_{be2})$$

$$A_{Vd} = \frac{u_{iz}}{u_d} = \frac{1}{2} \frac{u_{iz}}{u_d/2} = \frac{-h_{fe} R_{C2}}{2(R_{g2} + r_{be2})}$$

Faktor potiskivanja

Izlazni napon \rightarrow zbroj napona uz diferencijski i zajednički signal

$$u_{iz} = A_{Vd} u_d + A_{Vz} u_z$$

Faktor potiskivanja: $\rho \equiv \frac{|A_{Vd}|}{|A_{Vz}|}$

$$\rho = \frac{R_{g2} + r_{be2} + 2R_E(1 + h_{fe})}{2(R_{g2} + r_{be2})} = \frac{1}{2} + \frac{R_E(1 + h_{fe})}{R_{g2} + r_{be2}}$$

$$\text{Uz } R_{g1} = R_{g2} = 0$$

$$\rho = \frac{1}{2} + \frac{R_E(1 + h_{fe})}{r_{be2}} \approx \frac{1}{2} + g_{m2} R_E = \frac{1}{2} + \frac{I_{CQ2}}{U_T} R_E$$

Primjer 1.2

Za diferencijsko pojačalo iz primjera 1.1 za asimetrični izlaz $u_{iz} = u_{iz2}$ izračunati naponska pojačanja zajedničkog i diferencijskog signala A_{Vz} i A_{Vd} , te faktor potiskivanja ρ . Dinamički faktor strujnog pojačanja $h_{fe} = 100$, a naponski ekvivalent temperature $U_T = 25$ mV. Zanemariti porast struje kolektora u normalnom aktivnom području.

Primjer 1.3

Na diferencijsko pojačalo iz primjera 1.2 priključeni su sinusni signali

$u_{g1} = U_{g1m} \sin \omega t$ i $u_{g2} = U_{g2m} \sin \omega t$. Izračunati izlazni napon $u_{iz} = u_{iz2}$ za

a) $U_{g1m} = -5 \text{ mV}$ i $U_{g2m} = 5 \text{ mV}$, te

b) $U_{g1m} = 20 \text{ mV}$ i $U_{g2m} = 30 \text{ mV}$.

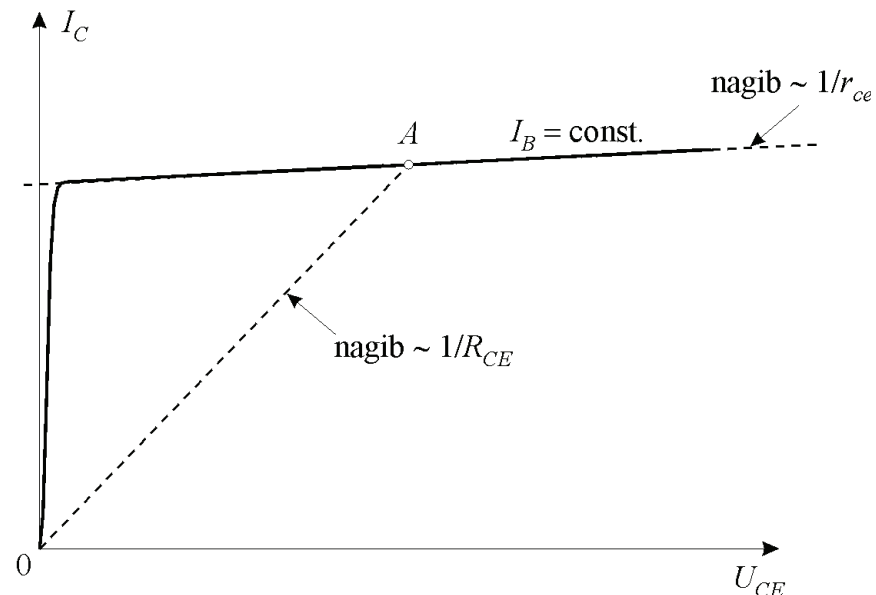
Povećanje faktora potiskivanja

Za povećanje faktora potiskivanja trebalo povećati otpor $R_E \rightarrow$ smanjilo bi se zajedničko pojačanje A_{Vz}

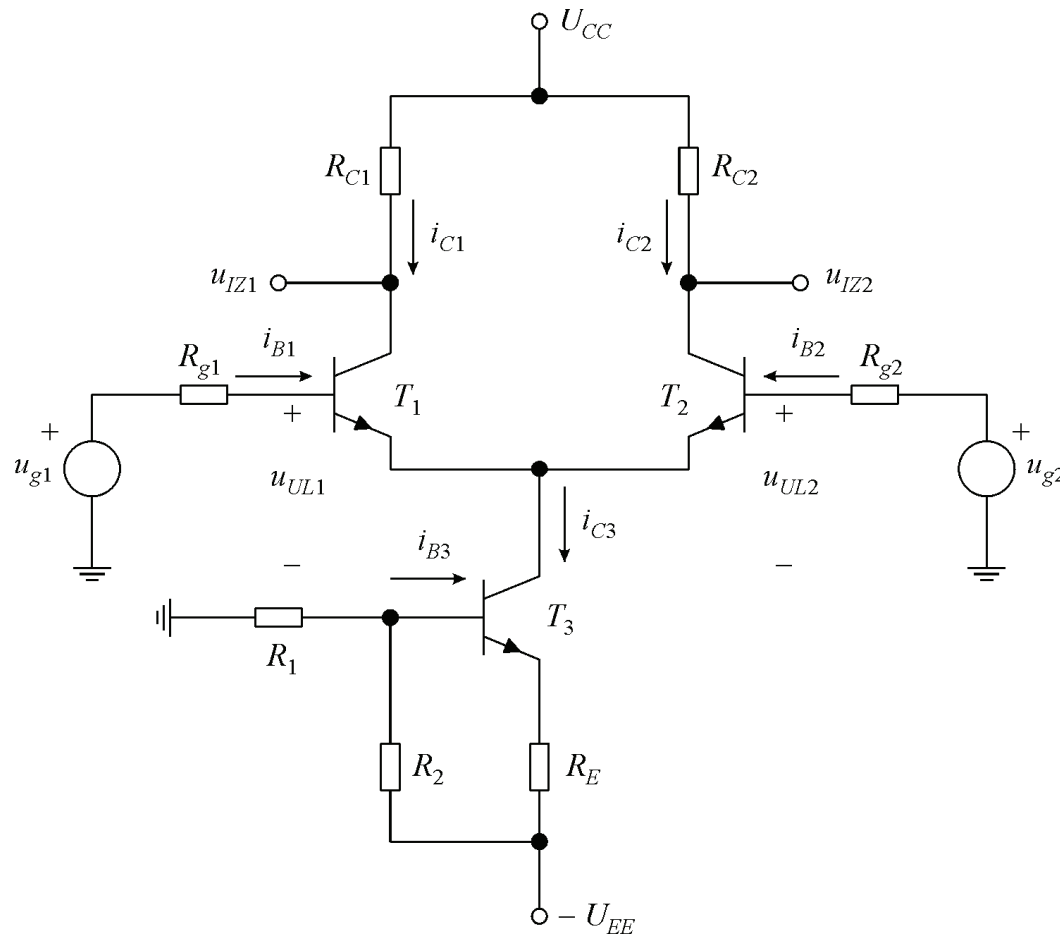
Uz zadržavanje diferencijskog pojačanja A_{Vd} povećanje R_E zahtjeva povećanje iznosa napona napajanja – $U_{EE} \rightarrow$ nepraktično

Rješenje \rightarrow primjena elementa s velikim dinamičkim i malim statičkim otporom

Primjer: izlazni krug bipolarnog tranzistora u normalnom aktivnom području



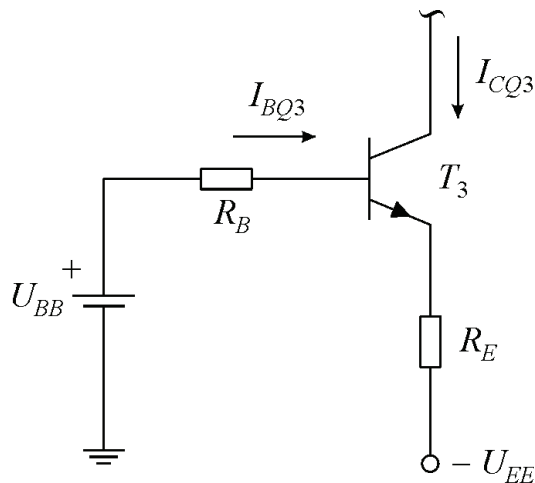
Bipolarno diferencijsko pojačalo sa strujnim izvorom



Statička analiza

Statičke struje diferencijskog para tranzistora T_1 i T_2 osigurava tranzistor T_3

Nadomještavanje otpornog djelila u krugu baze tranzistora T_3



$$U_{BB} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{EE}$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2$$

$$I_{BQ3} = \frac{U_{BB} + U_{EE} - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta)R_E} \quad I_{CQ3} = \beta I_{BQ3}$$

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = \frac{\beta}{1 + \beta} \frac{I_{CQ3}}{2} \approx \frac{I_{CQ3}}{2}$$

$$U_{CQ3} = -I_{BQ1} R_{g1} - U_{BEQ}$$

$$U_{CEQ3} = U_{CQ3} - (1 + \beta)I_{BQ3} R_E + U_{EE}$$

$$U_{CEQ1} = U_{CEQ2} = U_{CC} - I_{CQ1} R_{C1} - U_{CQ3}$$

Primjer 1.4

U diferencijskom pojačalu sa slike zadano je:

$$U_{CC} = U_{EE} = 15 \text{ V},$$

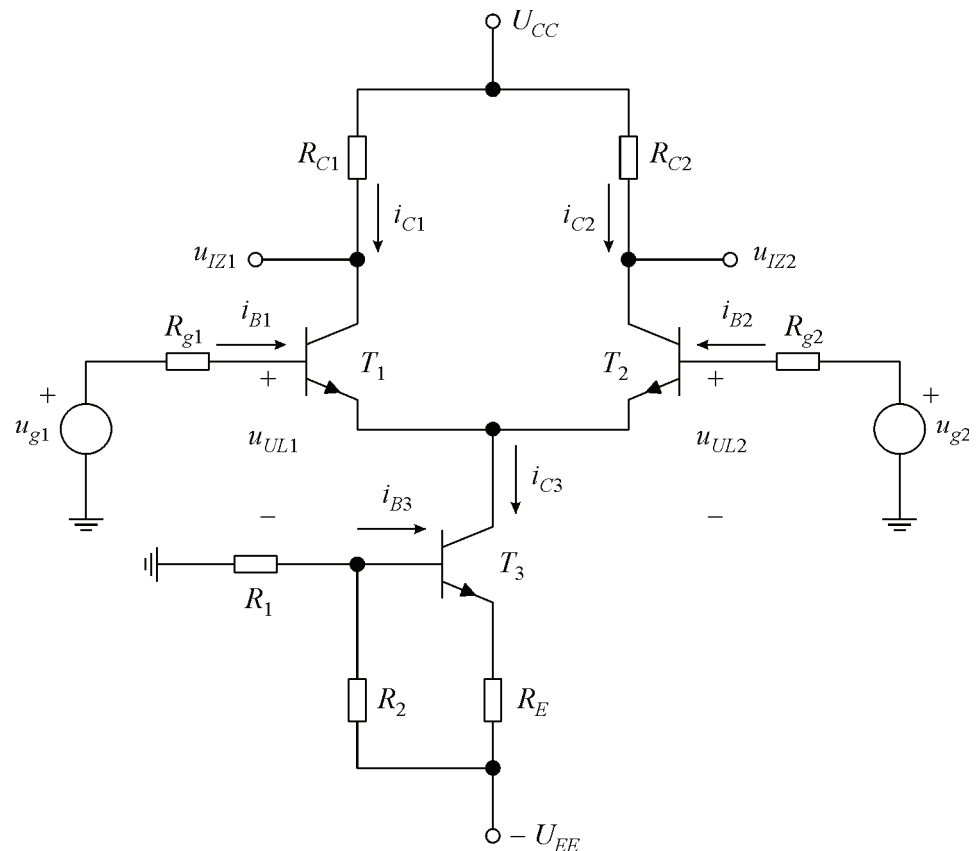
$$R_{g1} = R_{g2} = 500 \text{ } \Omega,$$

$$R_{C1} = R_{C2} = 1,5 \text{ k}\Omega, R_1 = 2 \text{ k}\Omega,$$

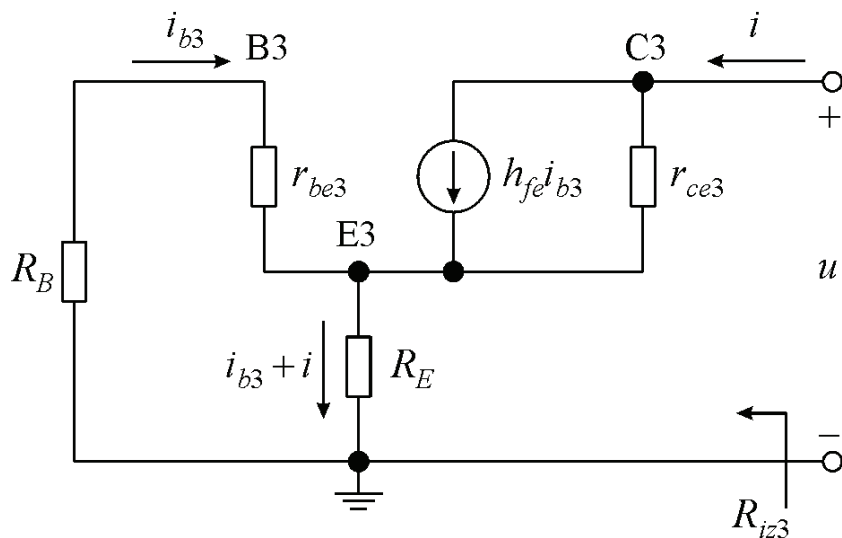
$$R_2 = 2,1 \text{ k}\Omega \text{ i } R_E = 2,2 \text{ k}\Omega.$$

Parametri sva tri bipolarna tranzistora su $\beta = 100$ i

$U_\gamma = 0,7 \text{ V}$. Odrediti struje i napone tranzistora u statičkoj radnoj točki.



Izlazni dinamički otpor strujnog izvora



$$u = (i - h_{fe} i_{b3}) r_{ce3} + (i_{b3} + i) R_E$$

$$i_{b3} (R_B + r_{be3}) + (i_{b3} + i) R_E = 0$$

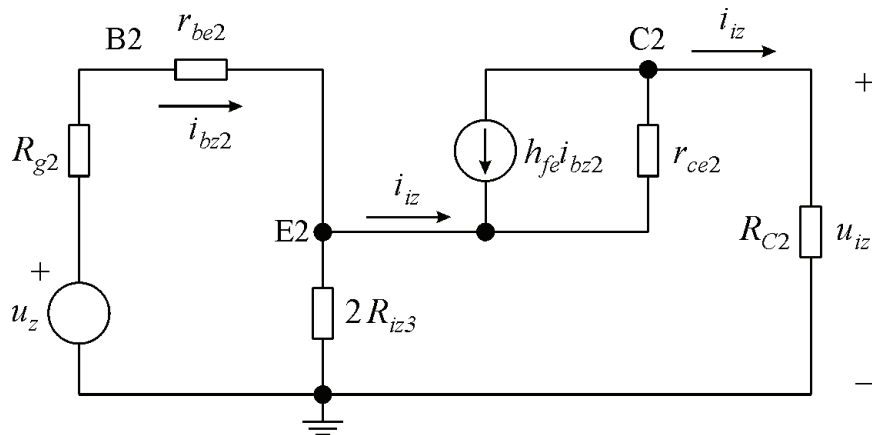
$$i_{b3} = - \frac{R_E}{R_B + r_{be3} + R_E} i = - \frac{R_E}{R} i$$

$$R_{iz3} = \frac{u}{i} = r_{ce3} + \left(1 + \frac{h_{fe} r_{ce3} - R_E}{R} \right) R_E$$

$$\text{uz } h_{fe} r_{ce3} \gg R_E \text{ i } h_{fe} r_{ce3} \gg R \rightarrow R_{iz3} \approx \left(1 + h_{fe} \frac{R_E}{R} \right) r_{ce3}$$

za $R_E/R \rightarrow 1$ otpor $> R_{iz3} \rightarrow (1 + h_{fe}) r_{ce3}$ – izlazni dinamički otpor u spoju zajedničke baze

Pojačanje zajedničkog signala



$$u_{iz} = R_{C2} i_{iz} = -r_{ce2} (i_{iz} + h_{fe} i_{bz2}) + 2R_{iz3} (i_{bz2} - i_{iz})$$

$$(R_{C2} + r_{ce2} + 2R_{iz3}) i_{iz} = -(h_{fe} r_{ce2} - 2R_{iz3}) i_{bz2}$$

$$A_{Iz} = \frac{i_{iz}}{i_{bz2}} = -\frac{h_{fe} r_{ce2} - 2R_{iz3}}{R_{C2} + r_{ce2} + 2R_{iz3}}$$

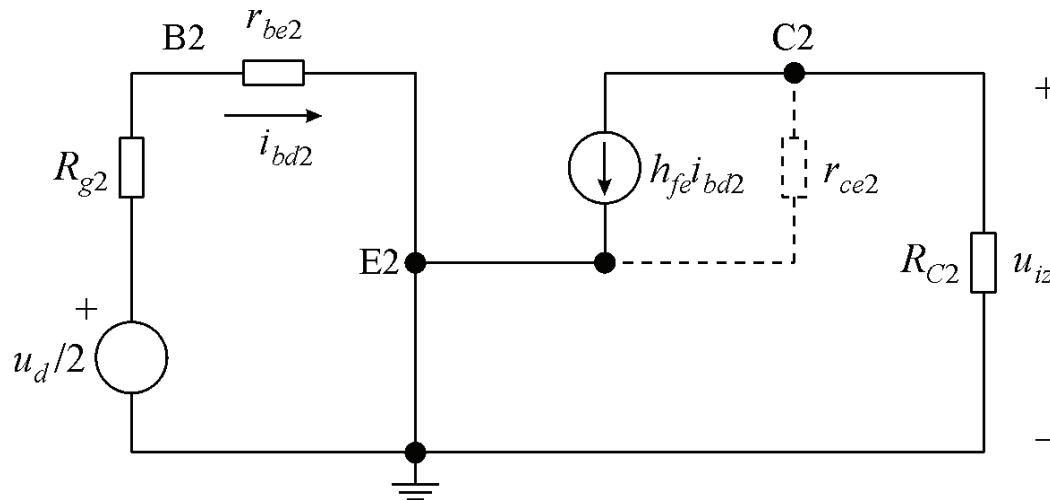
$$R_{ulz} = \frac{u_z}{i_{bz2}} = R_{g2} + r_{be2} + 2R_{iz3} (1 - A_{Iz})$$

$$A_{Vz} = \frac{u_{iz}}{u_z} = \frac{i_{iz} R_{C2}}{i_{bz2} R_{ulz}} = A_{Iz} \frac{R_{C2}}{R_{g2} + r_{be2} + 2R_{iz3} (1 - A_{Iz})}$$

$$\text{uz } R_{g2} + r_{be2} \ll 2R_{iz3} (1 - A_{Iz}) \rightarrow A_{Vz} \approx \frac{A_{Iz}}{1 - A_{Iz}} \frac{R_{C2}}{2R_{iz3}}$$

$$\text{uz veliko pojačanje } A_{Iz} \rightarrow A_{Vz} \approx -R_{C2} / (2R_{iz3})$$

Pojačanje diferencijskog signala



$$A_{Vd} = \frac{u_{iz}}{u_d} = \frac{1}{2} \frac{u_{iz}}{u_d/2} = \frac{-h_{fe} R_{C2}}{2(R_{g2} + r_{be2})}$$

Primjer 1.5

Za diferencijsko pojačalo iz primjera 1.4 za asimetrični izlaz $u_{iz} = u_{iz2}$ izračunati naponska pojačanja zajedničkog i diferencijskog signala A_{Vz} i A_{Vd} , te faktor potiskivanja ρ . Parametri svih tranzistora su $h_{fe} = 100$ i $U_A = 200$ V, a naponski ekvivalent temperature $U_T = 25$ mV.

Primjer 1.6

Na diferencijsko pojačalo iz primjera 1.5 priključeni su sinusni signali

$u_{g1} = U_{g1m} \sin \omega t$ i $u_{g2} = U_{g2m} \sin \omega t$. Izračunati izlazni napon $u_{iz} = u_{iz2}$ za

a) $U_{g1m} = -5 \text{ mV}$ i $U_{g2m} = 5 \text{ mV}$, te

b) $U_{g1m} = 20 \text{ mV}$ i $U_{g2m} = 30 \text{ mV}$.

Pojačanja simetričnog ili diferencijskog izlaza

Diferencijski izlaz $\rightarrow u_{iz} = u_{iz2} - u_{iz1} \rightarrow u_{iz2}$ i u_{iz1} su pojedinačni izlazni naponi.

Za pojedinačni izlaz $u_{iz2} \rightarrow$ koriste se dosad izvedena pojačanja

$$A_{Vz2} = u_{iz2}/u_z \text{ i } A_{Vd2} = u_{iz2}/u_d$$

Za zajednički signal $u_{g1} = u_{g2} = u_z$

$$A_{Vz2} = \frac{u_{iz2}}{u_z} = \frac{u_{iz1}}{u_z} = A_{Vz1}$$

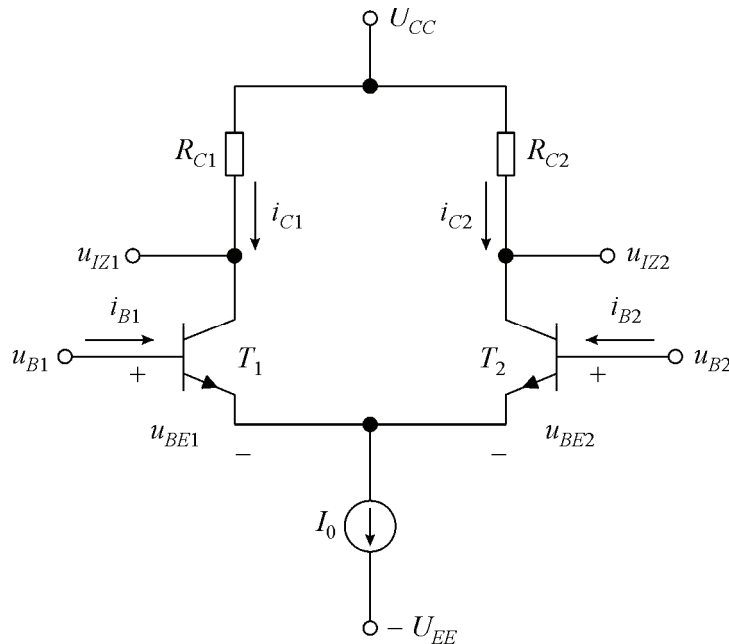
$$A_{Vz} = \frac{u_{iz}}{u_z} = \frac{u_{iz2} - u_{iz1}}{u_z} = A_{Vz2} - A_{Vz1} = 0$$

Za diferencijski signal $u_{g2} = -u_{g1} = u_d/2$

$$A_{Vd2} = \frac{u_{iz2}}{u_d} = -\frac{u_{iz1}}{u_d} = -A_{Vd1}$$

$$A_{Vd} = \frac{u_{iz}}{u_d} = \frac{u_{iz2} - u_{iz1}}{u_d} = A_{Vd2} - A_{Vd1} = 2 A_{Vd2}$$

Prijenosna karakteristika (1)



$$I_0 = \frac{u_E + U_{EE}}{R_E} \approx \frac{U_{EE}}{R_E}$$

$$I_0 \approx i_{C1} + i_{C2}$$

$$i_{C1} = I_S \exp\left(\frac{u_{BE1}}{U_T}\right)$$

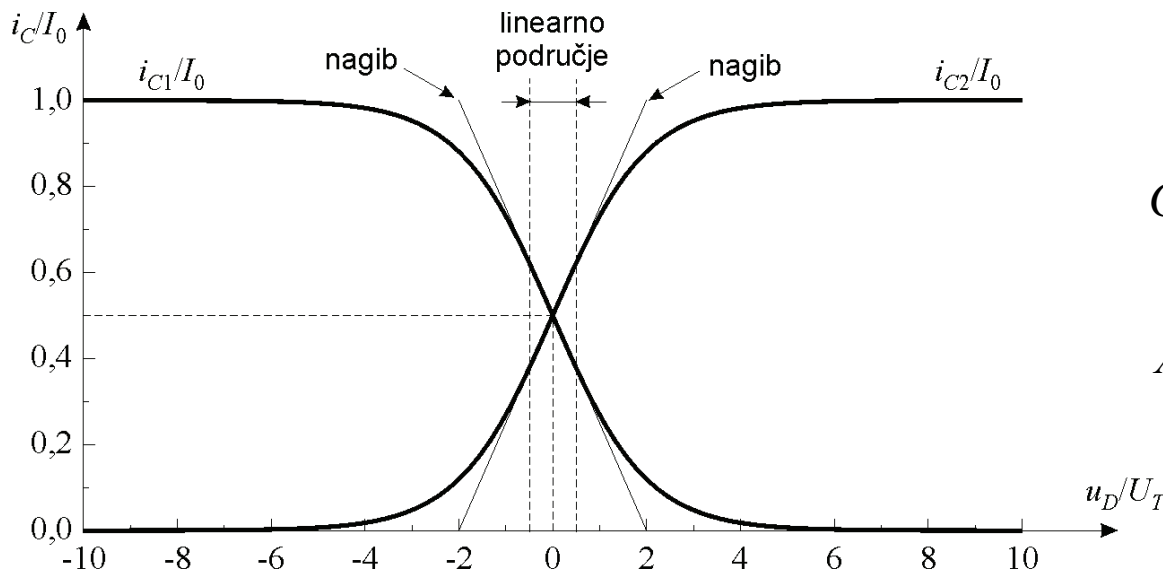
$$i_{C2} = I_S \exp\left(\frac{u_{BE2}}{U_T}\right)$$

$$i_{C1} = I_S \exp\left(\frac{u_{BE2}}{U_T}\right) \exp\left(-\frac{u_{BE2} - u_{BE1}}{U_T}\right) = i_{C2} \exp\left(-\frac{u_{BE2} - u_{BE1}}{U_T}\right)$$

$$u_D = u_{B2} - u_{B1} = u_{BE2} - u_{BE1}$$

Prijenosna karakteristika (2)

$$i_{C2} \approx \frac{I_0}{1 + \exp\left(-\frac{u_D}{U_T}\right)} \quad i_{C1} \approx \frac{I_0}{1 + \exp\left(\frac{u_D}{U_T}\right)}$$

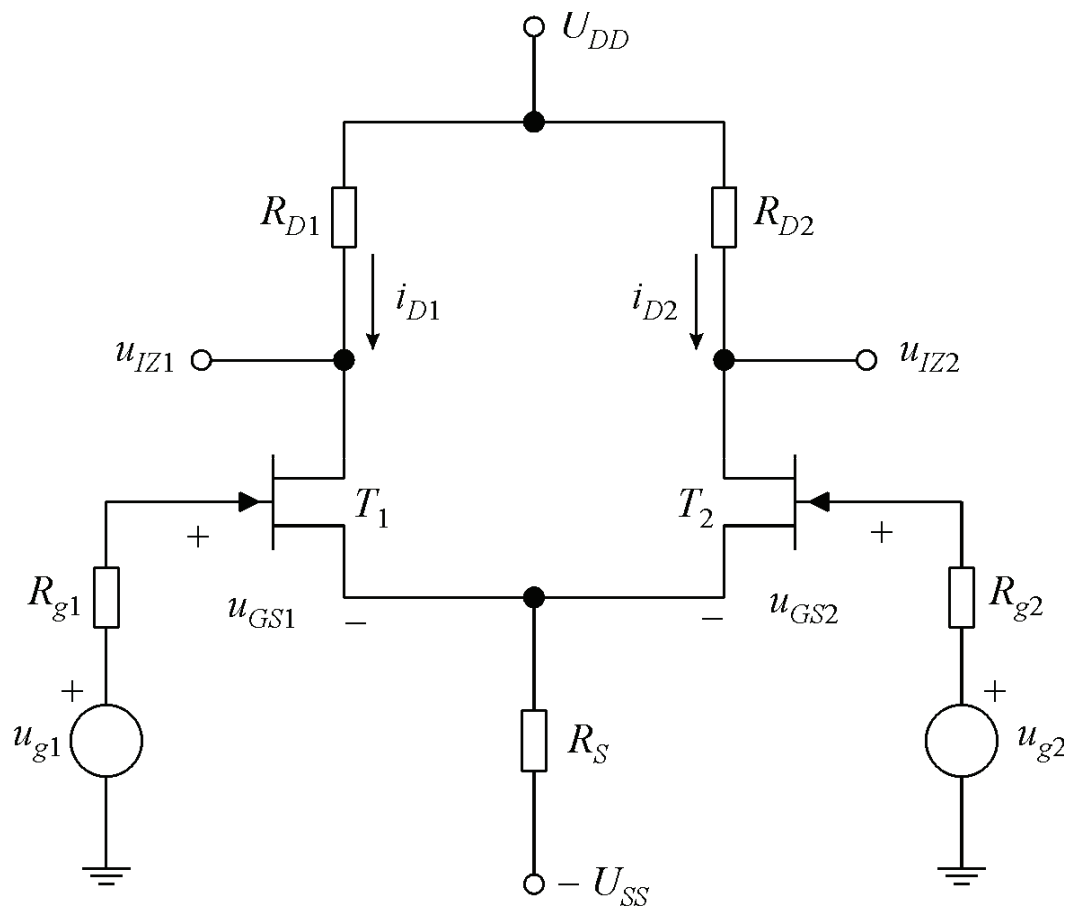


Za $u_D = 0$

$$G_{m,\max} = \left| \frac{di_{C1}}{du_D} \right| = \left| \frac{di_{C2}}{du_D} \right| = \frac{I_0}{4U_T}$$

$$\begin{aligned} A_{Vd,\max} &= -G_{m,\max} R_{C2} = \\ &= -\frac{I_0}{4U_T} R_{C2} \end{aligned}$$

Unipolarno diferencijsko pojačalo s uvodskim otpornikom



2 ulaza $\rightarrow u_{ul1}$ i u_{ul2}

od 2 izlaza $\rightarrow u_{iz1}$ i u_{iz2}

može se koristiti:

- ❑ samo u_{iz1} ili $u_{iz2} \rightarrow$ **asimetrični izlaz**
- ❑ razlika $u_{iz} = u_{iz2} - u_{iz1} \rightarrow$ **diferencijski ili simetrični izlaz**

slična je realizacija s MOSFET-ovima

Statička analiza

u statiči $\rightarrow u_{g1} = u_{g2} = 0$

uz simetrične grane :

$$T_1 = T_2, R_{g1} = R_{g2}, R_{D1} = R_{D2} \rightarrow U_{GS1} = U_{GS2}, I_{D1} = I_{D2}$$

za ulazni krug FET-a T_1 :

$$U_{SS} = U_{GSQ1} + 2I_{DQ1}R_S \rightarrow I_{DQ1} = I_{DQ2} = \frac{U_{SS} - U_{GSQ1}}{2R_S}$$

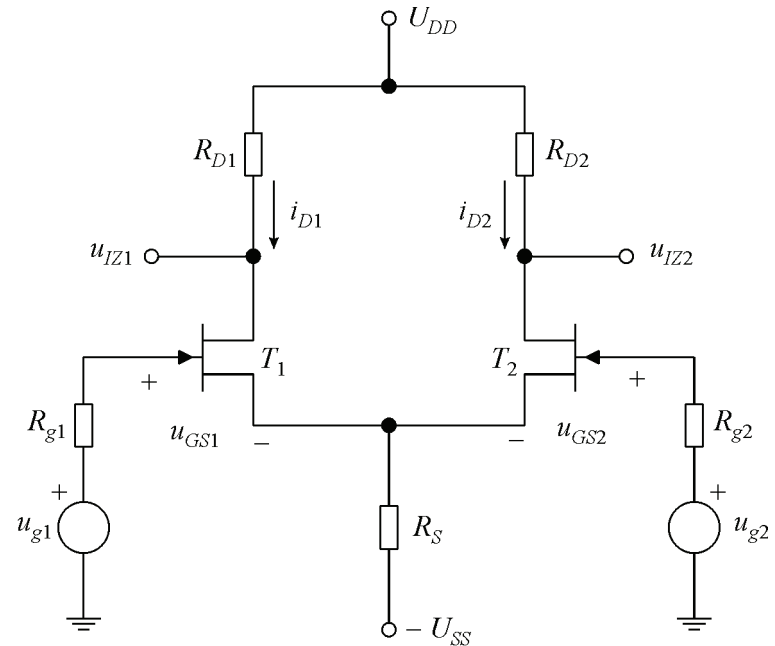
uz rad FET-a u području zasićenja:

$$I_{DQ1} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ1}}{U_P} \right)^2$$

$$U_{DSQ1} = U_{DSQ2} = U_{DD} + U_{SS} - (R_{D1} + 2R_S)I_{DQ1}$$

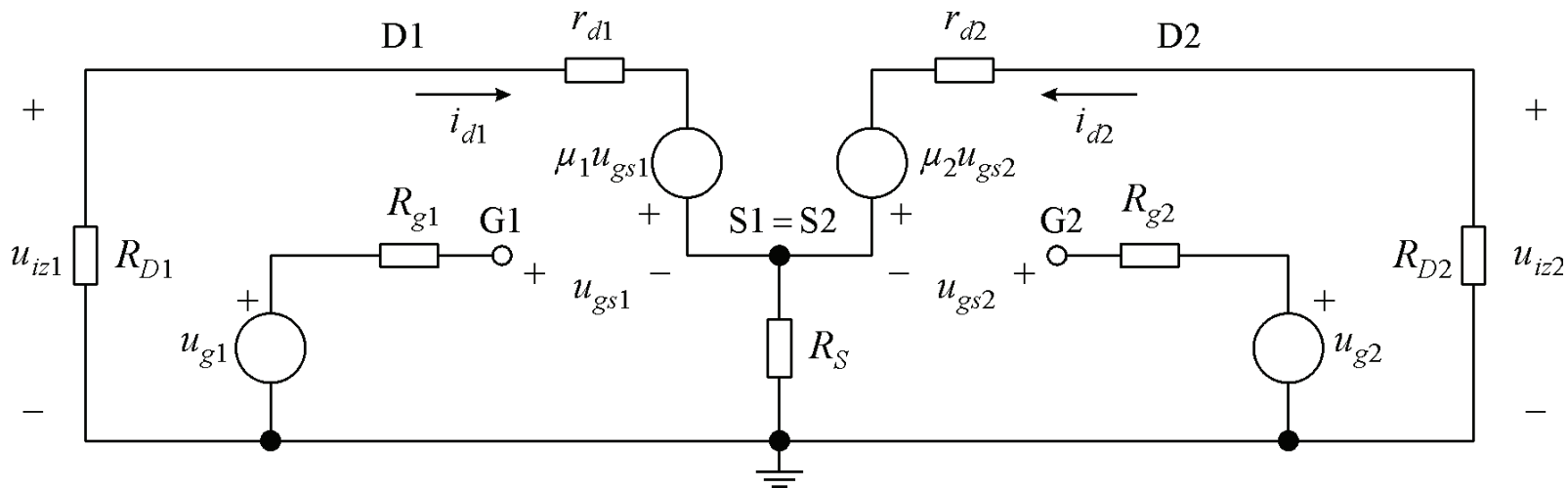
Primjer 1.7

Odrediti statičku radnu točku
diferencijskog pojačala sa slike
Zadano je $U_{DD} = U_{SS} = 18\text{ V}$,
 $R_{g1} = R_{g2} = 1\text{ k}\Omega$ i
 $R_{D1} = R_{D2} = R_S = 5\text{ k}\Omega$. FET-ovi T_1 i
 T_2 imaju jednake parametre
 $I_{DSS} = 8\text{ mA}$ i $U_P = -4\text{ V}$. Zanemariti
porast struja odvoda I_D s
naponima U_{DS} u području
zasićenja.



Dinamička analiza

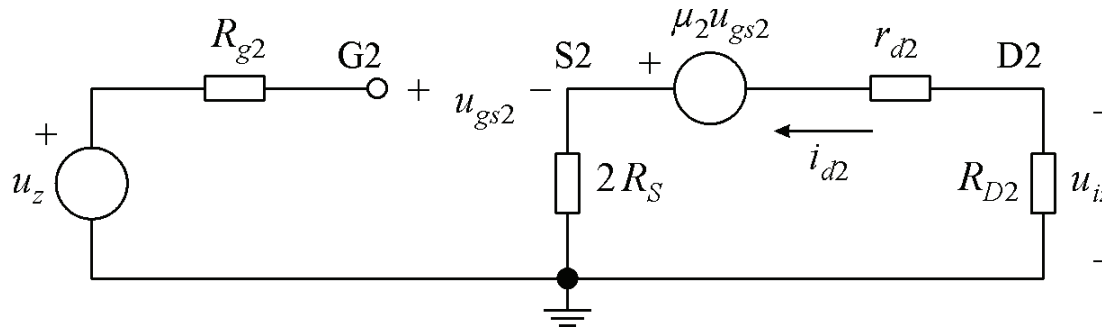
Nadomjesni sklop cijelog pojačala za mali signal



Pojačanje zajedničkog signala

Na oba je ulaza zajednički signal $\rightarrow u_{g1} = u_{g2} = u_z$

Uz simetriju obje grane su jednake \rightarrow analizira se pola pojačala za $u_{iz} = u_{iz2}$



$$\mu_2 u_{gs2} = (2R_S + r_{d2} + R_{D2}) i_{d2}$$

$$u_z = u_{gs2} + 2R_S i_{d2}$$

$$u_{iz} = -R_{D2} i_{d2}$$

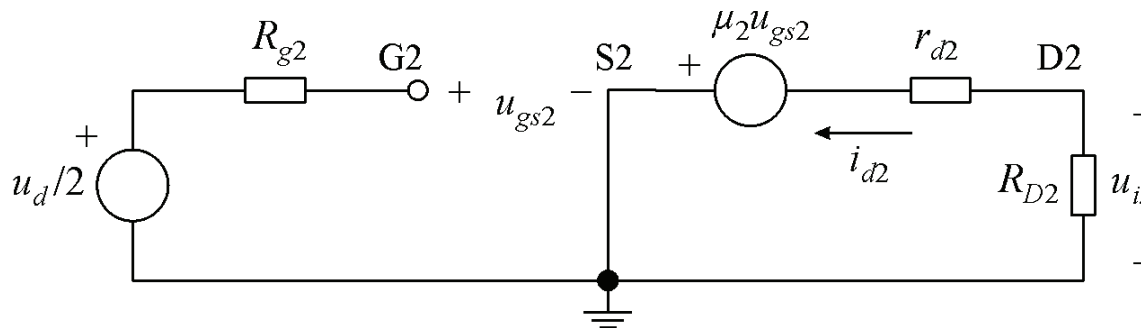
$$A_{Vz} = \frac{u_{iz}}{u_z} = \frac{-\mu_2 R_{D2}}{2(1 + \mu) R_S + r_{d2} + R_{D2}}$$

Pojačanje diferencijskog signala

Između oba ulaza je diferencijski signal $u_d \rightarrow u_{g2} = -u_{g1} = u_d/2$

Uz simetriju $\rightarrow i_{d2} = -i_{d1} \rightarrow$ nema pada napona na R_S

Za $u_{iz} = u_{iz2}$ dovoljno je analizirati pola pojačala



$$u_{iz} = -\frac{R_{D2}}{r_{d2} + R_{D2}} \mu_2 u_{gs2} \qquad u_{gs2} = u_d / 2$$

$$A_{Vd} = \frac{u_{iz}}{u_d} = \frac{-\mu_2 R_{D2}}{2(r_{d2} + R_{D2})}$$

Faktor potiskivanja

Izlazni napon \rightarrow zbroj napona uz diferencijski i zajednički signal

$$u_{iz} = A_{Vd} u_d + A_{Vz} u_z$$

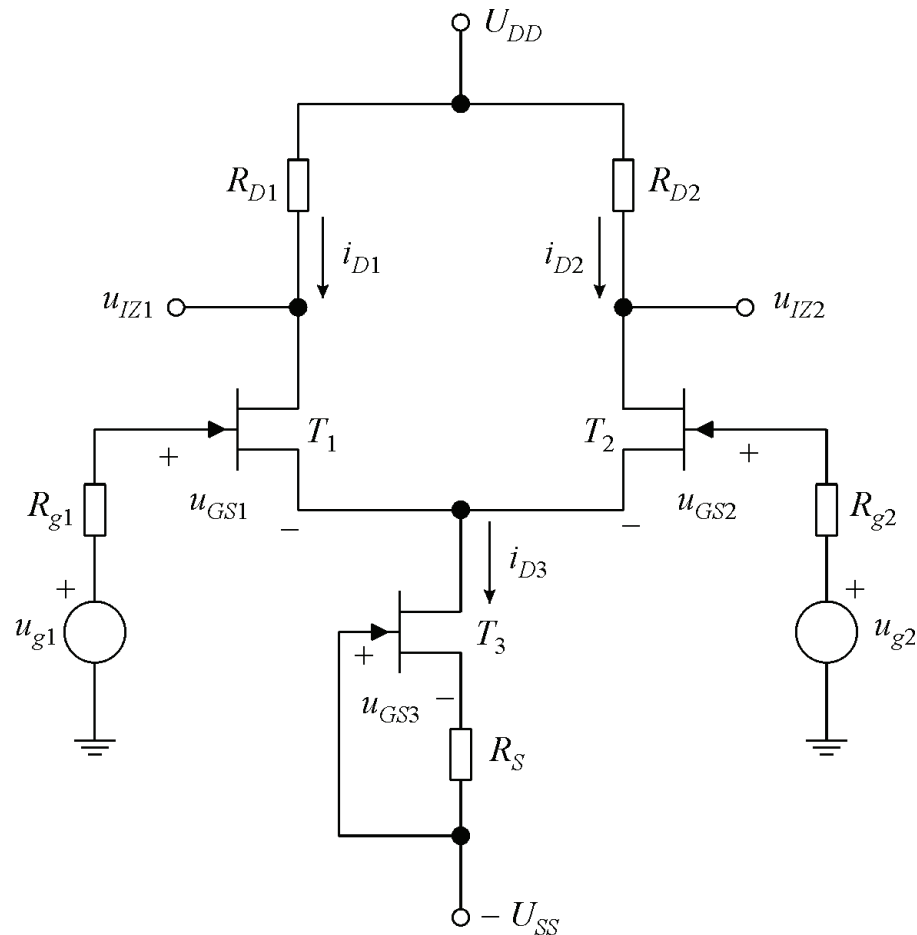
Faktor potiskivanja: $\rho \equiv \frac{|A_{Vd}|}{|A_{Vz}|}$

$$\rho = (1 + \mu) \frac{R_s}{r_{d2} + R_{D2}} + 2$$

Primjer 1.8

Za diferencijsko pojačalo iz primjera 1.7 izračunati naponska pojačanja zajedničkog i diferencijskog signala A_{Vz} i A_{Vd} , te faktor potiskivanja ρ za asimetrični izlaz $u_{iz} = u_{iz2}$. Parametar modulacije dužine kanala FET-ova $\lambda = 0,002 \text{ V}^{-1}$.

Unipolarno diferencijsko pojačalo sa strujnim izvorom



Statička analiza

Statičke struje diferencijskog para FET-ova T_1 i T_2 osigurava FET T_3

$$U_{GSQ3} + R_S I_{DQ3} = 0 \quad I_{DQ3} = I_{DSS3} \left(1 - \frac{U_{GSQ3}}{U_{P3}} \right)^2$$

$$I_{DQ1} + I_{DQ2} = I_{DQ3} \rightarrow I_{DQ1} = I_{DQ2} = I_{DQ3} / 2$$

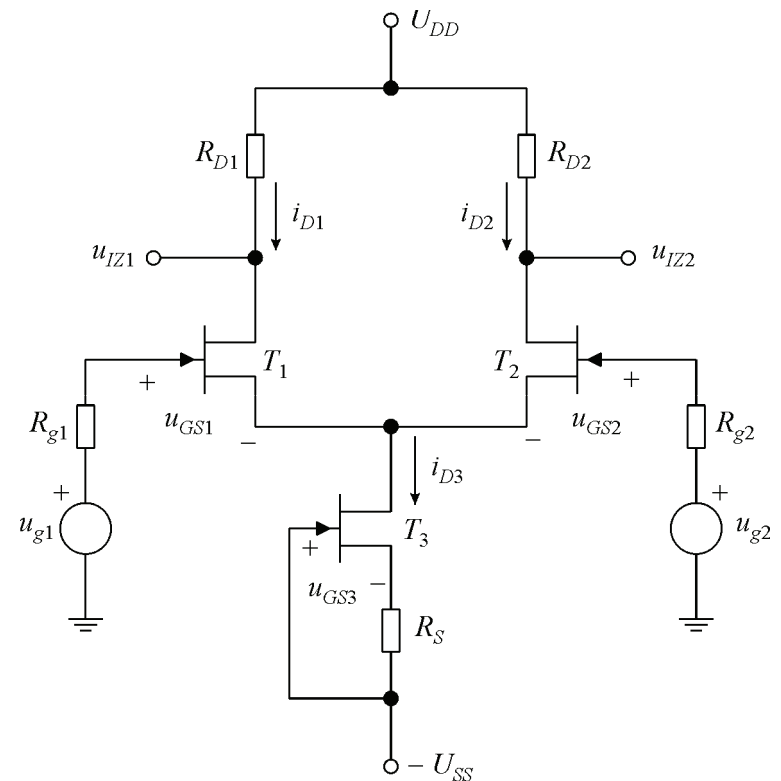
$$U_{GSQ1} = U_{GSQ2} = U_{P1} \left(1 \pm \sqrt{\frac{I_{DQ1}}{I_{DSS1}}} \right) \quad U_{DQ3} = -U_{GSQ1}$$

$$U_{DSQ1} = U_{DSQ2} = U_{DD} - U_{DQ3} - R_{D1} I_{DQ1}$$

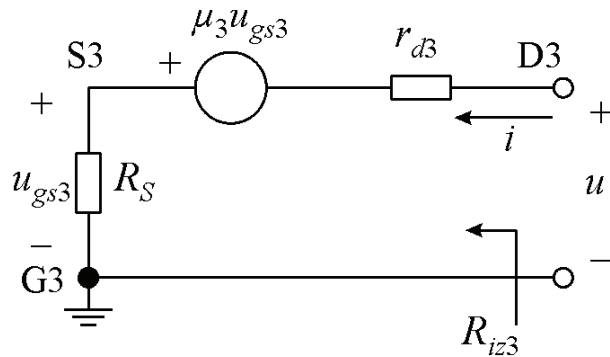
$$U_{DSQ3} = U_{DQ3} + U_{SS} - R_S I_{DQ3}$$

Primjer 1.9

Odrediti statičku radnu točku diferencijskog pojačala sa strujnim izvorom sa slike. Zadano je $U_{CC} = U_{EE} = 18\text{ V}$, $R_{g1} = R_{g2} = 1\text{ k}\Omega$, $R_{D1} = R_{D2} = 5\text{ k}\Omega$ i $R_S = 500\text{ }\Omega$. Parametri tranzistora su: $I_{DSS1} = I_{DSS2} = 8\text{ mA}$ i $U_{P1} = U_{P2} = -4\text{ V}$, $I_{DSS3} = 9\text{ mA}$ i $U_{P3} = -6\text{ V}$. Zanemariti porast struja odvoda I_D s naponima U_{DS} u području zasićenja.



Izlazni dinamički otpor strujnog izvora



$$u = -\mu_3 u_{gs3} + (r_{d3} + R_S) i$$

$$u_{gs3} = -R_S i$$

$$R_{iz3} = \frac{u}{i} = r_{d3} + (1 + \mu_3) R_S$$

Pojačanja zajedničkog i diferencijskog signala

Analizira se pola pojačala uz $u_{iz} = u_{iz2}$.

Koriste se isti nadomjesni sklopovi kao za diferencijsko pojačalo s uvodskim otpornikom.

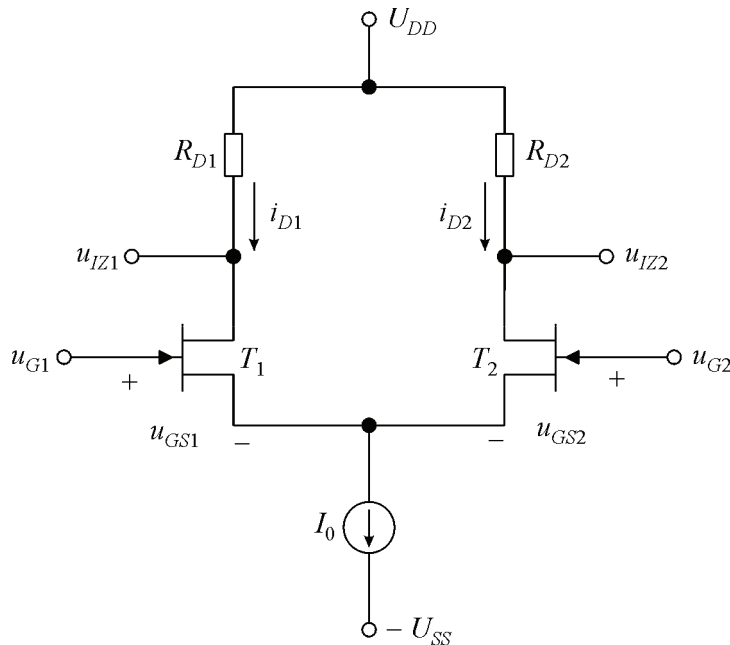
$$A_{Vz} = \frac{u_{iz}}{u_z} = \frac{-\mu_2 R_{D2}}{2(1 + \mu) R_{iz3} + r_{d2} + R_{D2}}$$

$$A_{Vd} = \frac{u_{iz}}{u_d} = \frac{-\mu_2 R_{D2}}{2(r_{d2} + R_{D2})}$$

Primjer 1.10

Za diferencijsko pojačalo sa strujnim izvorom iz primjera 1.9 za asimetrični izlaz $u_{iz} = u_{iz2}$ izračunati naponska pojačanja zajedničkog i diferencijskog signala A_{Vz} i A_{Vd} , te faktor potiskivanja ρ . Za sve tranzistore parametar modulacije dužine kanala FET-ova $\lambda = 0,002 \text{ V}^{-1}$.

Prijenosna karakteristika (1)



$$I_0 = \frac{u_S + U_{SS}}{R_S} \approx \frac{U_{SS}}{R_S} \quad I_0 = i_{D1} + i_{D2}$$

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P} \right)^2 \rightarrow u_{GS} = U_P \left(1 - \sqrt{\frac{i_D}{I_{DSS}}} \right)$$

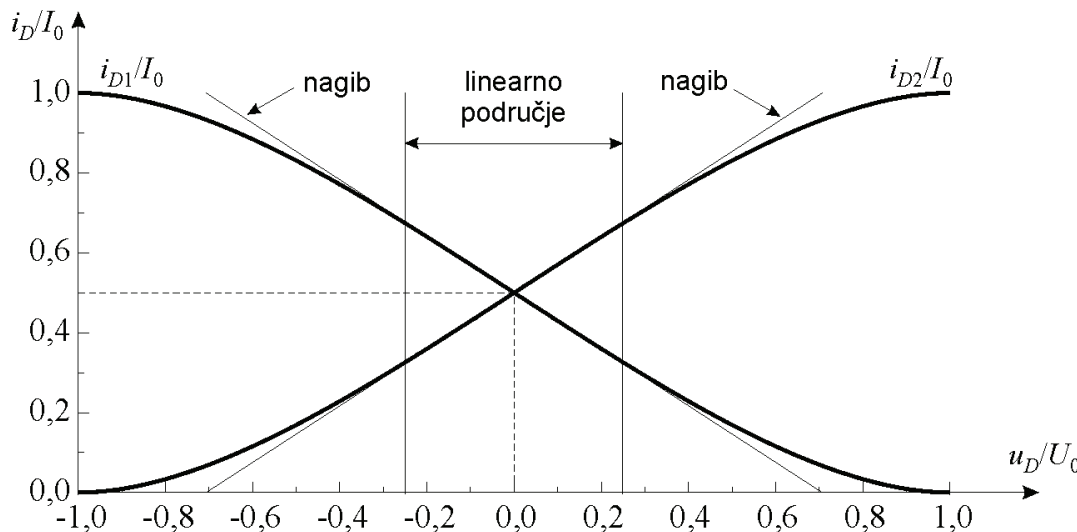
$$u_D = u_{G2} - u_{G1} = u_{GS2} - u_{GS1}$$

$$u_D = \frac{-U_P}{\sqrt{I_{DSS}}} \left(\sqrt{i_{D2}} - \sqrt{i_{D1}} \right)$$

$$i_{D2} = \frac{I_0}{2} \left[1 + \sqrt{2 \frac{I_{DSS}}{I_0} \left(\frac{u_D}{-U_P} \right)^2 - \left(\frac{I_{DSS}}{I_0} \right)^2 \left(\frac{u_D}{-U_P} \right)^4} \right]$$

Prijenosna karakteristika (2)

$$\text{uz } U_0 = -U_P \sqrt{\frac{I_0}{I_{DSS}}} \rightarrow i_{D1} = \frac{I_0}{2} \left[1 - \frac{u_D}{U_0} \sqrt{2 - \left(\frac{u_D}{U_0} \right)^2} \right], \quad i_{D2} = \frac{I_0}{2} \left[1 + \frac{u_D}{U_0} \sqrt{2 - \left(\frac{u_D}{U_0} \right)^2} \right]$$



$$\text{za } u_D \ll \sqrt{2} U_0$$

$$i_{D2} \approx \frac{I_0}{2} \left(1 + \sqrt{2} \frac{u_D}{U_0} \right)$$

$$G_{m,\max} = \left| \frac{di_{D1}}{du_D} \right| = \left| \frac{di_{D2}}{du_D} \right| = \frac{I_0}{\sqrt{2} U_0}$$