

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

Elektronika 2

Željko Butković

3. Izlazna pojačala

Izlazna pojačala

Signalna pojačala → pojačanje signala (napona ili struje) uz manju razinu snage izlaznog signala.

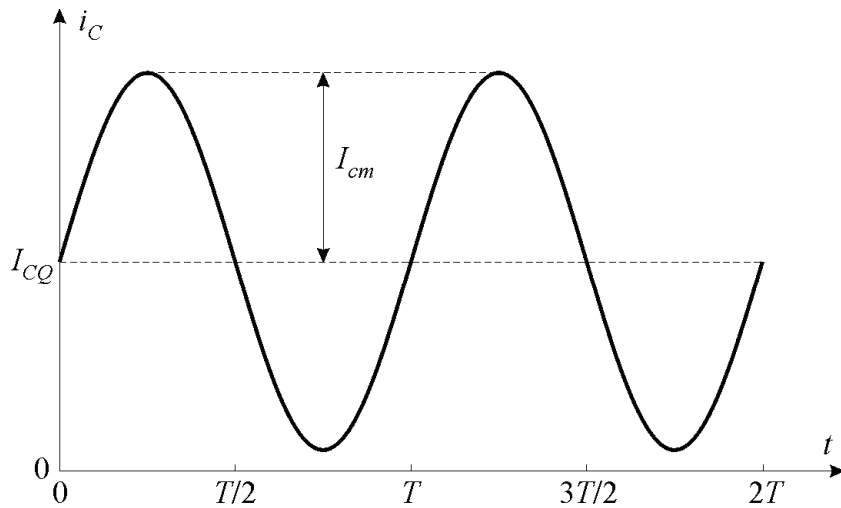
Na izlazu složenih pojačala → **izlazna pojačala** → osiguravaju izlazni signal većeg iznosa snage

Izlazna pojačala s većim razinama snage izlaznog signala → **pojačala snage**

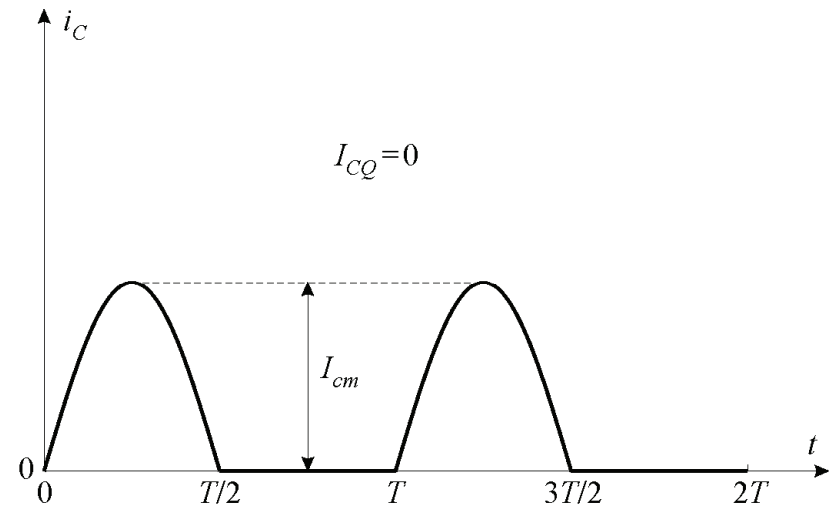
Problem → **linearnost** pojačala → tranzistori ne rade u linearnom režimu

Osnovno svojstvo → **djelotvornost** → kako predati trošilu signal velike razine snage, a da je pri tome potrošnja snage izlaznog pojačala što manja

Klasifikacija



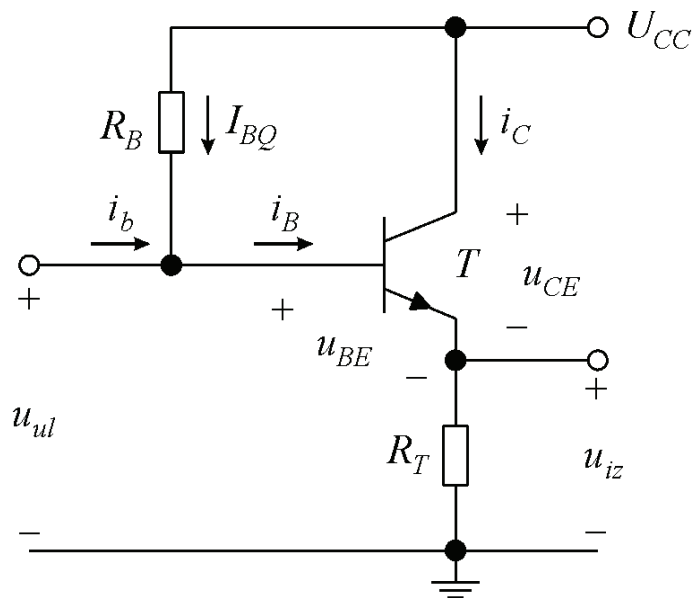
klasa A



klasa B

Izlazno pojačalo klase A

Za dobar prijenos snage → izlazni otpor pojačala što bliži otporu trošila
Za trošila malog otpora → emittersko sljedilo



U složenom pojačalu → statiku izlaznog pojačala može osigurati prethodni stupanj

Odnosi snaga

Snaga izvora napajanja

$$p_{CC}(t) = U_{CC}(I_{BQ} + i_c) \approx U_{CC}(I_{CQ} + i_c) = U_{CC}(I_{CQ} + I_{cm} \sin \omega t)$$
$$P_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{CC}(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_{CC}(I_{CQ} + I_{cm} \sin \omega t) d\omega t = U_{CC} I_{CQ}$$

Snaga trošila

$$p_{RT}(t) = R_T i_C^2 = R_T (I_{CQ} + i_c)^2 = R_T (I_{CQ}^2 + 2 I_{CQ} I_{cm} \sin \omega t + I_{cm}^2 \sin^2 \omega t)$$
$$P_{RT} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{RT}(t) dt = R_T I_{CQ}^2 + R_T \frac{I_{cm}^2}{2} = R_T I_{CQ}^2 + R_T I_{cef}^2 = P_{RT,DC} + P_{RT,ac}$$

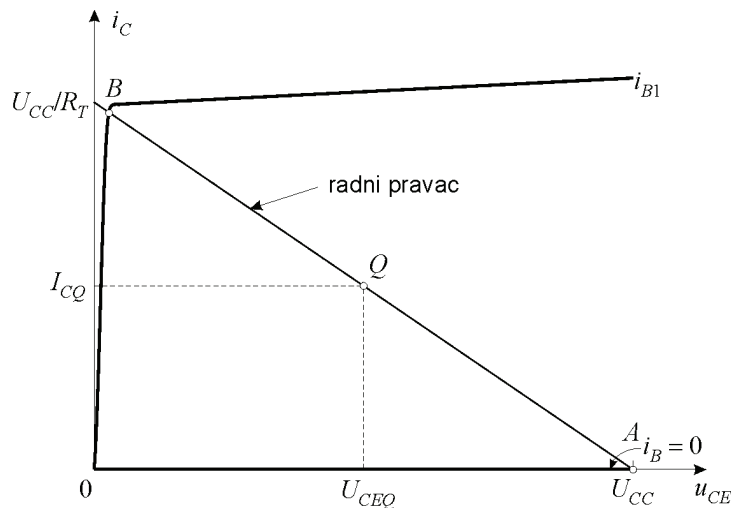
Snaga tranzistora

$$p_T(t) = u_{BE} i_B + u_{CE} i_C = u_{CE} i_C \approx (U_{CC} - R_T i_C) i_C = U_{CC} i_C - R_T i_C^2 = p_{CC}(t) - p_{RT}(t)$$
$$P_T = \frac{1}{T} \int_0^T p_T(t) dt = P_{CC} - P_{RT}$$
$$P_{T,max} = P_{CC} - P_{RT,DC} = U_{CC} I_{CQ} - R_T I_{CQ}^2$$

Djelotvornost

$$\eta \equiv \frac{P_{RT,ac}}{P_{CC}} = \frac{R_T (I_{cm}^2 / 2)}{U_{CC} I_{CQ}}$$

Za maksimalnu djelotvornost \rightarrow maksimalna amplituda I_{cm}

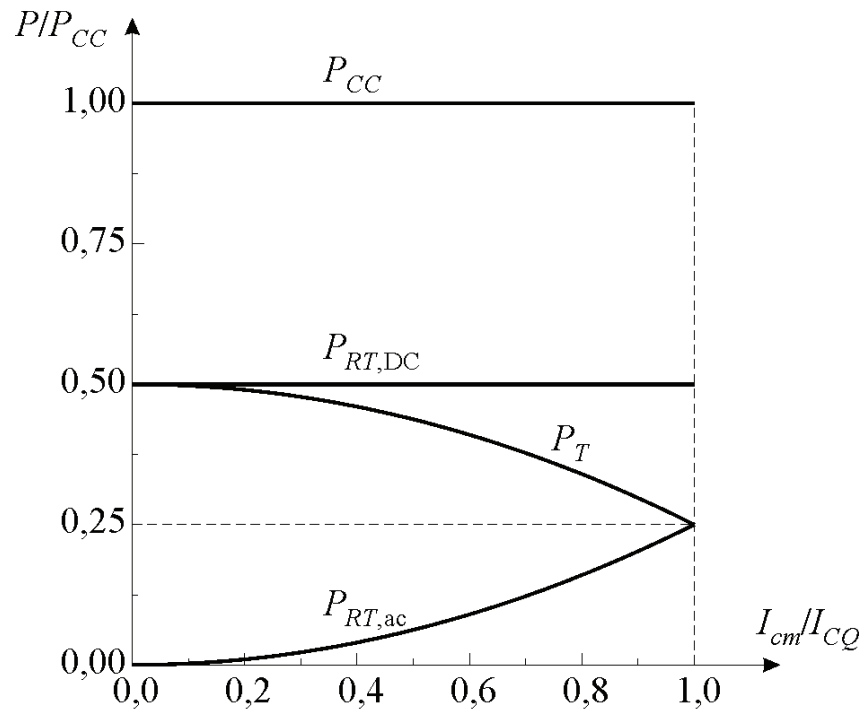


Radna točka na sredini radnog pravca

$$U_{CEQ} = \frac{U_{CC}}{2} \quad I_{CQ} = \frac{U_{CC} - U_{CEQ}}{R_T} = \frac{U_{CC}}{2 R_T}$$

$$\eta_{\max} = \frac{R_T (I_{cm,\max}^2 / 2)}{U_{CC} I_{CQ}} = \frac{R_T I_{CQ}^2}{2 U_{CC} I_{CQ}} = \frac{1}{4} = 25 \%$$

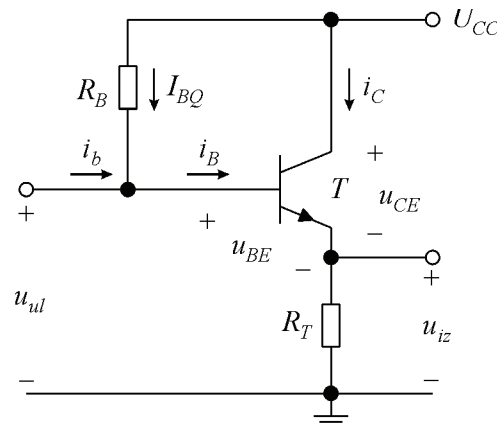
Raspodjele snaga



Glavni nedostatak
→ velika snaga $P_{RT,DC}$

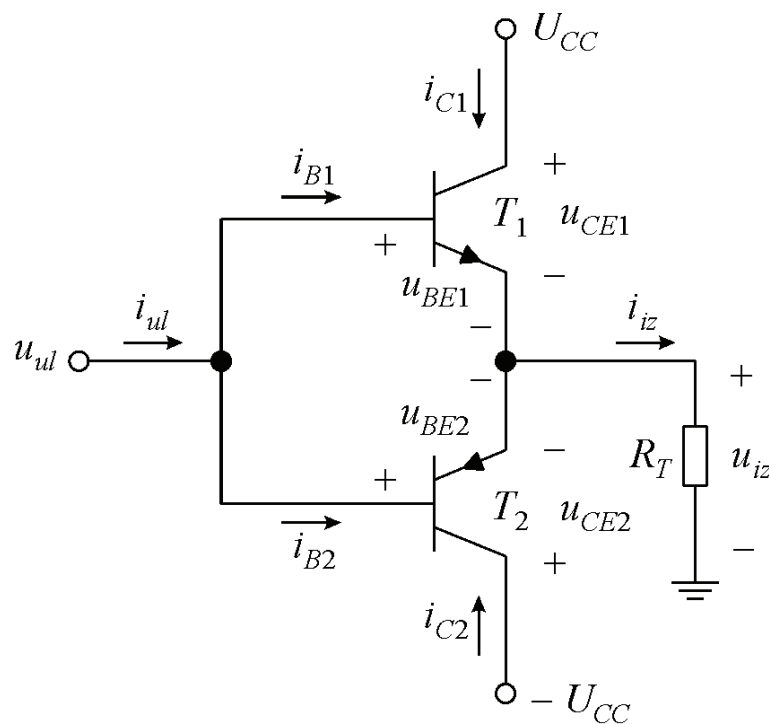
Primjer 3.1

Izlazno pojačalo klase A sa slike radi s naponom napajanja $U_{CC} = 15 \text{ V}$. Kolika je maksimalna srednja snaga signala na trošilu otpora $R_T = 100 \, \Omega$ i koliki mora biti otpor R_B u tom slučaju? Parametri bipolarnog tranzistora su $\beta = 80$ i $U_\gamma = 0,7 \text{ V}$.

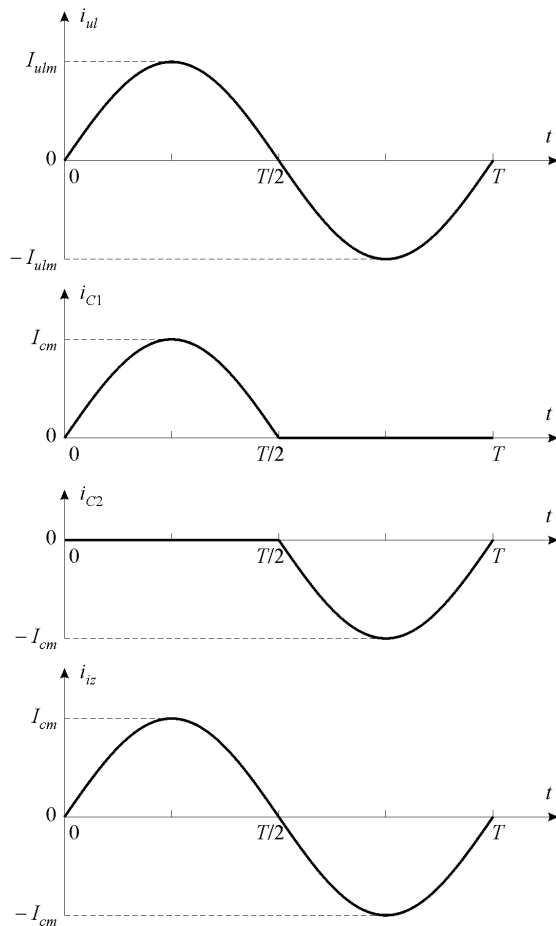


Protutaktno izlazno pojačalo klase B

Djelotvornost se povećava uklanjanjem istosmjjerne snage trošila
Razina snage koju izvor napajanja predaje pojačalu prilagođava se razini signala



Opis rada



$$i_{ul} = i_{B1} + i_{B2}$$

za $i_{ul} > 0 \rightarrow$ vodi T_1 , ne vodi T_2

za $i_{ul} < 0 \rightarrow$ ne vodi T_1 , vodi T_2

$$u_{iz} = i_{iz} R_T = (i_{C1} + i_{C2}) R_T$$

Radne staze tranzistora

$$u_{iz} = U_{CC} - u_{CE1} = -U_{CC} - u_{CE2}$$

$$u_{CE1} = 2U_{CC} + u_{CE2}$$

$$-u_{CE2} = 2U_{CC} - u_{CE1}$$

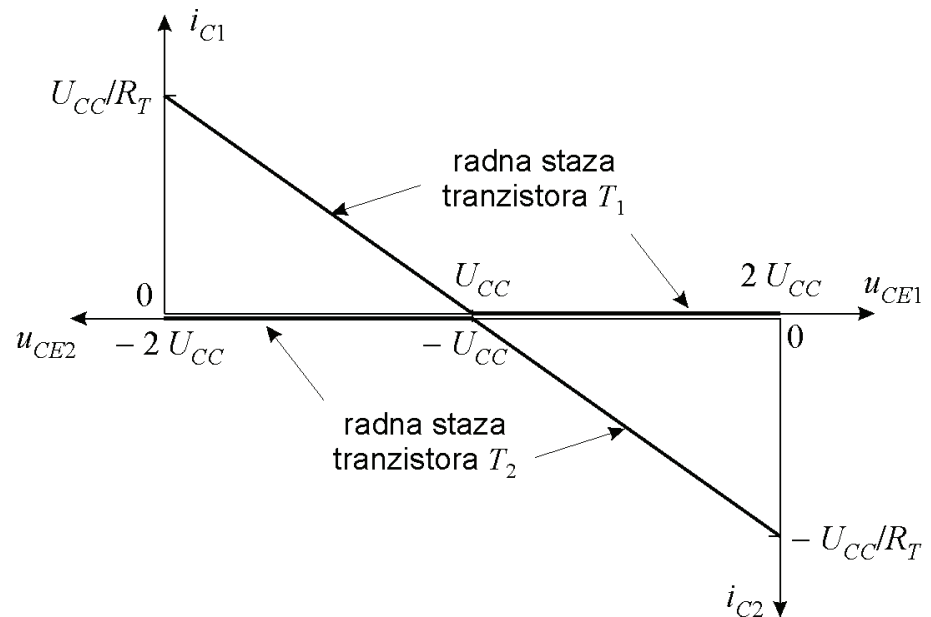
$$u_{CE1} = -u_{CE2} = U_{CC}$$

za $i_{ul} > 0$

$$u_{CE1} = U_{CC} - i_{iz} R_T = U_{CC} - i_{C1} R_T$$

za $i_{ul} < 0$

$$-u_{CE1} = U_{CC} + i_{iz} R_T = U_{CC} + i_{C2} R_T$$



Odnosi snaga (1)

Snaga izvora napajanja

$$p_{CCP}(t) = \begin{cases} U_{CC} i_{C1} & \text{za } 0 < t < T/2 \\ 0 & \text{za } T/2 < t < T \end{cases} \quad p_{CCN}(t) = \begin{cases} 0 & \text{za } 0 < t < T/2 \\ -U_{CC} i_{C2} & \text{za } T/2 < t < T \end{cases}$$

$$P_{CCP} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{CCP}(t) dt = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi} U_{CC} I_{cm} \sin \omega t dt + \int_{\pi}^{2\pi} 0 dt \right] = \frac{U_{CC} I_{cm}}{\pi}$$

$$P_{CCN} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{CCN}(t) dt = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi} 0 dt - \int_{\pi}^{2\pi} U_{CC} I_{cm} \sin \omega t dt \right] = \frac{U_{CC} I_{cm}}{\pi}$$

$$P_{CC} = P_{CCP} + P_{CCN} = \frac{2}{\pi} U_{CC} I_{cm}$$

Odnosi snaga (2)

Snaga trošila

$$p_{RT}(t) = R_T i_{iz}^2 = R_T (i_{C1} + i_{C2})^2 \quad i_{iz} = I_{cm} \sin \omega t$$

$$P_{RT} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{RT}(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{2\pi} R_T I_{cm}^2 \sin^2 \omega t dt = R_T \frac{I_{cm}^2}{2}$$

Snaga tranzistora

$$2 p_T(t) = p_{CC}(t) - p_{RT}(t)$$

$$p_{T1}(t) = \begin{cases} U_{CC} i_{C1} - R_T i_{C1}^2 & \text{za } 0 < t < T/2 \\ 0 & \text{za } T/2 < t < T \end{cases}$$

$$p_{T2}(t) = \begin{cases} 0 & \text{za } 0 < t < T/2 \\ -U_{CC} i_{C2} - R_T i_{C2}^2 & \text{za } T/2 < t < T \end{cases}$$

Odnosi snaga (3)

Snaga tranzistora

$$2P_T = P_{CC} - P_{RT}$$

$$P_T = \frac{P_{CC} - P_{RT}}{2} = U_{CC} \frac{I_{cm}}{\pi} - R_T \frac{I_{cm}^2}{4}$$

maksimalna snaga

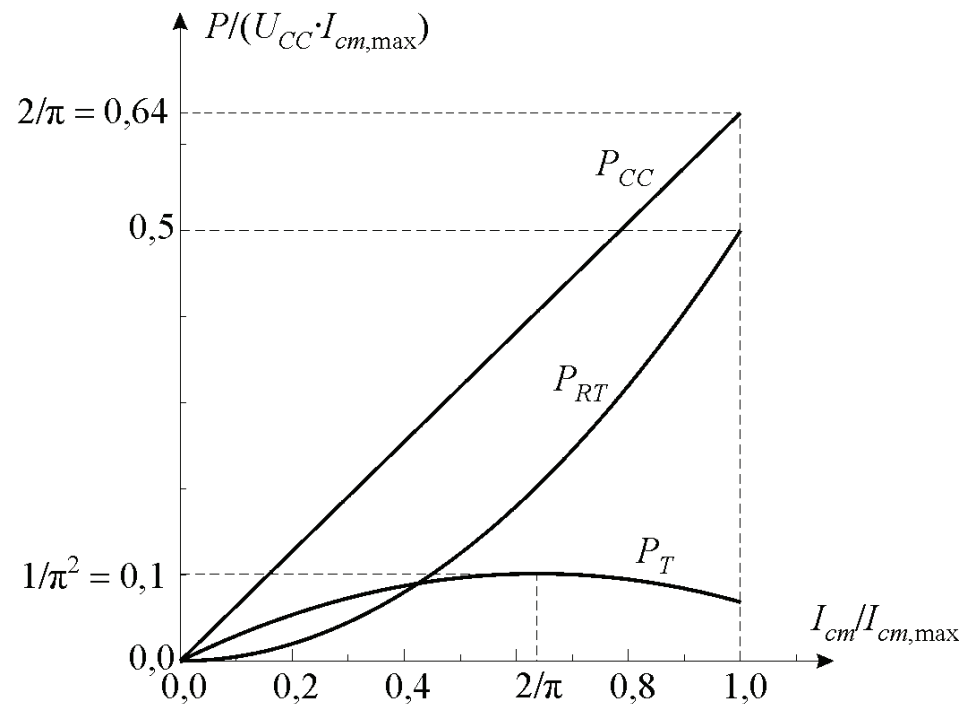
$$\frac{\partial P_T}{\partial I_{cm}} = \frac{U_{CC}}{\pi} - R_T \frac{I_{cm}}{2} \equiv 0 \rightarrow I_{cm} = \frac{2 U_{CC}}{\pi R_T}$$

$$P_{T,\max} = \frac{U_{CC}^2}{\pi^2 R_T}$$

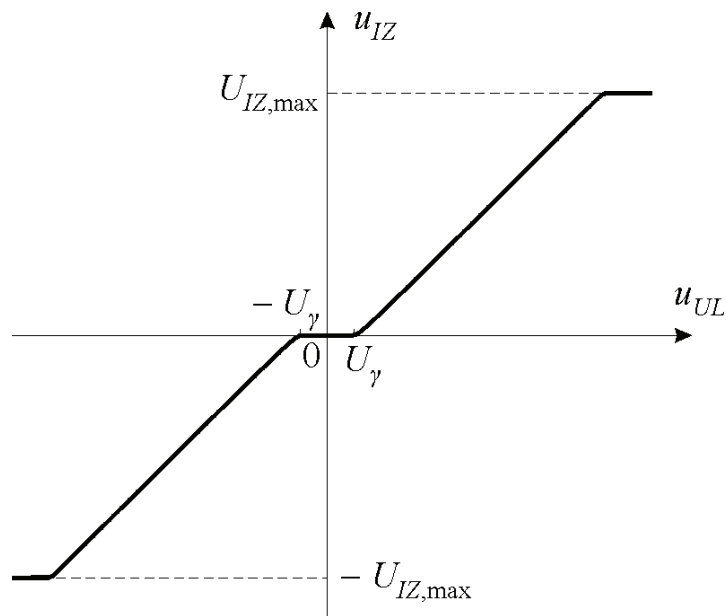
Djelotvornost i raspodjele snaga

$$\eta = \frac{P_{RT}}{P_{CC}} = \frac{\pi R_T I_{cm}}{4 U_{CC}}$$

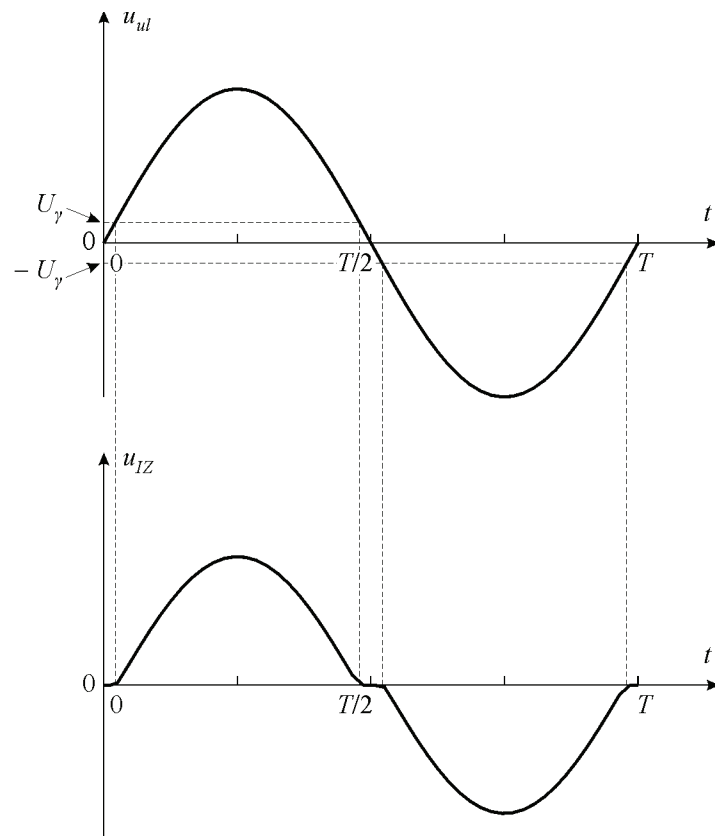
$$\eta_{\max} = \frac{\pi R_T I_{cm,\max}}{4 U_{CC}} = \frac{\pi}{4} = 78,5 \%$$



Prijenosna karakteristika – preskočna izobličenja

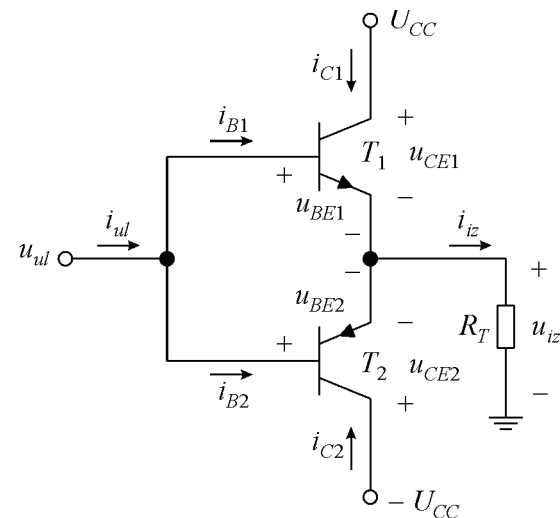


za $|u_{UL}| < U_\gamma \rightarrow$ mrtvo područje

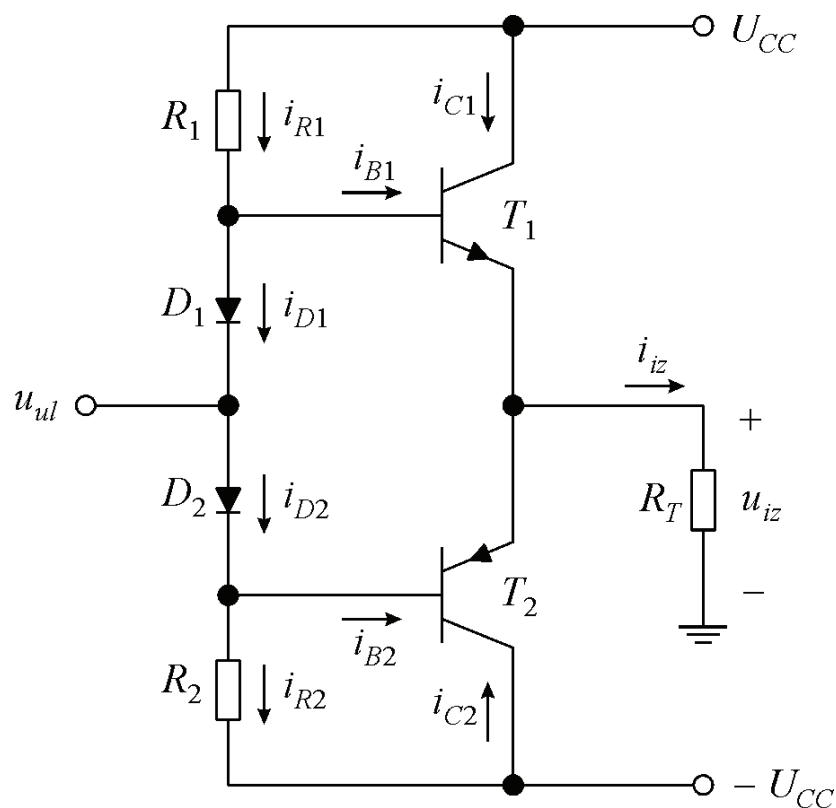


Primjer 3.2

Izlazno protutaktno pojačalo klase B sa slike treba predati srednju snagu od 20 W trošilu otpora od $8\ \Omega$. Odrediti napon izvora napajanja tako da bude za 1 V veći od maksimalnog izlaznog napona, kako bi se izbjegao dolazak tranzistora u zasićenje. Odrediti maksimalnu struju svakog izvora napajanja, srednju snagu izvora napajanja, te djelotvornost pojačala. Kolika je maksimalna potrošnja snage svakog tranzistora? Zanemariti preskočna izobličenja izlaznog napona.



Protutaktno izlazno pojačalo klase AB

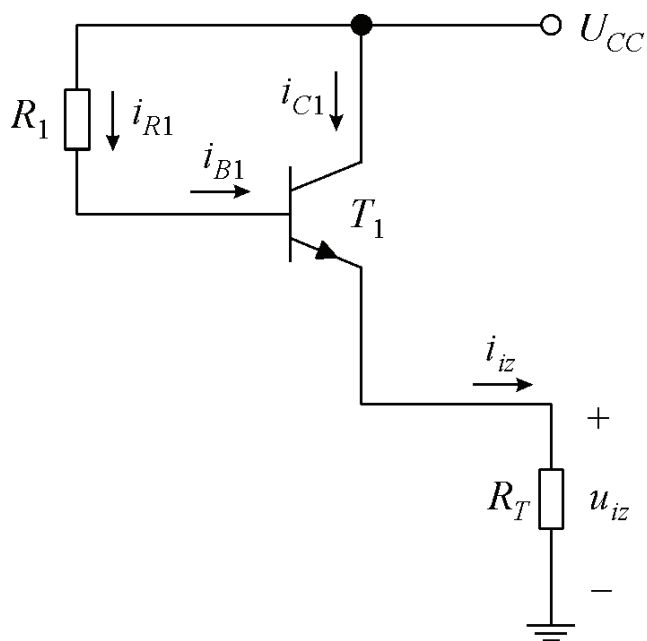


Diode postavljaju statičke radne
točke tranzistora u koljena
ulaznih karakteristika →
izbjegnuta preskočna
izobličenja → statička
potrošnja snage u granama
s diodama i tranzistorima

$$u_{iz} = R_T i_{iz} = u_{ul} + u_{D1} - u_{BE1} \approx u_{ul}$$

Ograničenje izlaznog napona

Porastom ulaznog napona \rightarrow smanjuje se $i_{R1} \rightarrow$ raste $i_{B1} \rightarrow$ smanjuje se $i_{D1} \rightarrow$ maksimalni izlazni napon ograničen prestankom vođenja diode



$$I_{izm,max} = I_{Bmax} + I_{Cmax} = (1 + \beta) I_{Bmax}$$

$$U_{CC} = R_1 I_{Bmax} + U_{BE} + (1 + \beta) R_T I_{Bmax}$$

$$I_{Bmax} = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_1 + (1 + \beta) R_T}$$

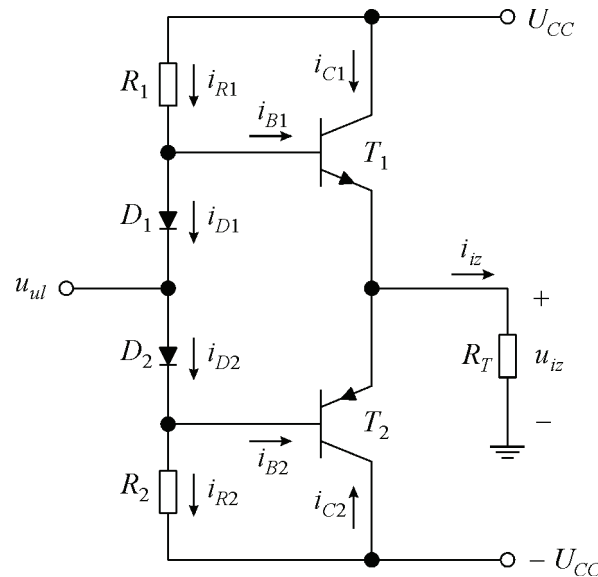
$$U_{izm,max} = R_T I_{izm,max} = (U_{CC} - U_{BE}) \frac{(1 + \beta) R_T}{R_1 + (1 + \beta) R_T}$$

$$P_{RT} = R_T \frac{I_{izm}^2}{2} = \frac{U_{izm}^2}{2 R_T}$$

$$P_{RT,max} = R_T \frac{I_{izm,max}^2}{2} = \frac{U_{izm,max}^2}{2 R_T}$$

Primjer 3.3

Podesiti otpore $R_1 = R_2$ koji će osigurati da uz napon napajanja $U_{CC} = 15 \text{ V}$ izlazno protutaktno pojačalo klase AB sa slike preda srednju snagu od 5 W trošilu otpora od 8Ω . Izračunati statičku struju grane s otporima R_1 i R_2 i diodama D_1 i D_2 . Faktor strujnog pojačanja bipolarnog tranzistora je $\beta = 80$, a naponi koljena propusno polariziranih pn -spojeva su $U_\gamma = 0,7 \text{ V}$.

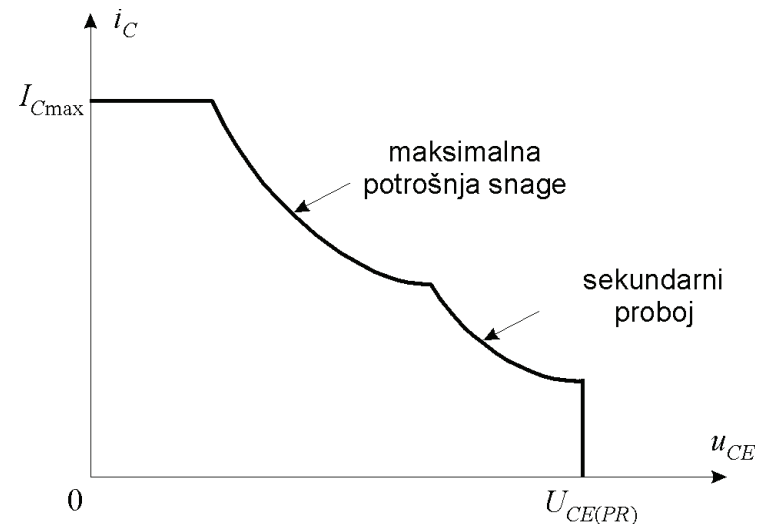
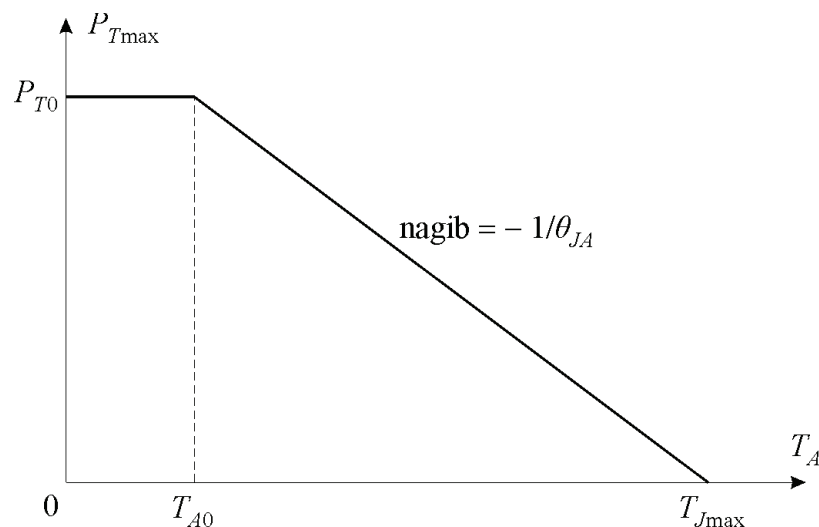


Tranzistori snage

Konstrukcijom se razlikuju od signalnih tranzistora

Povećana temperatura uslijed potrošnje snage ne smije prijeći $T_{J\max}$

$$T_J - T_A = \theta_{JA} P_T \quad \theta_{JA} \rightarrow \text{termički otpor}$$



dozvoljeno radno područje

MOSFET snage – DMOS

Paralelnim spajanjem ćelija mogu se dobiti velike struje
n-područje osigurava velike probojne napone

