

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

Elektronika 2

Željko Butković

8. Integrirani analogni sklopovi

Izvedbe elektroničkih sklopova

Diskretni sklopovi → spajanjem diskretnih elemenata na tiskanoj pločici

Integrirani sklopovi → formiranjem i povezivanjem elemenata na zajedničkoj poluvodičkoj pločici → različita sklopovska rješenja

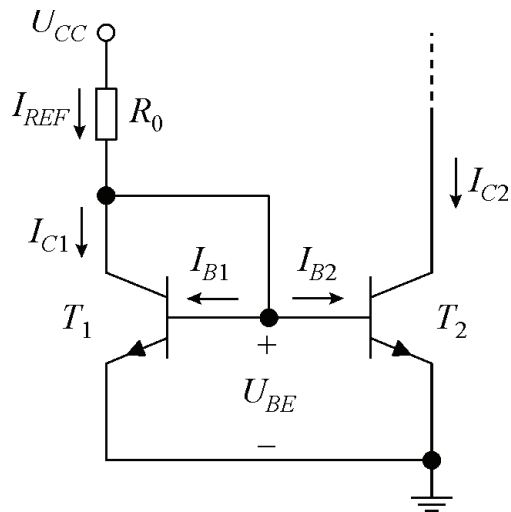
Nedostaci integrirane tehnike:

- ograničeni izbor elemenata
- loše apsolutne tolerancije elemenata
- ograničeni interval vrijednosti komponenata

Prednosti integrirane tehnike:

- male dimenzije elemenata → veći broj prvenstveno aktivnih elementa, brži sklopovi, mala potrošnja snage
- dobro slaganje i praćenje parametara komponenata
- veća pouzdanost
- jeftiniji sklopovi

Widlarov strujni izvor



Oba tranzistora rade s jednakim naponima U_{BE}

Ako su jednakih dimenzija $\rightarrow I_{B1} = I_{B2} = I_B$

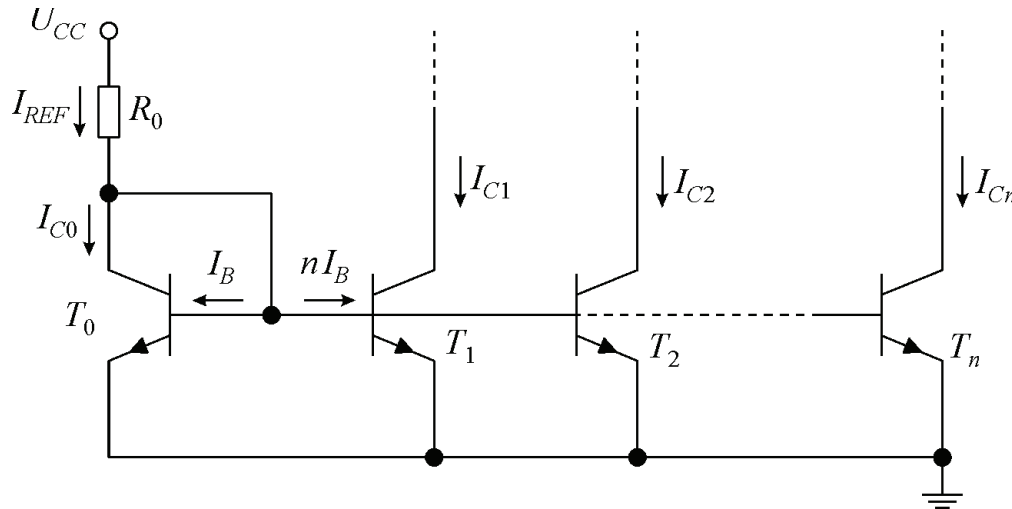
$$I_{REF} = \frac{U_{CC} - U_{BE1}}{R_0} = I_{C1} + 2I_B$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \beta I_B \rightarrow I_{C2} = \frac{I_{REF}}{1 + 2/\beta}$$

Uz $\beta \gg 2 \rightarrow I_{C2} \approx I_{REF} \rightarrow$ **strujno zrcalo**

Izlazni otpor $\rightarrow R_{iz} = r_{ce2} \approx U_A / I_{C2}$

Višestruki strujni izvor

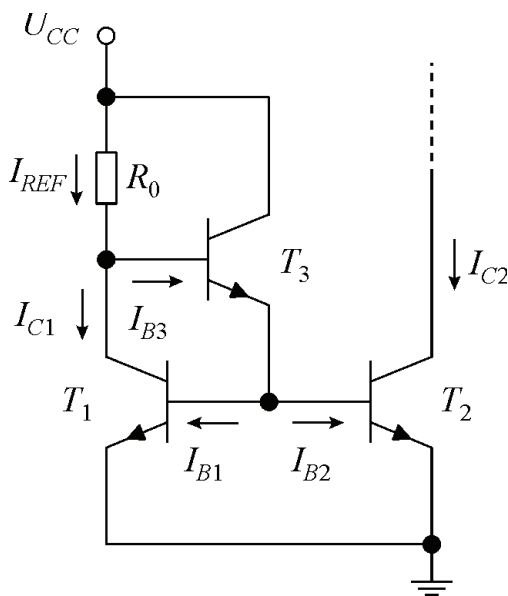


$$I_{REF} = I_{C0} + (1 + n)I_B \quad I_{C0} = I_{C1} = I_{C2} = \dots = I_{Cn} = \beta I_B \rightarrow$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \dots = I_{Cn} = \frac{I_{REF}}{1 + (1 + n)/\beta}$$

Strujni izvor s kompenzacijom baznih struja

Smanjuje utjecaj baznih struja i poboljšava
simetriju struja I_{C2} i I_{REF}

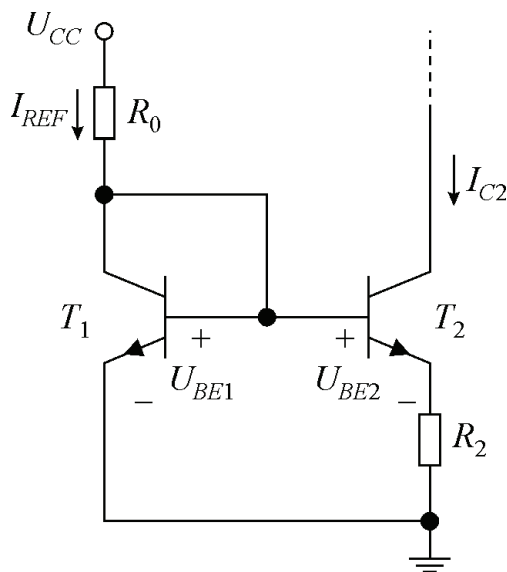


$$\begin{aligned} I_{C1} &= I_{REF} - I_{B3} = \\ &= I_{REF} - \frac{I_{B1} + I_{B2}}{1 + \beta} = I_{REF} - \frac{2I_{C1}}{\beta(1 + \beta)} \end{aligned}$$

$$I_{C2} = I_{C1} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta(1 + \beta)}} \approx \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta^2}}$$

$$I_{REF} = \frac{U_{CC} - U_{BE3} - U_{BE1}}{R_0}$$

Widlarov logaritamski strujni izvor



Koristi se za podešavanje malih struja

Tranzistori rade s različitim naponima U_{BE}

$$U_{BE1} = U_{BE2} + I_{C2} R_2$$

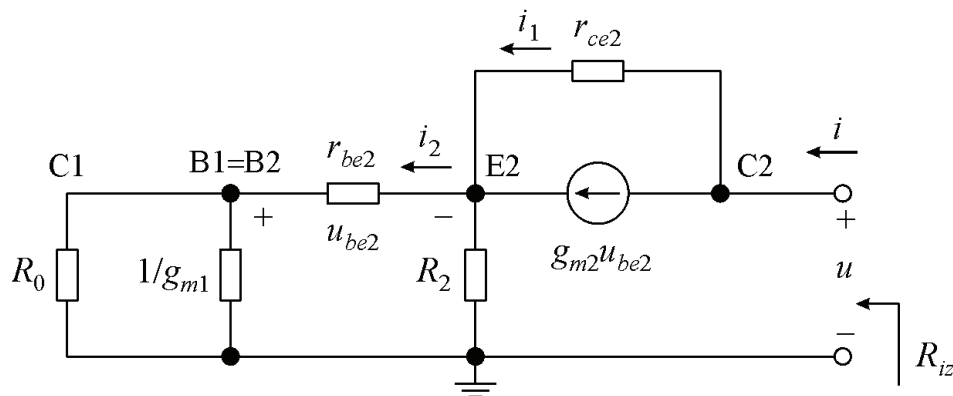
$$I_{REF} = I_{S1} \exp(U_{BE1}/U_T) \quad I_{C2} = I_{S2} \exp(U_{BE2}/U_T)$$

$$\text{uz } I_{S1} = I_{S2} \rightarrow I_{C2} = \frac{U_{BE1} - U_{BE2}}{R_2} = \frac{U_T}{R_2} \ln \left(\frac{I_{REF}}{I_{C2}} \right)$$

$$\text{za struju } I_{C2} \rightarrow R_2 = \frac{U_T}{I_{C2}} \ln \left(\frac{I_{REF}}{I_{C2}} \right)$$

Logaritamski izvor → zbog logaritamskog odnosa struja.

Widlarov logaritamski strujni izvor – izlazni otpor



dinamički otpor tranzistora T_1

$$\frac{U_T}{(1 + \beta) I_{B1}} = \frac{r_{be1}}{1 + h_{fe1}} \approx \frac{1}{g_{m1}}$$

Uz $R_0 \gg 1/g_{m1}$ i $1/g_{m1} \ll r_{be2}$

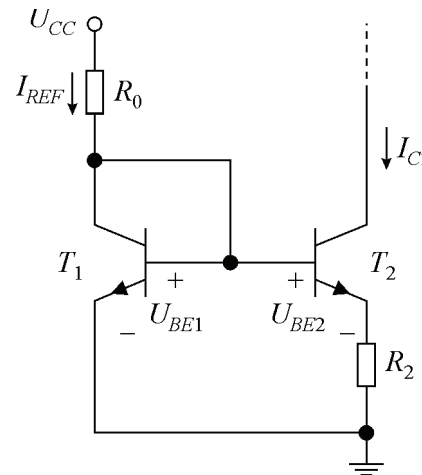
$$i_2 = \frac{R_2}{r_{be2} + R_2} i = -\frac{u_{be2}}{r_{be2}}, \quad i_1 = i - g_{m2} u_{be2} = i \left[1 + g_{m2} (r_{be2} \parallel R_2) \right], \quad u = r_{ce2} i_1 + (r_{be2} \parallel R_2) i$$

$$R_{iz} = \frac{u}{i} = r_{ce2} \left[1 + g_{m2} (r_{be2} \parallel R_2) \right] + r_{be2} \parallel R_2 \approx r_{ce2} \left[1 + g_{m2} (r_{be2} \parallel R_2) \right]$$

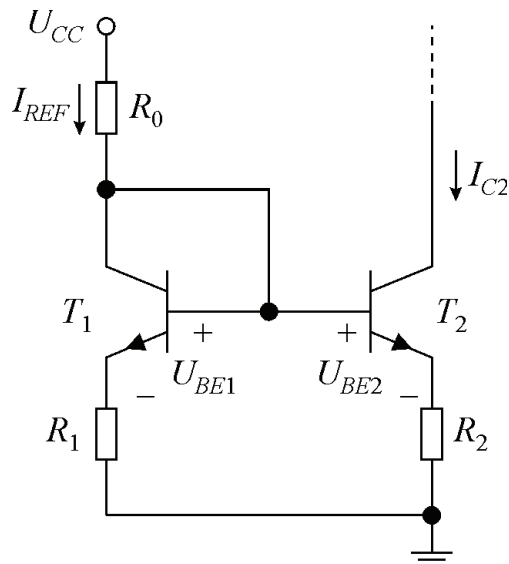
Uz $r_{be2} \gg R_2 \rightarrow R_{iz} = r_{ce2} (1 + g_{m2} R_2)$

Primjer 8.1

U Widlarovom logaritamskom strujnom izvoru sa slike $U_{CC} = 15 \text{ V}$, $R_0 = 15 \text{ k}\Omega$ i $U_{BE1} = 0,7 \text{ V}$. Parametri tranzistora su $\beta \approx h_{fe} = 100$ i $U_A = 100 \text{ V}$. Kolika je referentna struja I_{REF} ? Koliki mora biti otpor R_2 za struju $I_{C2} = 10 \mu\text{A}$? Izračunati izlazni otpor strujnog izvora. Naponski ekvivalent temperature $U_T = 25 \text{ mV}$.



Widlarov strujni izvor s emitterskim otpornicima



$$U_{BE1} + I_{REF} R_1 = U_{BE2} + I_{C2} R_2$$

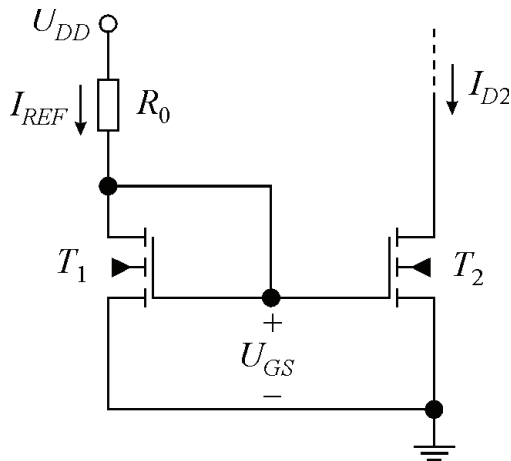
$$U_{BE2} - U_{BE1} = U_T \ln \left(\frac{I_{C2}}{I_{REF}} \right)$$

$$I_{C2} = I_{REF} \frac{R_1}{R_2} \left[1 + \frac{U_T}{I_{REF} R_1} \ln \left(\frac{I_{REF}}{I_{C2}} \right) \right]$$

Uz $I_{REF} R_1 \gg U_T$ i u intervalu struja $\frac{1}{10} < \frac{I_{C2}}{I_{REF}} < 10$

$$I_{C2} \approx I_{REF} \frac{R_1}{R_2}$$

Strujni izvor s MOS tranzistorima



Oba tranzistora rade s jednakim naponima U_{GS} i u području zasićenja

$$I_{REF} = \frac{U_{DD} - U_{GS}}{R_0} = I_{D1} = \frac{K'_n}{2} \frac{W_1}{L_1} (U_{GS} - U_{GS0n})^2$$

$$I_{D2} = \frac{K'_n}{2} \frac{W_2}{L_2} (U_{GS} - U_{GS0n})^2, \quad K'_n = \mu_n C_{ox}$$

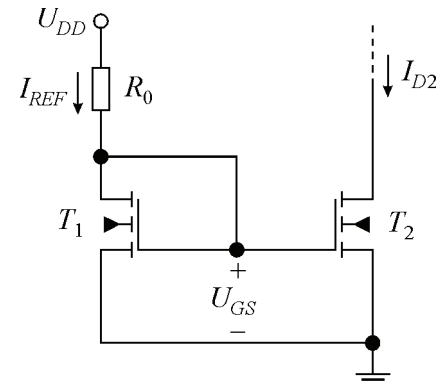
$$I_{D2} = I_{REF} \frac{W_2/L_2}{W_1/L_1}$$

Uz jednake tranzistore $\rightarrow I_{D2} = I_{REF} \rightarrow$ **strujno zrcalo**

Izlazni otpor $\rightarrow R_{iz} = r_{d2} \approx 1/\lambda_n I_{D2}$

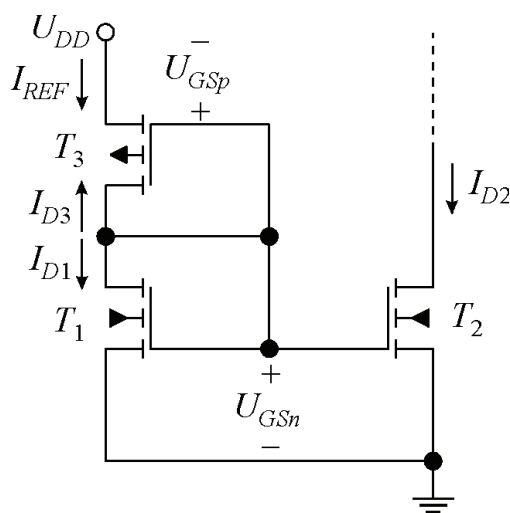
Primjer 8.2

U strujnom izvoru sa slike $U_{DD} = 2,5 \text{ V}$ i $U_{GS} = 0,8 \text{ V}$. Parametri oba tranzistora su $K'_n = 120 \text{ } \mu\text{A/V}^2$, $U_{GS0n} = 0,5 \text{ V}$ i $\lambda_n = 0,02 \text{ V}^{-1}$. Dužine kanala oba tranzistora su $L = 1 \text{ } \mu\text{m}$. Odrediti otpor R_0 i širine kanala tranzistora za struje $I_{REF} = I_{D2} = 25 \text{ } \mu\text{A}$. Odrediti minimalni pad napona na izvoru, te izlazni otpor.



Podešavanje referentne struje MOS tranzistorom

Otpornik R_0 zamjenjuje se pMOS tranzistorom



$$U_{DD} = -U_{GS3} + U_{GS1}$$

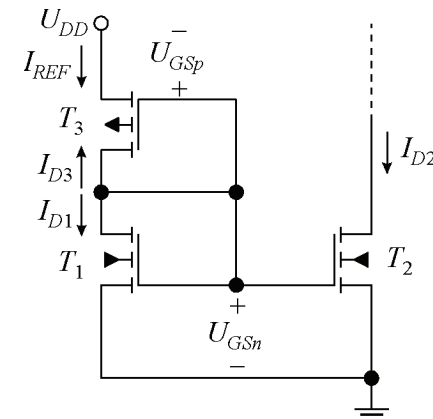
$$I_{REF} = I_{D1} = -I_{D3}$$

$$\begin{aligned} I_{D3} &= \frac{K'_p}{2} \frac{W_3}{L_3} (U_{GS3} - U_{GS0p})^2 = \\ &= \frac{K'_p}{2} \frac{W_3}{L_3} (U_{GS1} - U_{DD} - U_{GS0p})^2 \end{aligned}$$

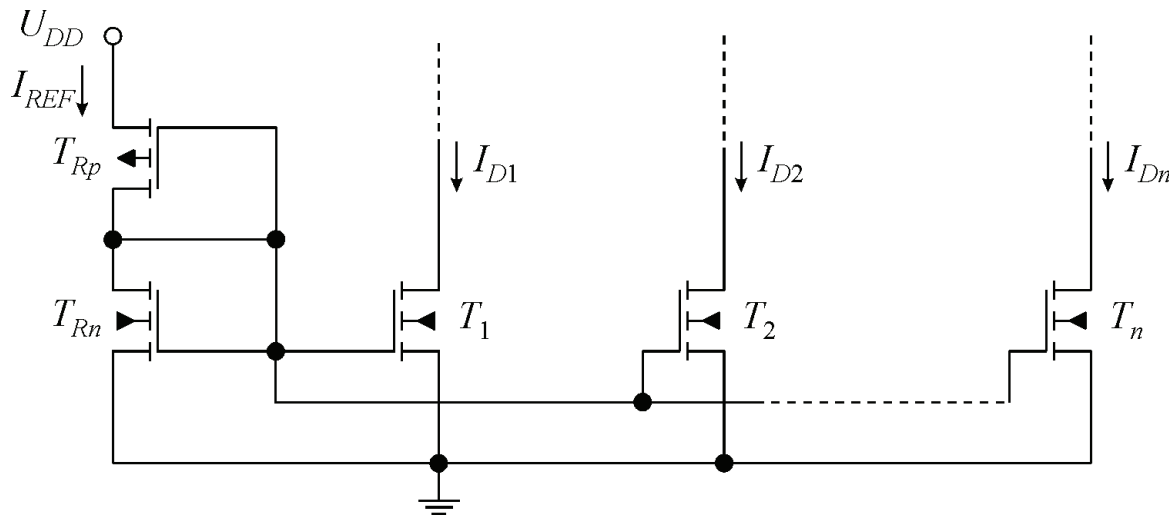
$$K'_p = -\mu_p C_{ox}$$

Primjer 8.3

Odrediti omjer širine i dužine kanala W/L tranzistora T_3 u strujnom izvoru sa slike za struje $I_{REF} = I_{D2} = 25 \mu\text{A}$. Napon napajanja $U_{DD} = 2,5 \text{ V}$. Za $n\text{MOS}$ tranzistor parametri su $K'_n = 120 \mu\text{A}/\text{V}^2$ i $U_{GS0n} = 0,5 \text{ V}$, a za $p\text{MOS}$ tranzistor $K'_p = -40 \mu\text{A}/\text{V}^2$ i $U_{GS0n} = -0,5 \text{ V}$. Dimenzije kanala tranzistora T_1 i T_2 su $W/L = 4,6 \mu\text{m}/1 \mu\text{m}$. Zanemariti modulacije dužina kanala.

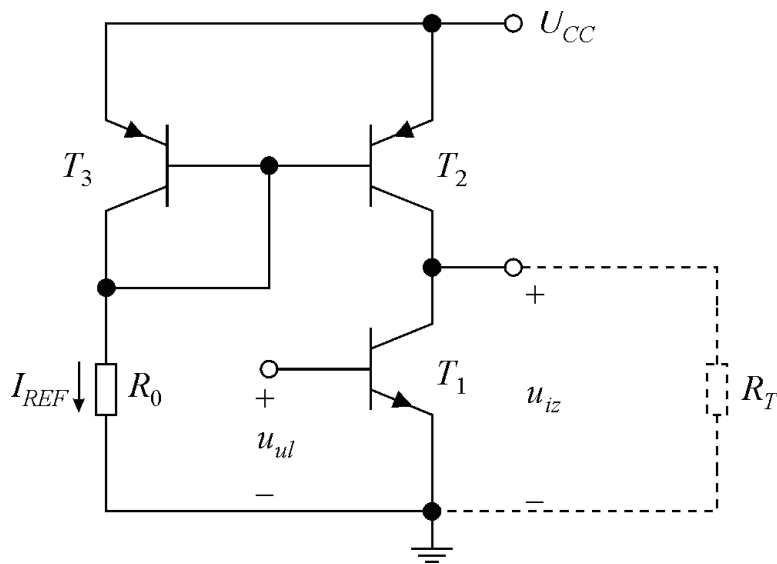


Višestruki strujni izvor s MOS tranzistorima



$$I_{D1} = I_{REF} \frac{W_1/L_1}{W_{Rn}/L_{Rn}} \quad I_{D2} = I_{REF} \frac{W_2/L_2}{W_{Rn}/L_{Rn}} \quad I_{Dn} = I_{REF} \frac{W_n/L_n}{W_{Rn}/L_{Rn}}$$

Pojačalo u spoju zajedničkog emitera

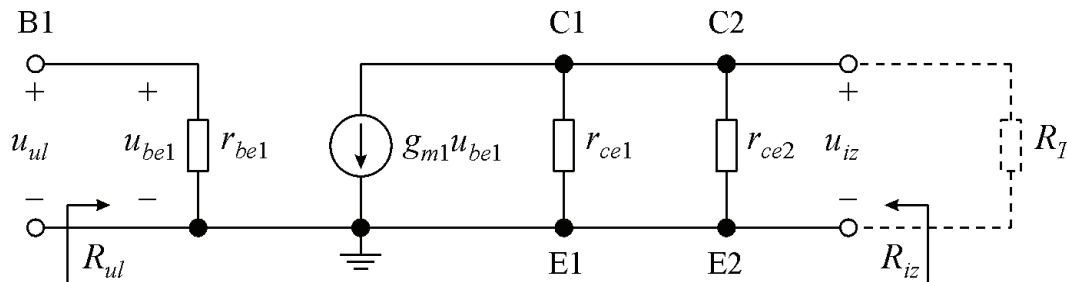


$T_1 \rightarrow$ aktivni element

$T_2 \rightarrow$ aktivno trošilo

T_2 i $T_3 \rightarrow$ strujno zrcalo

Pojačalo u spoju zajedničkog emitera – nadomjesna shema



$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{u_{iz}}{u_{be1}} = -g_{m1}(r_{ce1} \parallel r_{ce2}) = -\frac{g_{m1}}{1/r_{ce1} + 1/r_{ce2}} = -\frac{I_{C1}/U_T}{I_{C1}/U_{A1} + I_{C2}/U_{A2}}$$

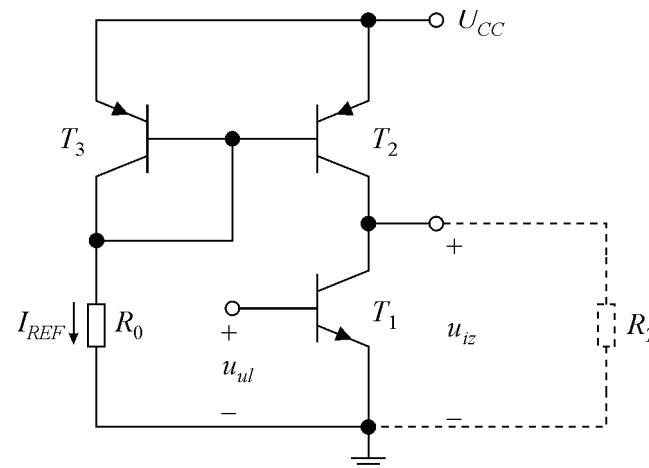
$$A_V = -\frac{U_{Aef}}{U_T}, \quad \frac{1}{U_{Aef}} = \frac{1}{U_{A1}} + \frac{1}{-U_{A2}}$$

$$R_{ul} = r_{be1} = \frac{U_T}{I_{B1}} = \frac{U_T \beta_1}{I_{C1}} \approx \frac{h_{fe1}}{g_{m1}}$$

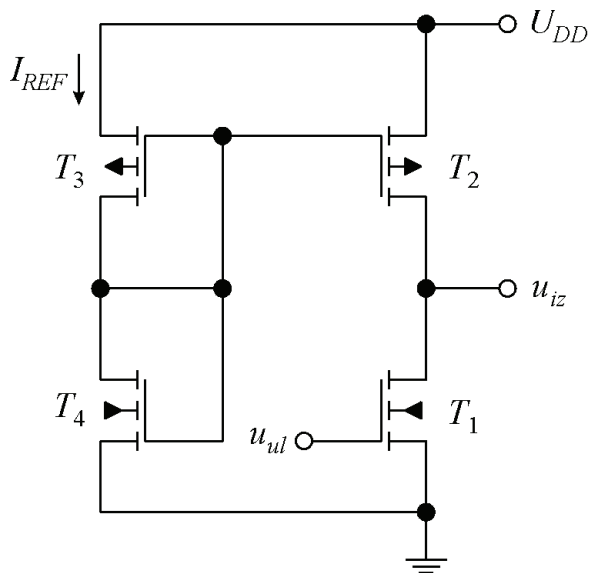
$$R_{iz} = r_{ce1} \parallel r_{ce2} = \frac{1}{I_{C1}/U_{A1} + I_{C2}/U_{A2}} = \frac{U_{Aef}}{I_{C1}} = \frac{1}{g_{m1}} \frac{U_{Aef}}{U_T}$$

Primjer 8.4

Izračunati naponsko pojačanje $A_V = u_{iz}/u_{ul}$ neopterećenog pojačala u spoju zajedničkog emitera s aktivnim trošilom prema slici. Napon napajanja $U_{CC} = 15\text{ V}$, otpor referentne grane strujnog izvora $R_0 = 20\text{ k}\Omega$, a Earlijevi naponi aktivnog tranzistora T_1 i aktivnog trošila T_2 su $U_{A1} = 100\text{ V}$ i $U_{A2} = -50\text{ V}$.



Pojačalo u spoju zajedničkog uvoda

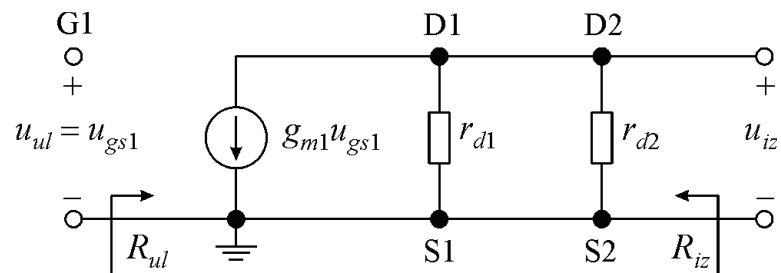


$T_1 \rightarrow$ aktivni element

$T_2 \rightarrow$ aktivno trošilo

T_2 i $T_3 \rightarrow$ strujno zrcalo

Pojačalo u spoju zajedničkog uvoda – nadomjesna shema



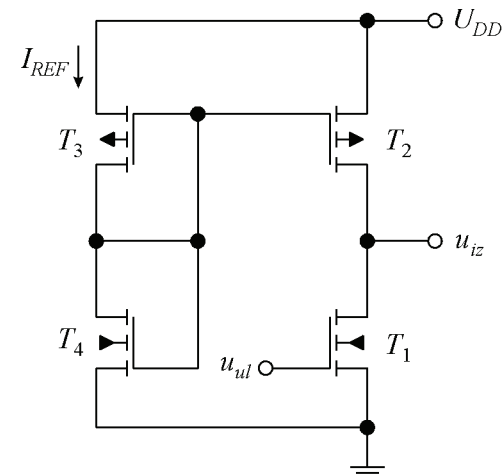
$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{u_{iz}}{u_{gs1}} = -g_{m1} (r_{d1} \parallel r_{d2}) = -\frac{g_{m1}}{1/r_{d1} + 1/r_{d2}} =$$

$$= -\frac{\sqrt{2K_1 I_{D1}}}{\lambda_1 I_{D1} + \lambda_2 I_{D2}} = -\frac{\sqrt{2K_1}}{\lambda_1 - \lambda_2} \frac{1}{\sqrt{I_{REF}}}$$

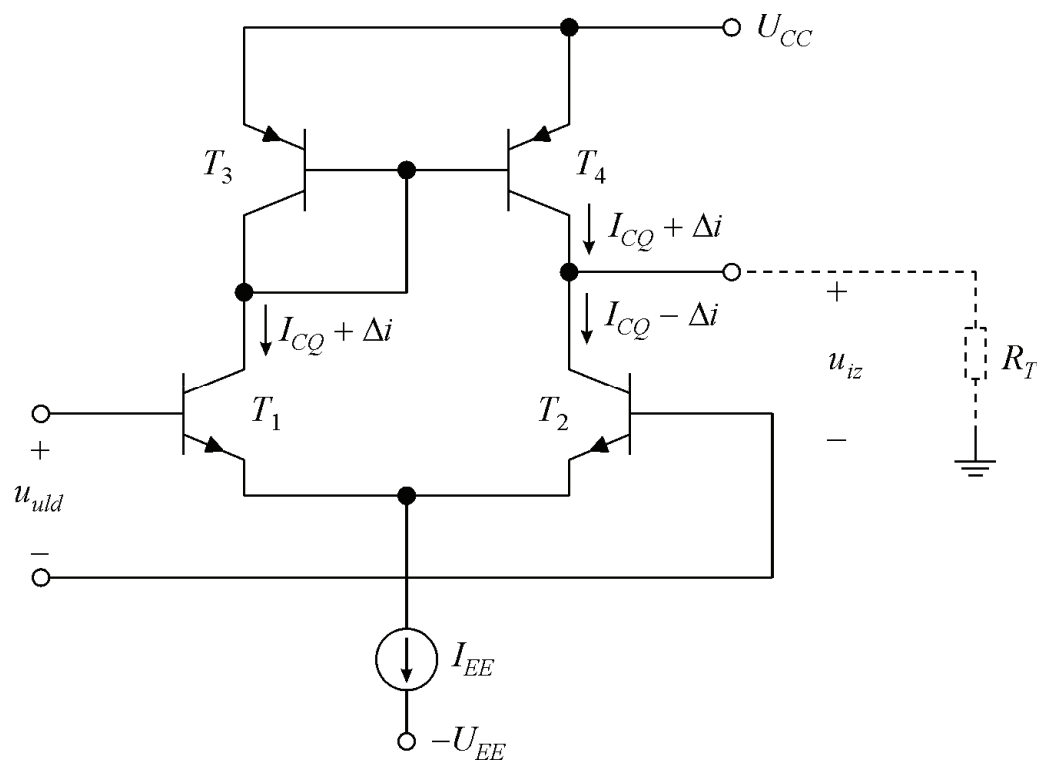
$$R_{iz} = r_{d1} \parallel r_{d2} = \frac{1}{\lambda_1 I_{D1} + \lambda_2 I_{D2}} = \frac{1}{I_{REF} (\lambda_1 - \lambda_2)}$$

Primjer 8.5

Odrediti naponsko pojačanje $A_V = u_{iz} / u_{ul}$ i izlazni otpor R_{iz} pojačala u spoju zajedničkog uvoda prema slici. Referentna struja $I_{REF} = 25 \mu\text{A}$. Za $n\text{MOS}$ tranzistor parametri su $K'_n = 120 \mu\text{A}/\text{V}^2$ i $\lambda_n = 0,02 \text{ V}^{-1}$, a za $p\text{MOS}$ tranzistor $K'_p = -40 \mu\text{A}/\text{V}^2$ i $\lambda_p = -0,01 \text{ V}^{-1}$. Dimenzije kanala tranzistora T_1 su $L_1 = 1 \mu\text{m}$, $W_1 = 4,6 \mu\text{m}$.



Diferencijsko pojačalo s bipolarnim tranzistorima



$$\Delta i = g_{m2} \frac{u_{uld}}{2}$$

$$g_{m2} = \frac{I_{CQ2}}{U_T} = \frac{I_{EE}}{2U_T}$$

$$u_{iz} = 2\Delta i (r_{ce2} \parallel r_{ce4})$$

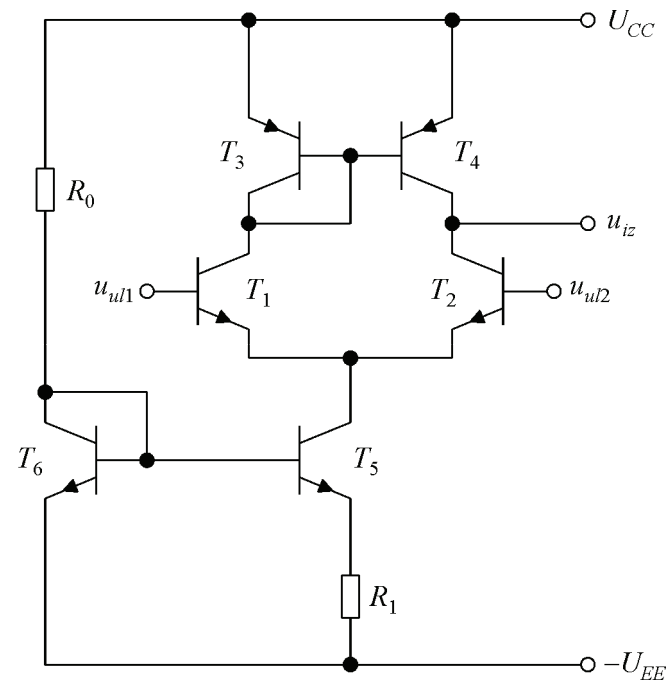
$$A_{Vd} = \frac{u_{iz}}{u_{uld}} = g_{m2} (r_{ce2} \parallel r_{ce4})$$

$$R_{iz} = r_{ce2} \parallel r_{ce4}$$

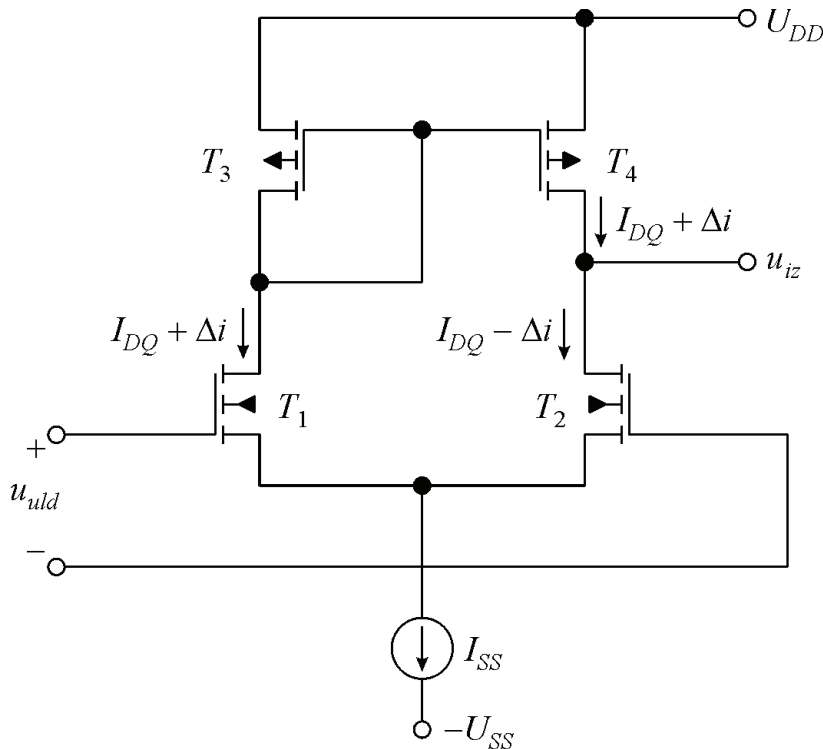
$$R_{uld} = 2r_{be2} = 2 \frac{h_{fe2}}{g_{m2}} = 2 \frac{\beta_2 U_T}{I_{CQ2}}$$

Primjer 8.6

Za diferencijsko pojačalo na slici odrediti statičke struje svih tranzistora, naponsko pojačanje diferencijskog signala $A_{Vd} = u_{iz}/(u_{ul1} - u_{ul2})$, te ulazni otpor R_{uld} za diferencijski signal i izlazni otpor R_{iz} . Zadano je $U_{CC} = -U_{EE} = 15 \text{ V}$, $R_0 = 25 \text{ k}\Omega$ i $R_1 = 12 \text{ k}\Omega$. Za *npn* tranzistore parametri su $\beta \approx h_{fe} = 150$ i $U_A = 120 \text{ V}$, a za *pnp* tranzistore $\beta \approx h_{fe} = 50$ i $U_A = -50 \text{ V}$. Napon $U_{BEQ6} = 0,7 \text{ V}$, a naponski ekvivalent temperature $U_T = 25 \text{ mV}$.



CMOS diferencialno pojačalo



$$\Delta i = g_{m2} \frac{u_{uld}}{2}$$

$$u_{iz} = 2 \Delta i (r_{d2} \parallel r_{d4})$$

$$A_{Vd} = \frac{u_{iz}}{u_{uld}} = g_{m2} (r_{ce2} \parallel r_{ce4})$$

$$R_{iz} = r_{d2} \parallel r_{d4}$$

Operacijska pojačala

Operacijska pojačala → najpoznatiji i najčešće primjenjivani analogni integrirani sklopovi

Imaju diferencijski ulaz i najčešće s jedan izlaz.

Svojstva idealnog operacijskog pojačala:

- ☐ beskonačno naponsko pojačanje,
- ☐ beskonačni ulazni otpor,
- ☐ beskonačnu širinu frekvencijskog pojasa,
- ☐ izlazni otpor jednak nuli.

Realna integrirana operacijska pojačala po svojim se svojstvima manje ili više približavaju svojstvima idealnog operacijskog pojačala.

Odstupanja se opisuju s nizom parametara

Parametri operacijskih pojačala (1)

Ulazni napon namještanja U_N (engl. *input offset voltage*) → napon koji treba spojiti na diferencijski ulaz da bi izlazni napon bio jednak nuli → posljedica je nesimetrije ulaznog diferencijskog stupnja → mijenja se s temperaturom

Ulazna struja napajanja I_B (engl. *input bias current*) → srednja vrijednost istosmjernih ulaznih struja pojačala

Ulazna struja namještanja I_N (engl. *input offset current*) → razlika ulaznih struja pojačala uzrokovana nesimetrijom ulaznog stupnja pojačala

Ulazni otpor R_{ul} (engl. *input resistance*) → ovisi o konfiguraciji i struji napajanja ulaznog stupnja.

Izlazni otpor R_{iz} (engl. *output resistance*) → ovisi o konfiguraciji izlaznog stupnja i izboru strujne zaštite

Raspon ulaznog zajedničkog napona (engl. *input common-mode voltage range*) → maksimalni iznos ulaznog napona koji se istovremeno može priključiti na oba ulaza, a uz koji će pojačalo ispravno raditi

Parametri operacijskih pojačala (2)

Faktor potiskivanja zajedničkog signala (engl. *common-mode rejection ratio - CMRR*) → omjer pojačanja diferencijskog i zajedničkog signala

Faktor potiskivanja napona napajanja (engl. *power supply rejection ratio - PSRR*) → promjena ulaznog diferencijskog signala po jediničnoj promjeni napona napajanja

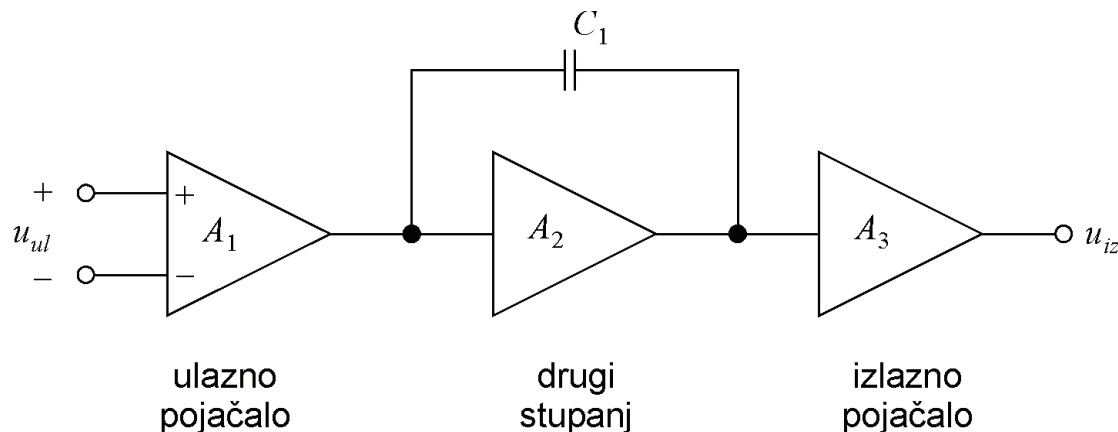
Naponsko pojačanje pojačala bez povratne veze A_{VOP0} (engl. *open-loop voltage gain*) → omjer izlaznog i diferencijskog ulaznog napona operacijskog pojačala na niskim frekvencijama bez primijenjene povratne veze

Granična frekvencija jediničnog pojačanja (engl. *unity-gain bandwidth*) → frekvencija na kojoj iznos pojačanja operacijskog pojačala bez povratne veze pada na 1

Brzina promjene izlaznog napona (engl. *slew rate*) → najveća brzina kojom se može mijenjati izlazni napon pri velikom signalu na ulazu

Vrijeme postavljanja (engl. *settling time*) → vrijeme potrebno da se, uz skokovitu promjenu ulaznog napona, izlazni napon ustali unutar $\pm 0,1\%$ konačne vrijednosti

Trostupanjsko operacijsko pojačalo

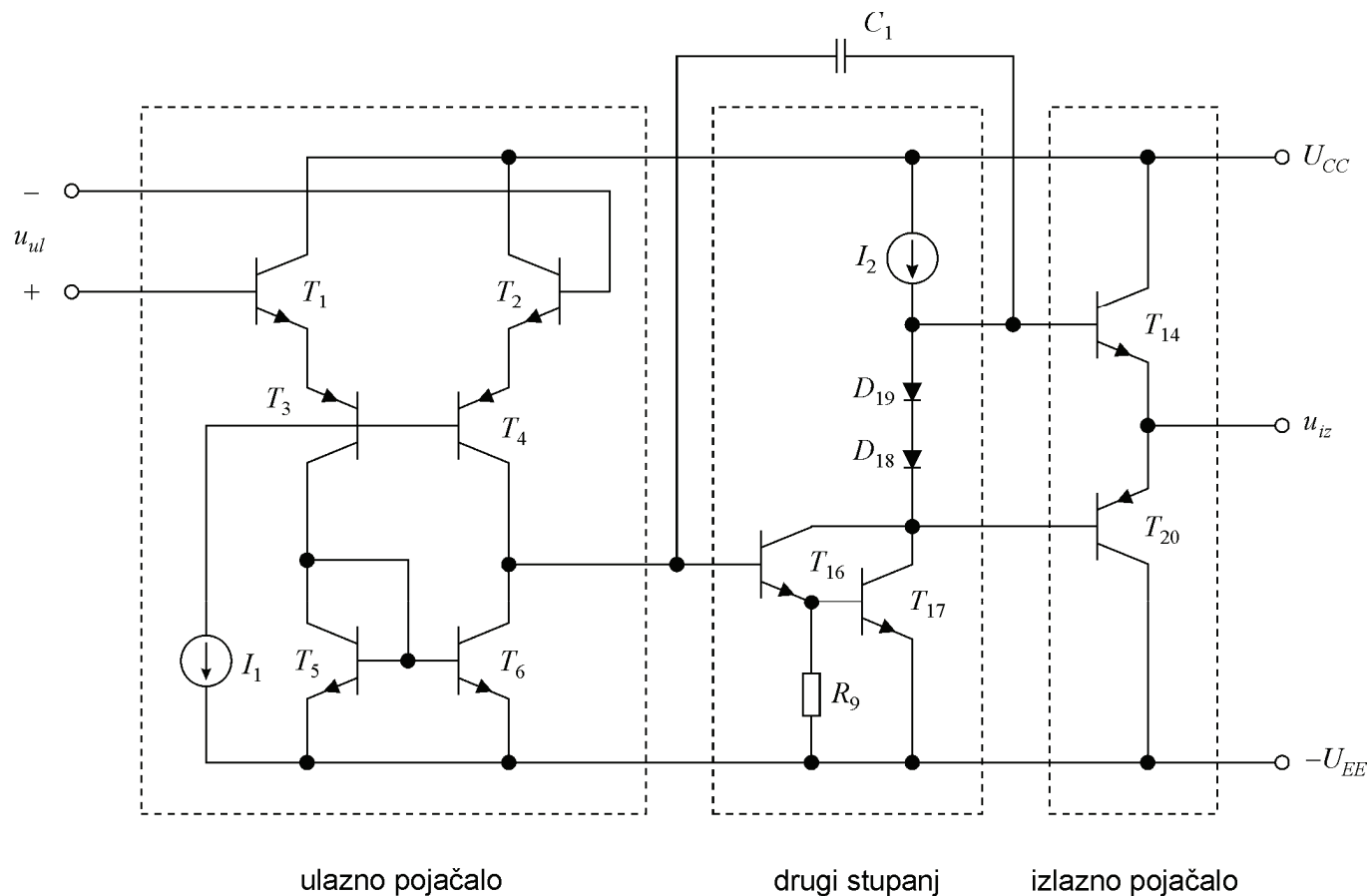


ulazno pojačalo → diferencijsko pojačalo

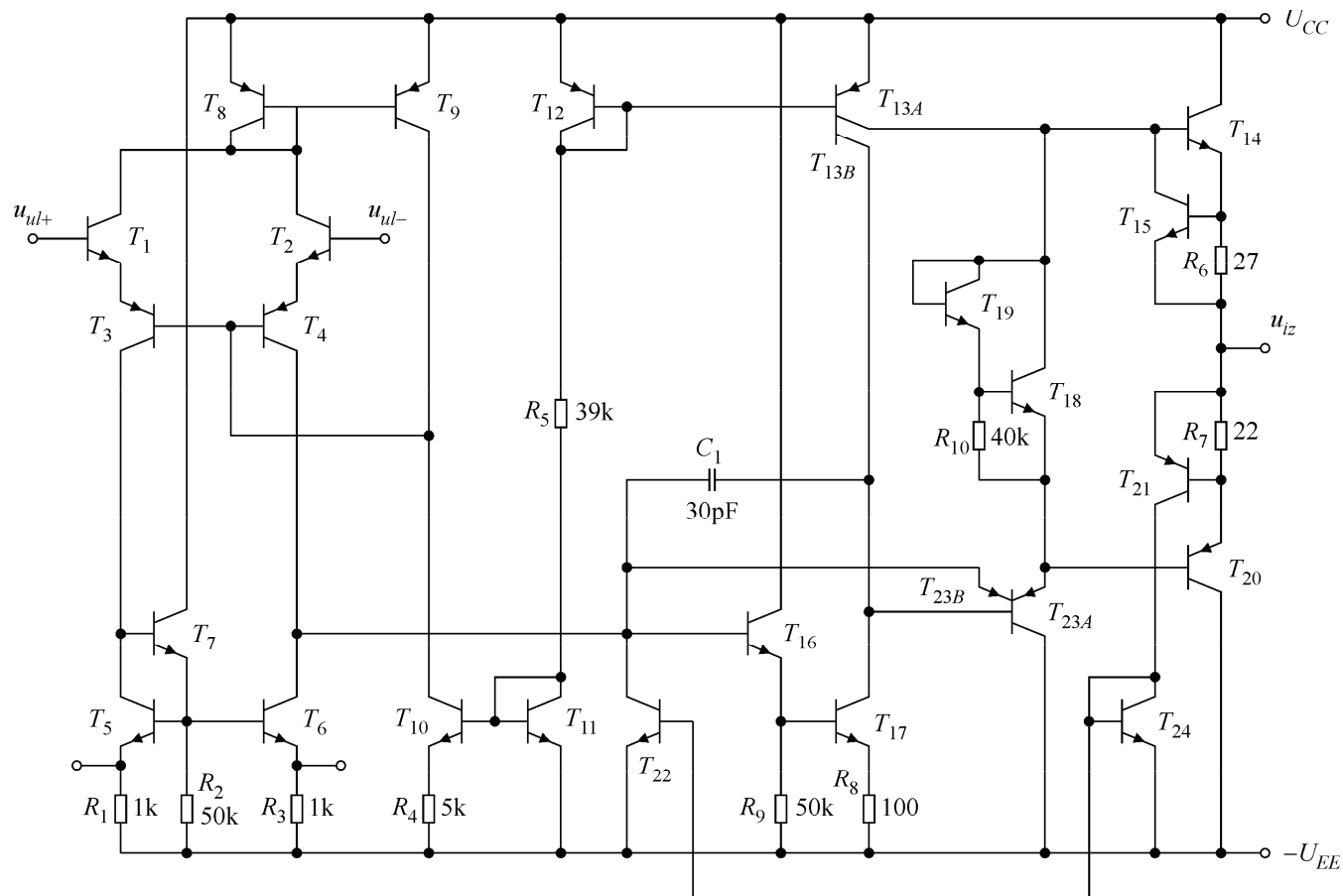
drugi stupanj → naponsko pojačalo

izlazno pojačalo → pojačalo snage

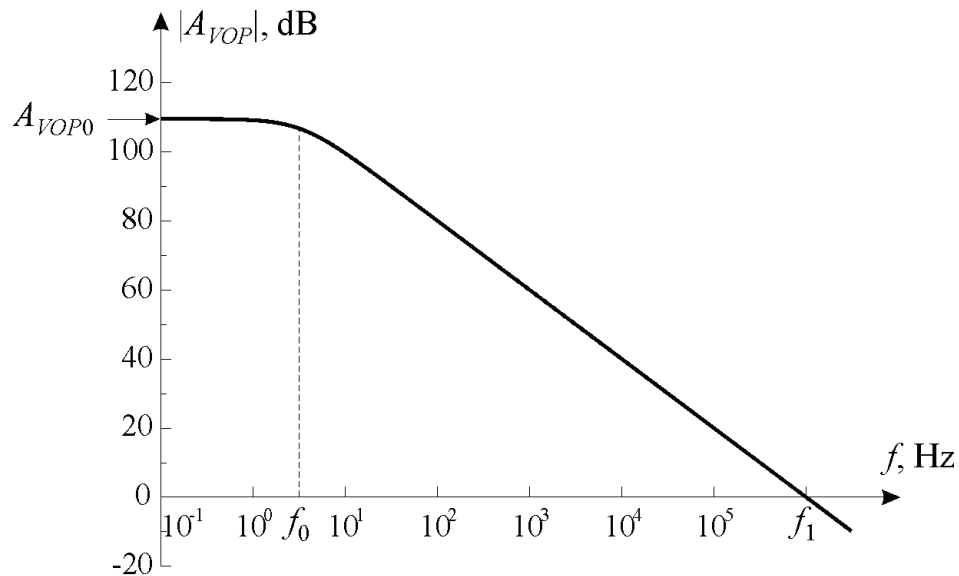
Operacijsko pojačalo 741 – pojednostavljena shema



Operacijsko pojačalo 741



Frekvencijska kompenzacija



Kompenzacija dominantnim
polom

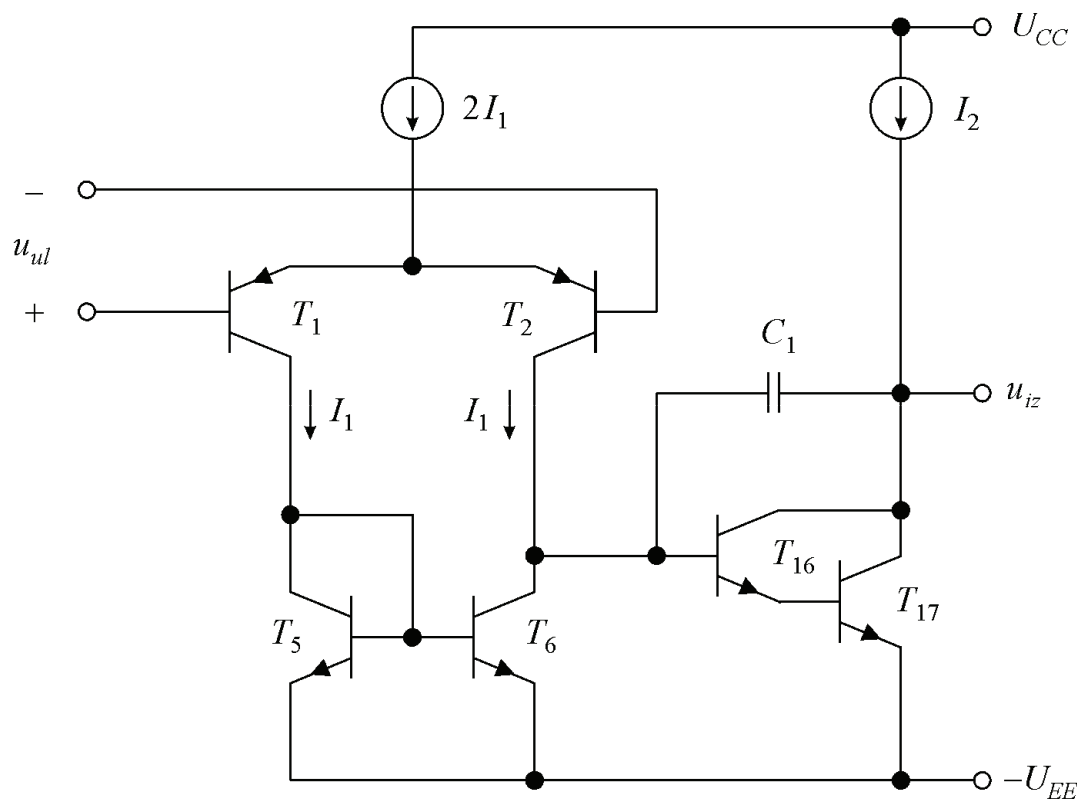
$$C_1 = 30 \text{ pF}$$

$$A_{VOP0} = 3 \cdot 10^5 = 110 \text{ dB}$$

$$f_0 = 3,3 \text{ Hz}$$

$$f_1 = A_{VOP0} f_0 = 1 \text{ MHz}$$

Brzina promjene izlaznog napona



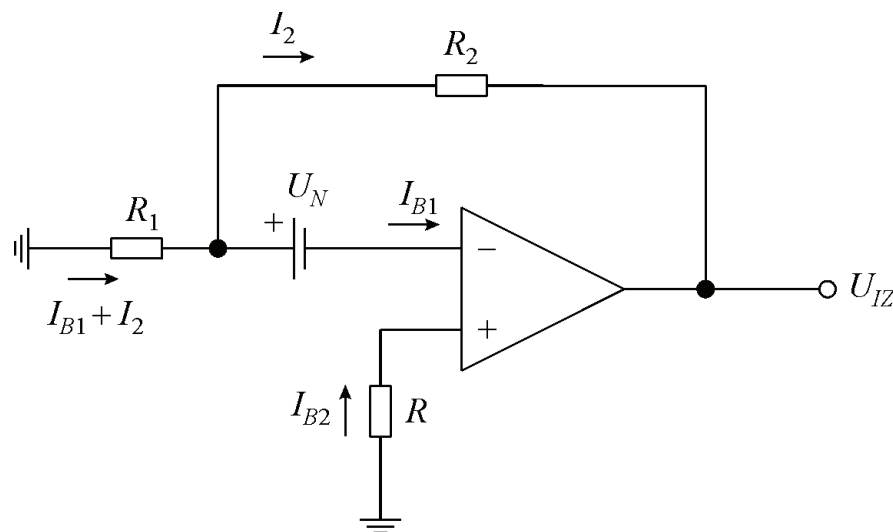
$$\left. \frac{du_{iz}}{dt} \right|_{\max} = \frac{2I_1}{C_1}$$

$$2I_1 \approx 20 \mu\text{A}$$

$$C_1 = 30 \text{ pF}$$

$$\left. \frac{du_{iz}}{dt} \right|_{\max} \approx 0,6 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Utjecaj ulaznih struja i debalanasa na izlazni napon



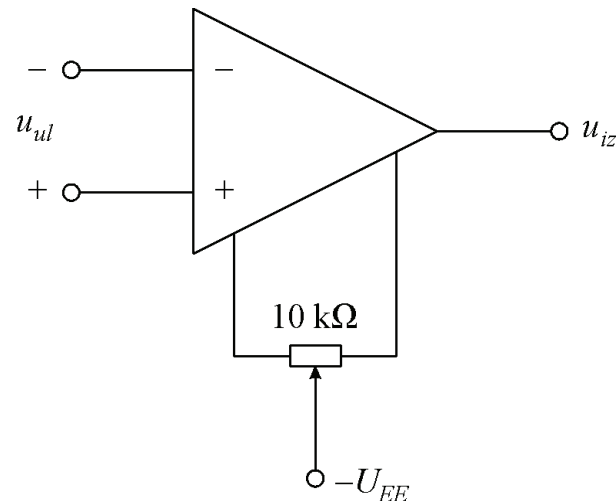
$$(I_{B1} + I_2)R_1 + I_2 R_2 + U_{IZ} = 0$$

$$(I_{B1} + I_2)R_1 + U_N - I_{B2} R = 0$$

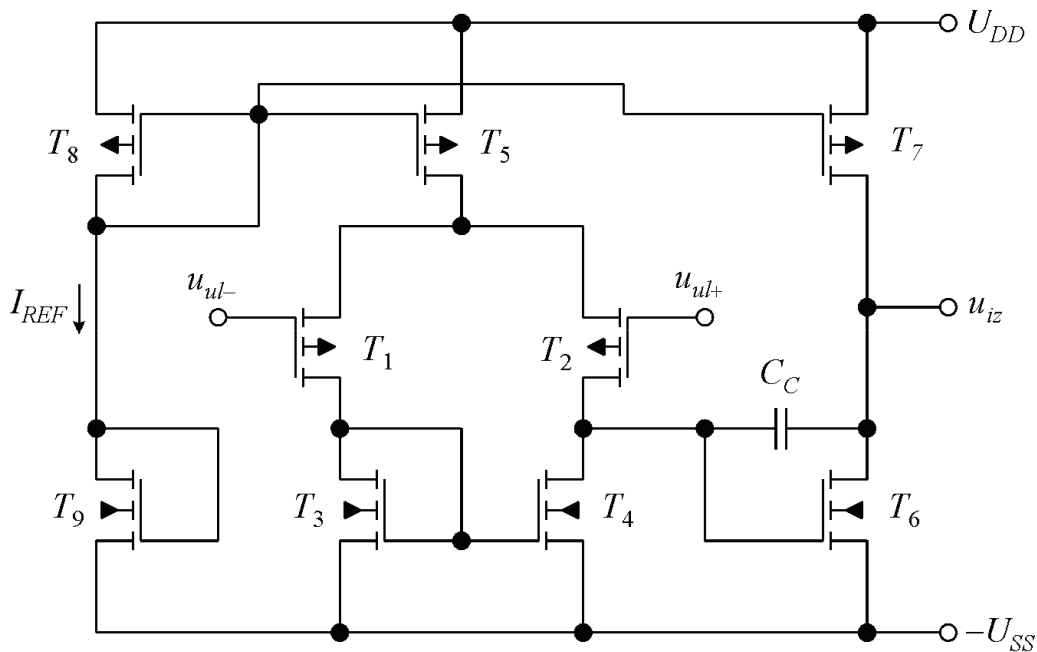
$$U_{IZ} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_N + I_{B1} R_2 - I_{B2} R \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$\text{uz } R = R_1 \parallel R_2 \rightarrow U_{IZ} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_N + I_N R_2, \quad I_N = I_{B1} - I_{B2}$$

Otklanjanje debalanasa kod operacijskog pojačala 741



CMOS operacijsko pojačalo



$$A_{V1} = -g_{m2}(r_{d2} \parallel r_{d4})$$

$$A_{V2} = -g_{m6}(r_{d6} \parallel r_{d7})$$

$$A_{VOP} = A_{V1} A_{V2}$$

$$\left. \frac{du_{IZ}}{dt} \right|_{\max} = \frac{|I_{D5}|}{C_C}$$