

# Glava 1

## Jednostepeni pojačavači

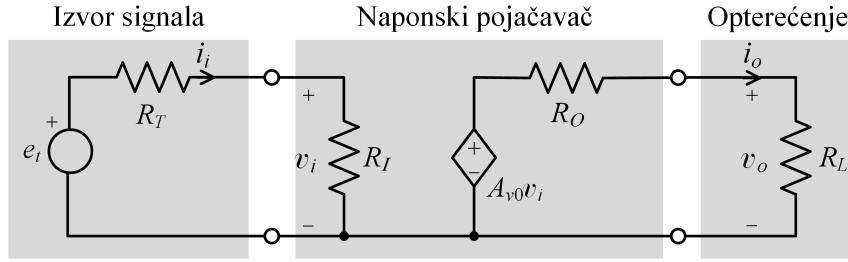
U analizi rada tranzistora, napomenuto je da je jedna od primjena tranzistora u električnim kolima pojačanje signala. Funkcionalni blok koji ispunjava ovaj zadatak zove se *pojačavač signala* (eng. *signal amplifier*). Kod pojačavanja signala potrebno je voditi računa o tome da se zadrži informacija koju signal nosi i da se ne uvode nove informacije. Izlazni signal pojačavača mora biti kopija ulaznog signala po obliku, ali veće amplitudu. Svaka promjena talasnog oblika signala tretira se kao distorzija (izobličenje) signala i smatra se neželjenom. Ako je sa  $x(t)$  označen ulazni signal, a sa  $y(t)$  izlazni signal pojačavača, relacija koja daje zavisnost izlaznog od ulaznog signala:

$$y(t) = Ax(t) \quad (1.1)$$

mora biti linearna kako bi oblik izlaznog signala bio kopija oblika ulaznog signala. Konstanta  $A$  predstavlja amplitudu pojačanja i naziva se jednostavno pojačanje, a (1.1) je relacija koja opisuje *linearni pojačavač*. Kako ulazni i izlazni signali mogu imati prirodu napona ili struje, to je jasno da pojačanje može biti naponsko pojačanje, strujno pojačanje, pojačanje transkonduktanse, pojačanje transrezistanse i pojačanje snage. Najveću primjenu imaju naponski pojačavači, kod kojih i ulazni i izlazni signal imaju prirodu napona, pa ćemo naponske pojačavače detaljnije razmatrati.

### 1.1. Naponski pojačavač

Na sl. 1.1 prikazano je ekvivalentno kolo naponskog pojačavača. Dakle, pojačavač je mreža sa dva para krajeva. Na ulazni par krajeva pojačavača primjenjuje se izvor signala (eng. *source*), koji može biti element ili uređaj



**Slika 1.1.** Ekvivalentno kolo naponskog pojačavača sa izvorom signala i opterećenjem

koji generiše signale (na primjer, senzor ili mikrofon), generator električnih signala, izlaz nekog drugog električnog kola itd. Na izlazni par krajeva pojačavača primjenjuje se opterećenje (eng. *load*), element ili uređaj koji koristi pojačani signal (na primjer, antena, zvučnik ili ulaz drugog električnog kola).

U električnim kolima, izvor signala često se može predstaviti ekvivalentnim Tevenenovim generatorom, čiji su parametri  $e_t$  i  $R_T$  (sl. 1.1). Opterećenje je neka impedansa. Ovdje ćemo razmatrati samo opterećenja koja su rezistivnog karaktera sa otpornošću  $R_L$ .

Ulagne i izlazne otpornosti pojačavača imaju kritičnu ulogu u njegovoj povezanosti sa prethodnim i narednim kolima ili elementima u nekom sistemu. Kod idealnog naponskog pojačavača, ulazno kolo mora osjetiti napon bez uticaja prethodnog stepena, pa je stoga ulazna otpornost idealnog naponskog pojačavača beskonačna ( $R_I \rightarrow \infty$ ). Izlazno kolo idealnog naponskog pojačavača mora da se ponaša kao idealni naponski generator, odnosno da na opterećenje dovodi konstantni naponski nivo, bez obzira na vrijednost otpornosti opterećenja. Stoga je izlazna otpornost idealnog naponskog pojačavača jednaka nuli ( $R_O = 0$ ).

Realni naponski pojačavači imaju ulagne i izlazne otpornosti čije vrijednosti mogu znatno odstupati od idealnih. Kod realnih naponskih pojačavača, ulagna i izlazna otpornost su konačne ( $R_I < \infty$ ,  $R_O > 0$ ).

### 1.1.1. Ulagna otpornost

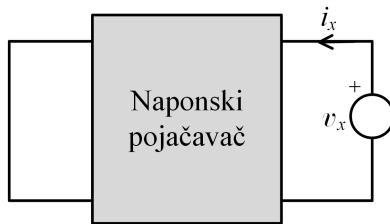
Za određivanje ulagne otpornosti pojačavača, ulaz pojačavača se pobuđuje naponskim izvorom i mjeri se struja kroz taj izvor, ili se ulaz pobuđuje strujnim izvorom i mjeri se napon na njemu. Ulagna otpornost je:

$$R_I = \frac{v_i}{i_i}. \quad (1.2)$$

### 1.1.2. Izlazna otpornost

Za određivanje izlazne otpornosti pojačavača sa sl. 1.1, ulazni priključci naponskog pojačavača su kratko spojeni, a na izlaz pojačavača primjenjuje se testni generator naponu  $v_x$  i struje  $i_x$  (sl. 1.2). Mjerenjem ili određivanjem vrijednosti veličina testnog generatora, može se odrediti izlazna otpornost:

$$R_O = \frac{v_x}{i_x}. \quad (1.3)$$



**Slika 1.2.** Ekvivalentno kolo za određivanje izlazne otpornosti naponskog pojačavača

### 1.1.3. Naponsko pojačanje otvorenog kola

Kod određivanja naponskog pojačanja otvorenog kola, ulaz naponskog pojačavača pobjuđuje se idealnim naponskim generatorom ( $R_T = 0$ ), a izlazni par krajeva je otvoren ( $R_L \rightarrow \infty$ ). Naponsko pojačanje otvorenog kola određuje se kao odnos izlaznog i ulaznog napona pri ovim uslovima:

$$A_{v0} = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{R_L \rightarrow \infty}. \quad (1.4)$$

### 1.1.4. Ukupno naponsko pojačanje

Ukoliko je izlazni par krajeva naponskog pojačavača opterećen otpornošću  $R_L$ , tada je izlazni napon odziv naponskog razdjelnika (sl. 1.1):

$$v_o = \frac{R_L}{R_L + R_O} A_{v0} v_i. \quad (1.5)$$

Ako se na ulazni par krajeva primijeni izvor signala otpornosti  $R_T$ , tada je, iz razdjelnika napona u ulaznom kolu, napon  $v_i$  jednak:

$$v_i = \frac{R_I}{R_I + R_T} e_t. \quad (1.6)$$

Kada u (1.5) zamijenimo  $v_i$  iz (1.6), izlazni napon biće jednak:

$$v_o = \frac{R_L}{R_L + R_O} A_{v0} \frac{R_I}{R_I + R_T} e_t, \quad (1.7)$$

odakle je ukupno naponsko pojačanje:

$$A_v = \frac{v_o}{e_t} = \frac{v_o v_i}{v_i e_t} = \frac{R_L}{R_L + R_O} A_{v0} \frac{R_I}{R_I + R_T}. \quad (1.8)$$

Da bi naponsko pojačanje bilo što je moguće veće, potrebno je izabrati otpornosti  $R_T$  i  $R_L$  tako da važi da je  $R_I \gg R_T$  i  $R_L \gg R_O$ .

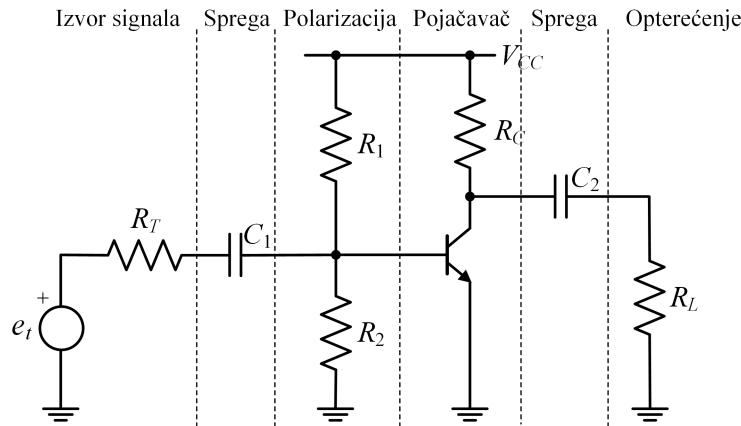
## 1.2. Pojačavač sa zajedničkim emitorom

Pojačavač sa zajedničkim emitorom je pojačavački stepen sa bipolarnim tranzistorom koji je najviše u upotrebi. Kod ovog pojačavača, izvor signala se dovodi između baze i emitora, a izlazni signal je između kolektora i emitora. U analizi malih signala, emitor je uzemljen. U svim spojevima pojačavača potrebno je da tranzistor radi u aktivnom režimu.

Na sl. 1.3 prikazan je pojačavač sa zajedničkim emitorom. Kondenzatori  $C_1$  i  $C_2$  su sa velikom vrijednošću kapacitivnosti tako da predstavljaju kratke spojeve za naizmjenični, a otvorene veze za jednosmjerni signal. Na taj način su izvor signala (kondenzatorom  $C_1$ ) i opterećenje (kondenzatorom  $C_2$ ) za jednosmjerne signale izolovani od kola za polarizaciju. Sa druge strane, pošto su kondenzatori  $C_1$  i  $C_2$  kratki spojevi za naizmjenični signal, male promjene ulaznog napona se preko kondenzatora  $C_1$  direktno prenose na bazu tranzistora i sabiraju se sa naponom polarizacije  $V_{BE}$  (napon između baze i emitora u mirnoj radnoj tački Q). Naizmjenični napon sa kolektora se, preko kondenzatora  $C_2$ , prenosi na opterećenje. Na ovaj način je obezbijeđeno da se na opterećenje  $R_L$  prenose samo pojačane promjene malog signala sa ulaza.

### 1.2.1. Polarizacija

Shodno teoremi superpozicije koja važi za linearna kola, analiza pojačavača može se raditi odvojeno za jednosmjerno napajanje i za male signale. Prema algoritmu za analizu malih signala u kolima (poglavlje 3.9), prvo se uradi polarizacija tranzistora pri jednosmjernom napajanju, gdje se postavlja radna tačka tako da se ona nalazi u aktivnoj oblasti rada. Dakle, cilj polarizacije jeste uspostavljanje željene mirne radne tačke. Kod bipolarnog



Slika 1.3. Pojačavač sa zajedničkim emitorom

tranzistora, radna tačka Q određena je kolektorskog strujom  $I_C$  i naponom između kolektora i emitora  $V_{CE}$ . Radna tačka uspostavlja početne radne uslove tranzistora. Takođe, radna tačka određuje i neke druge parametre tranzistora, kao što su transkonduktansa, ulazna i izlazna otpornost.

Otpornici  $R_1$  i  $R_2$  su elementi polarizacije tranzistora kod pojačavača na sl. 1.3, a kolo za postavljanje jednosmjernog režima prikazano je na sl. 1.4. Statička radna tačka određena je presjekom odgovarajuće izlazne statičke karakteristike i radne prave (sl. 1.5). Za određenu vrijednost opterećenja kolektora  $R_C$ , radna prava se može odrediti na osnovu:

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C. \quad (1.9)$$

Grafički se ova jednačina može predstaviti pravom linijom koja je određena tačkama koje presijecaju ose: za  $I_C = 0$  slijedi da je  $V_{CE} = V_{CC}$  i za  $V_{CE} = 0$  slijedi da je  $I_C = V_{CC}/R_C$  (sl. 1.5). Odgovarajuća  $I_C(V_{BE})$  karakteristika određena je strujom baze  $I_B$ . Sa sl. 1.4 slijedi:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1} - \frac{V_{BE}}{R_2}. \quad (1.10)$$

Radna tačka Q mora da bude na radnoj pravoj negdje između tačaka A i B. Za to moraju da budu ispunjena dva uslova. Prvi uslov je da BE spoj bude provodan, tj. da je  $V_{BE} \geq 0.5$  V, odnosno:

$$V_{BE} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \geq V_{BE0}, \quad (1.11)$$

gdje je  $V_{BE0} \simeq 0.5$  V napon između baze i emitora pri kojem emitorska dioda postaje provodna. Ako je za  $V_{BE} = 0.5$  V struja baze  $I_B = I_{B1}$ , onda je radna tačka u položaju B, sl. 1.5.

Drugi uslov je da tranzistor ne smije da bude u oblasti zasićenja, odnosno BC spoj ne smije da bude provodan. To znači da mora biti ispunjen uslov  $V_{BC} < 0.5$  V. Kako je  $V_{BC} = V_{BE} - V_{CE}$ , da bi tranzistor bio u aktivnoj oblasti mora važiti:

$$V_{CE} > V_{BE} - 0.5 \text{ V} = V_{CEs}, \quad (1.12)$$

gdje je  $V_{CEs}$  napon između kolektora i emitora na granici oblasti zasićenja i aktivne oblasti (tačka A na sl. 1.5). Naponu  $V_{CEs}$  odgovara kolektorska struja zasićenja, koja je, s obzirom na (1.9), jednaka:

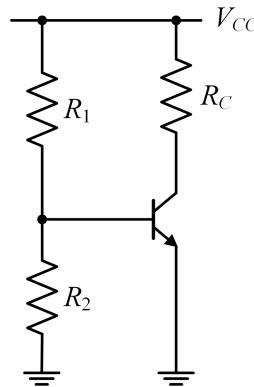
$$I_{Cs} = \frac{V_{CC} - V_{CEs}}{R_C}. \quad (1.13)$$

Tačka A je na  $I_C(V_{CE})$  karakteristici tranzistora pri struji  $I_B = I_{Bs}$  (sl. 1.5). Pošto je to granica oblasti zasićenja i aktivne oblasti, važi da je  $I_C = \beta I_B$ , pa je:

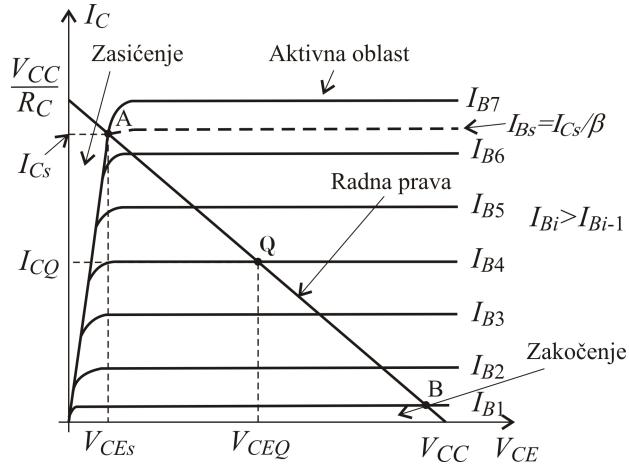
$$I_{Bs} = \frac{I_{Cs}}{\beta} = \frac{V_{CC} - V_{CEs}}{\beta R_C}. \quad (1.14)$$

Radna tačka Q biće u aktivnoj oblasti ako je  $I_B < I_{Bs}$ , odnosno, s obzirom na (1.10) i (1.14):

$$\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1} - \frac{V_{BE}}{R_2} < \frac{V_{CC} - V_{CEs}}{\beta R_C}. \quad (1.15)$$



**Slika 1.4.** Polarizacija pojačavača



Slika 1.5. Izlazne karakteristike NPN tranzistora sa zajedničkim emitorom

Kako je uglavnom  $V_{CC} \gg V_{BE}$  i  $V_{CC} \gg V_{CEs}$ , onda je, na osnovu (1.11) i (1.15), redom:

$$R_1 > \beta R_C, \quad (1.16)$$

$$\frac{R_1}{R_2} < \frac{V_{CC}}{V_{BE0}} - 1. \quad (1.17)$$

Jednačine (1.16) i (1.17) definišu opseg otpornosti  $R_1$  i  $R_2$  kola za polarizaciju koje obezbeđuju da radna tačka Q bude u aktivnoj oblasti, odnosno da je njen položaj na radnoj pravoj između tačaka A i B. Konkretnе vrijednosti mogu se dobiti za tačno definisan polažaj radne tačke Q, odnosno za kolektorsku struju, koja je jednaka  $I_C = \beta I_B$  ili je jednaka:

$$I_C = \beta \left( \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1} - \frac{V_{BE}}{R_2} \right). \quad (1.18)$$

Ako nije ograničeno posebnim uslovima, najbolje bi bilo da radna tačka bude na sredini aktivne oblasti, odnosno da su parametri radne tačke:

$$V_{CE} \simeq \frac{V_{CC}}{2}, \quad (1.19)$$

$$I_C \simeq \frac{V_{CC}}{2R_C}. \quad (1.20)$$

### 1.2.2. Dinamička analiza

Određivanje radne tačke i vrijednosti kolektorske struje u njoj ( $I_C$ ), omogućava određivanje parametara modela za male signale ( $r_\pi$ ,  $r_o$  i  $g_m$ ). Transkonduktansa je  $g_m = I_C/V_t$ , otpornost  $r_\pi$  je  $r_\pi = \beta/g_m$ . Ako je uključen Erljev efekat u model, tada je  $r_o = V_A/I_C$ .

U analizi malih signala, jednosmerni izvori napajanja zamijene se njihovim unutrašnjim otpornostima, dok se kondenzatori za spregu ponašaju kao kratki spojevi (sl. 1.6). Bipolarni tranzistor zamjenjuje se modelom za male signale. Ekvivalentno kolo za analizu malih signala prikazano je na sl. 1.7.

Prema sl. 1.1, osnovni dinamički (mali signal) parametri pojačavača su: ulazna otpornost  $R_I$ , izlazna otpornost  $R_O$ , naponsko pojačanje otvorenog kola  $A_{v0}$  i ukupno naponsko pojačanje  $A_v$ .

#### Ulazna otpornost

Za pojačavač sa sl. 1.3, ulazna otpornost jednaka je:

$$R_I = \frac{v_i}{i_i} = R_B \| r_\pi, \quad (1.21)$$

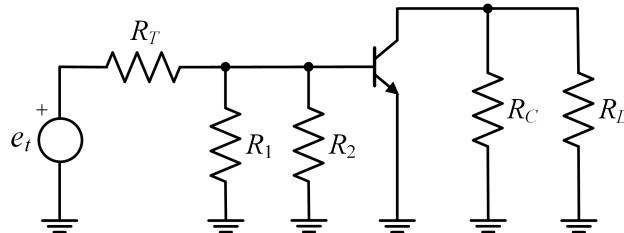
gdje je  $R_B = R_1 \| R_2$  (sl. 1.6). Ulazna otpornost pojačavača ne zavisi od veličina koje se odnose na izlaz pojačavača, pa je ovo *unilateralni pojačavač*.

S obzirom na (1.17) i (1.18), otpornosti u kolu za polarizaciju su skoro uvijek takve da je  $R_B \gg r_\pi$ , pa je ulazna otpornost pojačavača približno:

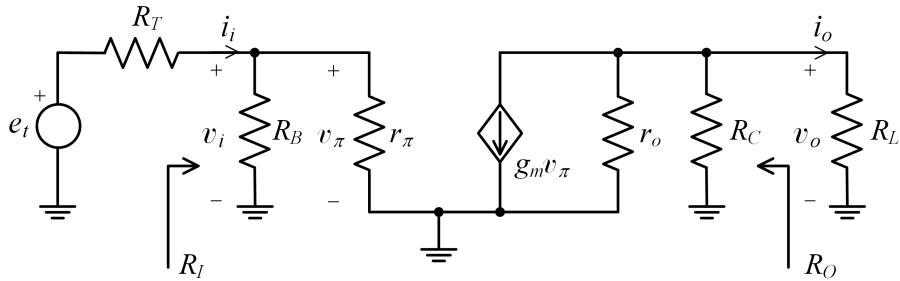
$$R_I \simeq r_\pi. \quad (1.22)$$

#### Izlazna otpornost

Na osnovu ekvivalentnog kola za određivanje izlazne otpornosti (sl. 1.2), kratko spojeni ulazni priključci znače da je  $v_i = v_\pi = 0$ , pa je i struja naponom kontrolisanog strujnog generatora jednaka nuli ( $g_m v_\pi = 0$ ), što



**Slika 1.6.** Kolo pojačavača za analizu odziva na male naizmjenične signale



**Slika 1.7.** Ekvivalentno kolo za analizu malih naizmjeničnih signala

znači da je izlazna otpornost jednaka:

$$R_O = R_C \| r_o. \quad (1.23)$$

Kod diskretnih tranzistora je  $r_o \gg R_C$ , pa je izlazna otpornost približno:

$$R_O \simeq R_C. \quad (1.24)$$

### Naponsko pojačanje otvorenog kola

Prema (1.4), naponsko pojačanje otvorenog kola ( $R_T = 0$  i  $R_L \rightarrow \infty$ ) jednako je  $A_{v0} = v_o/v_i$ . Sa sl. 1.7 slijedi da je izlazni napon:

$$v_o = -g_m v_\pi (R_C \| r_o). \quad (1.25)$$

Kako je iz ulaznog kola  $v_i = v_\pi$ , to je naponsko pojačanje otvorenog kola:

$$A_{v0} = \frac{v_o}{v_i} = -g_m (R_C \| r_o). \quad (1.26)$$

Na osnovu (1.26), može se zaključiti da izlazna otpornost tranzistora  $r_o$  smanjuje naponsko pojačanje otvorenog kola. Kao što je već rečeno ranije, za diskretne tranzistore je  $r_o \gg R_C$ , pa je naponsko pojačanje otvorenog kola približno jednako:

$$A_{v0} \simeq -g_m R_C. \quad (1.27)$$

### Ukupno naponsko pojačanje

Ukupno naponsko pojačanje pojačavača određuje se uzimajući u obzir i izvor signala i uticaj opterećenja  $R_L$ . Sada je izlazni napon jednak:

$$v_o = -g_m v_\pi (R_C \| r_o \| R_L). \quad (1.28)$$

Ulazni napon  $v_i$ , koji je jednak naponu  $v_\pi$ , iz razdjelnika napona na ulazu je:

$$v_i = v_\pi = \frac{R_B \| r_\pi }{(R_B \| r_\pi) + R_T} e_t. \quad (1.29)$$

Zamjenom (1.29) u (1.28), dobija se izlazni napon:

$$v_o = -g_m(R_C \| r_o \| R_L) \frac{R_B \| r_\pi }{(R_B \| r_\pi) + R_T} e_t, \quad (1.30)$$

odakle je ukupno naponsko pojačanje:

$$A_v = \frac{v_o}{e_t} = \frac{v_o}{v_i} \frac{v_i}{e_t} = -g_m(R_C \| r_o \| R_L) \frac{R_B \| r_\pi }{(R_B \| r_\pi) + R_T}. \quad (1.31)$$

U slučaju da je  $R_B \gg r_\pi$ , (1.31) se svodi na:

$$A_v = -g_m(R_C \| r_o \| R_L) \frac{r_\pi}{r_\pi + R_T}. \quad (1.32)$$

Kada je unutrašnja otpornost izvora signala velika ( $R_T \geq r_\pi$ ), i imajući u vidu da je  $\beta = g_m r_\pi$ , ukupno naponsko pojačanje je:

$$A_v = -(R_C \| r_o \| R_L) \frac{g_m r_\pi}{r_\pi + R_T} = -\frac{\beta}{r_\pi + R_T} (R_C \| r_o \| R_L). \quad (1.33)$$

Za unutrašnje otpornosti izvora signala koje su male ( $R_T \ll r_\pi$ ), naponsko pojačanje jednako je:

$$A_v = -g_m(R_C \| r_o \| R_L) \quad (1.34)$$

i ne zavisi od otpornosti u ulaznom kolu.

### Strujno pojačanje kratko spojenog kola

Mada se za naponske pojačavače uobičajeno ne određuje strujno pojačanje, ovdje ćemo pokazati čemu je ono jednako. Strujno pojačanje kratko spojenog kola definiše se kao odnos izlazne i ulazne struje malih signala pri kratko spojenim izlaznim priključcima ( $R_L = 0$ ):

$$A_{isc} = \left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{R_L=0}. \quad (1.35)$$

Iz izlaznog kola sa sl. 1.7, struja  $i_o$  jednaka je:

$$i_o = -g_m v_\pi = -g_m v_i, \quad (1.36)$$

dok je ulazni napon:

$$v_i = (R_B \| r_\pi) i_i. \quad (1.37)$$

Zamjenom (1.37) u (1.36), dobija se strujno pojačanje kratko spojenog kola:

$$A_{isc} = -g_m(R_B \| r_\pi). \quad (1.38)$$

Ako je  $R_B \gg r_\pi$ , tada je  $R_B \| r_\pi \simeq r_\pi$ , pa je strujno pojačanje kratko spojenog kola:

$$A_{isc} = -g_m r_\pi = -\beta. \quad (1.39)$$

Može se definisati i ukupno strujno pojačanje opterećenog pojačavača, gdje je iz strujnog razdjelnika u izlaznom kolu:

$$i_o = -g_m v_\pi \frac{r_o \| R_C}{(r_o \| R_C) + R_L}, \quad (1.40)$$

pa je ukupno strujno pojačanje:

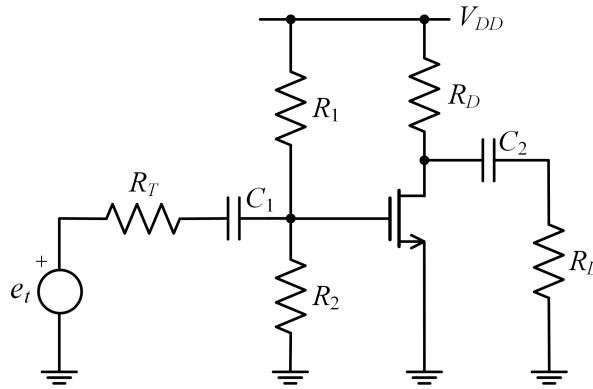
$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = -g_m(R_B \| r_\pi) \frac{r_o \| R_C}{(r_o \| R_C) + R_L}. \quad (1.41)$$

*Pojačavač sa zajedničkim emitorm odlikuje se velikim naponskim i strujnim pojačanjem. Negativan znak u izrazima za ova pojačanja znači da je fazna razlika izlaznog i ulaznog signala jednaka  $\pi$  radijana ili  $180^\circ$ , odnosno pojačavač je invertujući. Ulazna otpornost pojačavača nije velika, ima vrijednost od nekoliko stotina omu do najviše nekoliko kilooma. Izlazna otpornost je relativno velika i određena je vrijednošću otpornosti otpornika  $R_C$ . Obično je nekoliko desetaka kilooma.*

### 1.3. Pojačavač sa zajedničkim sorsom

Pojačavač sa zajedničkim sorsom ima istu topologiju kao pojačavač sa zajedničkim emitorm, s tim da se umjesto bipolarnog tranzistora koristi MOS tranzistor. Kod ovog pojačavača, izvor signala se dovodi između gejta i sorsa, a izlazni signal je između drejna i sorsa. Da bi tranzistor radio kao pojačavač, potrebno je da radi u režimu zasićenja.

Na sl. 1.8 prikazan je pojačavač sa zajedničkim sorsom, pri čemu je tranzistor polarisan preko razdjelnika napona. Kondenzatori  $C_1$  i  $C_2$  imaju istu ulogu kao kod pojačavača sa zajedničkim emitorm.



Slika 1.8. Pojačavač sa zajedničkim sorsom

### 1.3.1. Polarizacija

Kondenzatori  $C_1$  i  $C_2$  su otvorene veze za jednosmjerni signal, pa je ekvivalentno kolo za određivanje statičke radne tačke kao na sl. 1.9. Elementi za polarizaciju su otpornici  $R_1$  i  $R_2$ . Kako je struja gejta  $I_G = 0$ , to je potencijal gejta:

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD}. \quad (1.42)$$

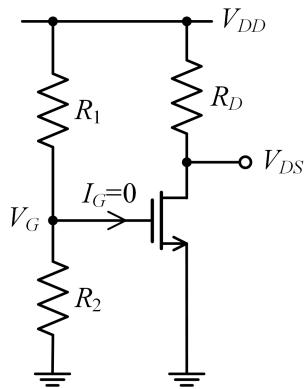
Otpornosti  $R_1$  i  $R_2$  biraju se tako da budu zadovoljena dva uslova. Prvo, tranzistor mora da bude provodan, odnosno  $V_G > V_{tn}$ , gdje je  $V_{tn}$  napon praga MOS tranzistora. Drugo, radna tačka Q mora da bude u oblasti zasićenja, tj.  $V_{DS} > V_G - V_{tn}$ . Odnosno, potencijal gejta mora da bude u opsegu:

$$V_{tn} < V_G < V_{DS} + V_{tn}. \quad (1.43)$$

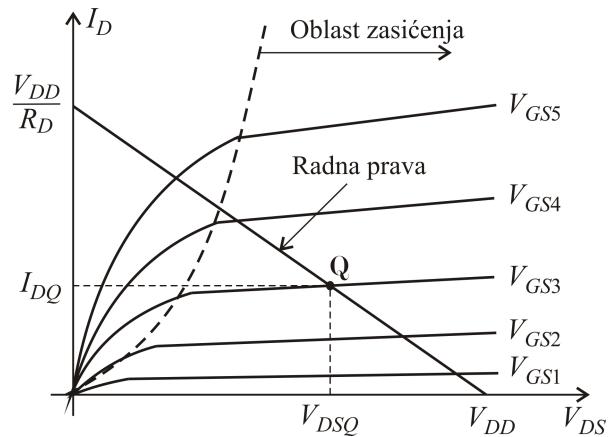
Na sl. 1.10 dat je grafički prikaz položaja statičke radne tačke Q. Ako nije nečim drugo ograničeno, najbolje je da radna tačka bude na sredini karakteristika u oblasti zasićenja.

### 1.3.2. Dinamička analiza

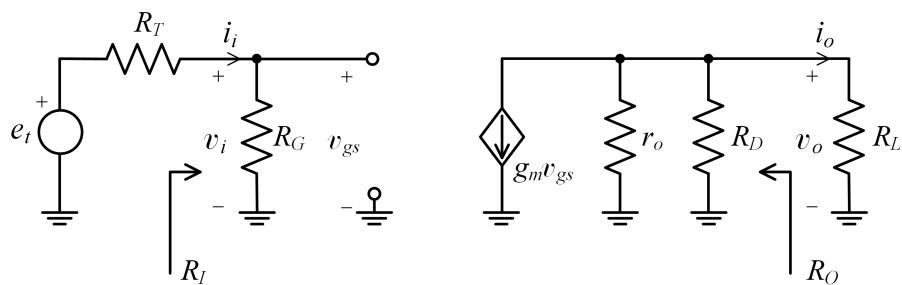
Ekvivalentno kolo za analizu malih signala pojačavača sa zajedničkim sorsom prikazano je na sl. 1.11. Ekvivalentna otpornost paralelne veze otpornika  $R_1$  i  $R_2$  označena je sa  $R_G$  ( $R_G = R_1 \parallel R_2$ ). MOS tranzistor je zamjenjen modelom tranzistora za male signale, sa parametrima  $g_m = 2\sqrt{k_n I_D}$  i  $r_o = 1/(\lambda_n I_D)$ .



Slika 1.9. Ekvivalentno kolo za polarizaciju



Slika 1.10. Grafički prikaz radne tačke



Slika 1.11. Ekvivalentno kolo za analizu malih signala

### **Ulazna otpornost**

Na osnovu modela za analizu malih signala sa sl. 1.11, ulazna otpornost jednaka je:

$$R_I = R_G. \quad (1.44)$$

Standardno je ova otpornost reda veličina nekoliko desetaka do nekoliko stotina kilooma.

### **Izlazna otpornost**

Na osnovu ekvivalentnog kola za određivanje izlazne otpornosti (sl. 1.2), kratko spojeni ulazni priključci znače da je  $v_i = v_{gs} = 0$ , pa je i struja naponom kontrolisanog strujnog generatora jednaka nuli ( $g_m v_{gs} = 0$ ), što znači da je izlazna otpornost jednaka:

$$R_O = R_D \| r_o. \quad (1.45)$$

Kod diskretnih tranzistora je  $r_o \gg R_D$ , pa je izlazna otpornost:

$$R_O \simeq R_D. \quad (1.46)$$

### **Naponsko pojačanje otvorenog kola**

Prema (1.4), naponsko pojačanje otvorenog kola jednako je  $A_{v0} = v_o/v_i$  za  $R_L \rightarrow \infty$ . Izlazni napon je:

$$v_o = -g_m v_{gs} (R_D \| r_o). \quad (1.47)$$

Kako je, iz ulaznog kola,  $v_i = v_{gs}$ , to je naponsko pojačanje otvorenog kola:

$$A_{v0} = -g_m (R_D \| r_o). \quad (1.48)$$

Na osnovu (1.48), može se zaključiti da izlazna otpornost tranzistora smanjuje naponsko pojačanje otvorenog kola, kao kod pojačavača sa zajedničkim emitorom. Kao što je već rečeno, za diskretnе tranzistore je  $r_o \gg R_D$ , pa je naponsko pojačanje otvorenog kola približno jednako:

$$A_{v0} \simeq -g_m R_D. \quad (1.49)$$

### Ukupno naponsko pojačanje

Ukupno naponsko pojačanje pojačavača određuje se uzimajući u obzir i izvor signalna i opterećenje. Izlazni napon jednak je:

$$v_o = -g_m v_{gs} (R_D \| r_o \| R_L). \quad (1.50)$$

Ulazni napon  $v_i$ , koji je jednak naponu  $v_{gs}$ , iz razdjelnika napona na ulazu je:

$$v_i = v_{gs} = \frac{R_G}{R_G + R_T} e_t. \quad (1.51)$$

Zamjenom (1.51) u (1.50), dobija se izlazni napon:

$$v_o = -g_m \frac{R_G}{R_G + R_T} (R_D \| r_o \| R_L) e_t, \quad (1.52)$$

odakle je ukupno naponsko pojačanje:

$$A_v = \frac{v_o}{e_t} = \frac{v_o}{v_i} \frac{v_i}{e_t} = -g_m (R_D \| r_o \| R_L) \frac{R_G}{R_G + R_T}. \quad (1.53)$$

Otpornici  $R_1$  i  $R_2$ , koji služe za polarizaciju NMOS tranzistora, mogu biti sa većim vrijednostima otpornosti, jer je naponski razdjelnik neopterećen, s obzirom na to da je struja gejta jednaka nuli. Stoga otpornosti  $R_1$  i  $R_2$  treba birati tako da je uvijek  $R_G \gg R_T$ , pa je ukupno naponsko pojačanje:

$$A_v = -g_m (R_D \| r_o \| R_L). \quad (1.54)$$

*Pojačavač sa zajedničkim sorsom odlikuje se velikim naponskim pojačanjem. Negativan znak u izrazu za pojačanje znači da je fazna razlika izlaznog i ulaznog napona jednaka  $\pi$  radijana ili  $180^\circ$ , odnosno pojačavač je inverujući. U kolu za polarizaciju, otpornosti  $R_1$  i  $R_2$  treba birati tako da je ulazna otpornost pojačavača velika. Izlazna otpornost je relativno velika i određena je vrijednošću otpornika  $R_D$  (nekoliko kilooma do nekoliko desetaka kilooma).*

*Po pravilu je transkonduktansa  $g_m$  bipolarnog tranzistora veća nego kod MOS tranzistora, pa je, pri  $R_C = R_D$ , naponsko pojačanje otvorenog kola pojačavača sa zajedničkim emitorom veće nego kod pojačavača sa zajedničkim sorsom.*