



Pojačavačka kola sa bipolarnim i MOS tranzistorima

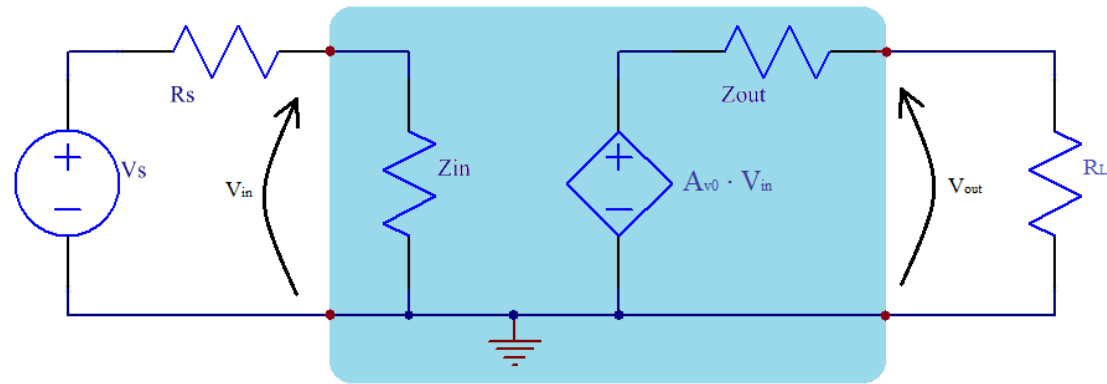
Katedra za elektroniku

Postupak analize pojačavačkih kola

- Analiza pojačavačkih kola obavlja se u dva osnovna koraka. Prvi korak podrazumeva rešavanje kola za polarizaciju tranzistora i određivanje mirne radne tačke (tzv. **DC analiza**). Kada je poznata radna tačka, određuju se parametri modela tranzistora za male signale (ulazna otpornost r_{π} za bipolarni tranzistor, odnosno transkonduktansa g_m za MOSFET).
- Prilikom analize radne tačke (DC režim), kondenzatori se zamenjuju otvorenim vezom, a induktivnosti (kalemovi) kratkim spojem.
- Nakon toga, sledi analiza u režimu malih signala (tzv. **AC analiza**), kojom se određuju parametri od interesa:
 - Naponsko pojačanje A_v
 - Strujno pojačanje A_i
 - Pojačanje snage G
 - Ulazna otpornost Z_{in}
 - Izlazna otpornost Z_{out}
- Ekvivalentno kolo za režim malih signala dobija se uzimajući u obzir sledeće pretpostavke:
 - Jednosmerni naponski izvori zamenjuju se kratkim spojem, a nezavisni strujni izvori otvorenim vezom.
 - Kondenzatori se zamenjuju kratkim spojem, a kalemovi otvorenim vezom.
 - Tranzistor se zamenjuje modelom za male signale, pri čemu su parametri modela određeni položajem mirne radne tačke.

Model naponskog pojačavača

- Naponski pojačavač na ulazu i na izlazu ima naponski signal.
- Ekvivalentno kolo koje modeluje naponski pojačavač prikazano je na slici:



- Naponsko pojačanje neopterećenog potrošača ($R_L \rightarrow \infty$) označeno je sa A_{v0} .
- Naponsko pojačanje opterećenog pojačavača:

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = A_{v0} \cdot \frac{R_L}{R_L + Z_{out}}$$

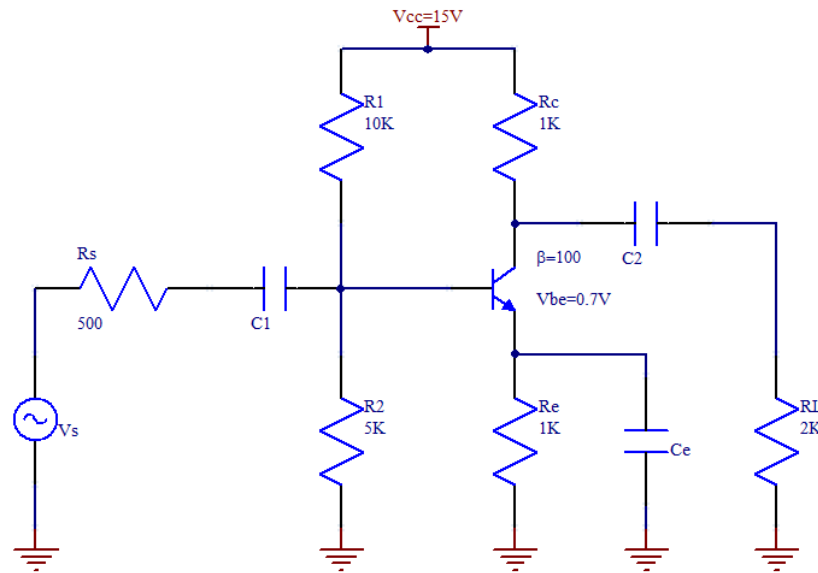
- Ukupno naponsko pojačanje od izvora signala do potrošača:

$$\frac{v_{out}}{v_s} = A_{v0} \cdot \frac{Z_{in}}{Z_{in} + R_s} \cdot \frac{R_L}{R_L + Z_{out}}$$

Zaključak: Dobar naponski pojačavač treba da ima što veću ulaznu i što manju izlaznu otpornost. Kada $Z_{in} \rightarrow \infty$ i $Z_{out} \rightarrow 0$, tada je ukupno naponsko pojačanje A_{v0} .

Analiza pojačavača sa zajedničkim emiterom

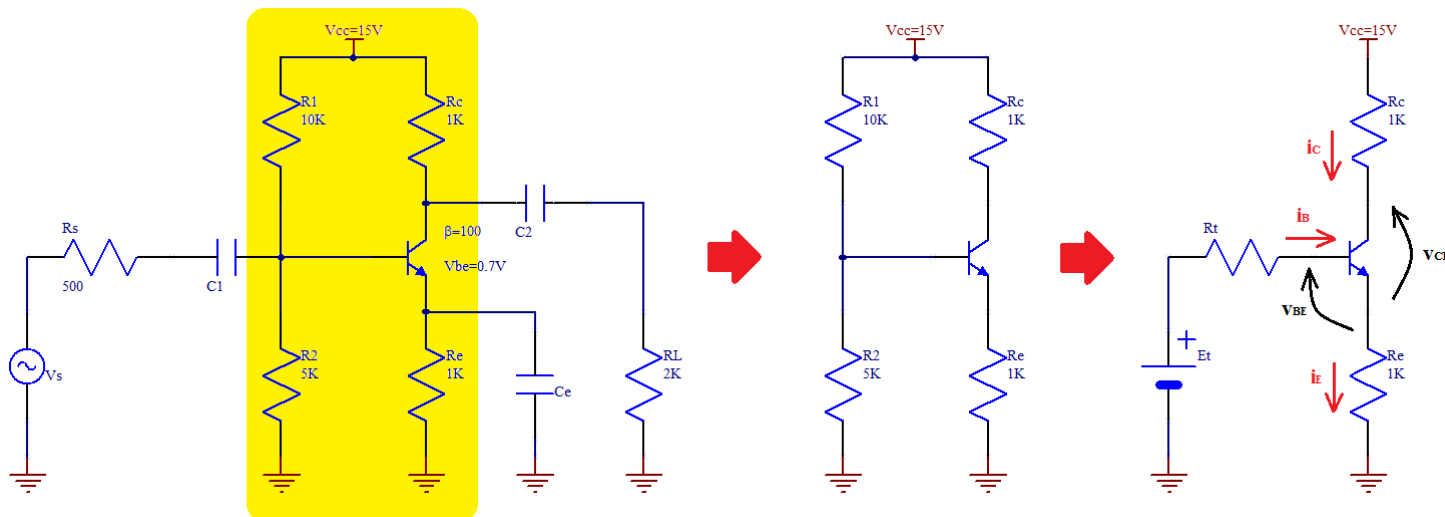
- U nastavku će detaljno biti prikazan postupak analize pojačavača sa zajedničkim emiterom na primeru kola prikazanog na slici:



- Otpornici R_1 , R_2 , R_c i R_e čine kolo za polarizaciju, koje određuje mirnu radnu tačku tranzistora. Na bazu se preko sprežnog kondenzatora C_1 sa ulaznog generatora v_s dovodi promenljivi signal male amplitude. Pojačavačko kolo na izlazu daje signal koji je istog oblika, ali veće amplitude u odnosu na signal generatora. Izlazni signal preko sprežnog kondenzatora C_2 stiže do potrošača R_L .

DC analiza pojačavača sa zajedničkim emiterom

- Prilikom DC analize (odnosno određivanja mirne radne tačke), kondenzatori se zamenjuju otvorenom vezom, a kalemovi (induktivnosti) se zamenjuju kratkim spojem.
- U pojačavačima sa bipolarnim tranzistorom polazi se od pretpostavke da je tranzistor u aktivnom režimu, dok se u pojačavačima sa MOSFET tranzistorom pretpostavlja režim zasićenja. Ukoliko analiza pokaže da ova pretpostavka nije ispunjena, kolo neće ispoljavati željeno pojačavačko svojstvo.



Tevenenova teorema:

$$E_T = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 15V \cdot \frac{5K}{10K + 5K} = 5V$$

$$R_T = R_1 \parallel R_2 = 3.33K\Omega$$

aktivni režim $\Rightarrow i_c = \beta \cdot i_B, v_{BE} = 0.7V$

$$E_T - R_T \cdot i_B - v_{BE} - R_E \cdot i_E = 0$$

$$i_E = i_B + i_C = (1 + \beta) \cdot i_B \Rightarrow i_B = \frac{E_T - v_{BE}}{R_T + (1 + \beta) \cdot R_E} = 41.2\mu A$$

$$i_C = \beta \cdot i_B = 4.12mA$$

$$V_{CC} - R_C \cdot i_C - v_{CE} - R_E \cdot (1 + \beta) \cdot i_B = 0$$

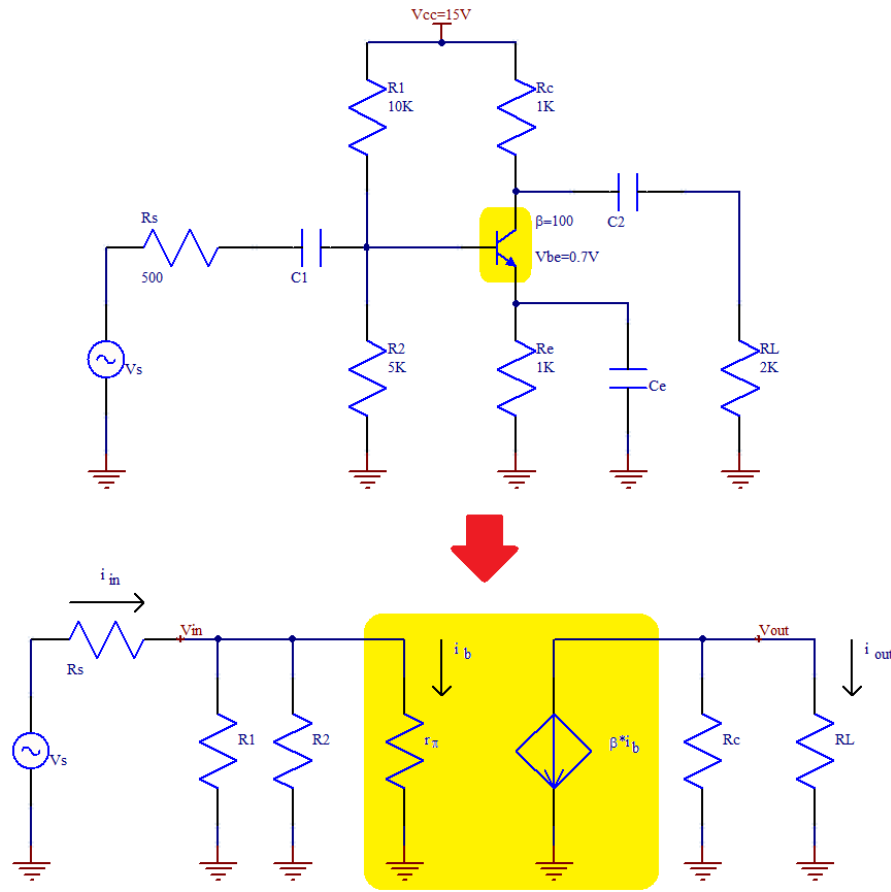
$$v_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot i_C - R_E \cdot (1 + \beta) \cdot i_B = 6.72V$$

\Rightarrow pretpostavka je ispravna

$$r_\pi = \frac{V_T}{i_{BQ}} = \frac{\beta \cdot V_T}{i_{CQ}} = 631\Omega$$

AC analiza pojačavača sa zajedničkim emiterom(1)

- Prilikom crtanja ekvivalentne šeme kola za male signale, potrebno je poštovati sledeća pravila:
 - DC naponski izvori se zamenjuju kratkim spojem.
 - DC strujni izvori se zamenjuju otvorenom vezom.
 - Ako se zahteva analiza u oblasti srednjih frekvencija, sprežni i premošćujući kondenzatori se zamenjuju kratkom vezom, jer $|Z_C| = \frac{1}{\omega C} \rightarrow 0$
 - Ako je induktivnost dovoljno velika da ima vrlo visoku impedansu za AC signal (tj. $|Z_L| = \omega L \rightarrow \infty$), tad se induktivnost zamenjuje otvorenom vezom u ekvivalentnoj šemi u režimu malih signala.
 - Tranzistor se zamenjuje ekvivalentnom šemom za male signale.



AC analiza pojačavača sa zajedničkim emiterom(2)

Naponsko pojačanje:

$$A_v \stackrel{def}{=} \frac{v_{out}}{v_{in}}$$

$$R_L' = R_L \parallel R_C \approx 667\Omega$$

$$v_{out} = -\beta \cdot i_B \cdot R_L'$$

$$i_B = \frac{v_{in}}{r_\pi} \Rightarrow v_{out} = -\beta \cdot \frac{v_{in}}{r_\pi} \cdot R_L'$$

$$A_v = -\frac{\beta \cdot R_L'}{r_\pi} \approx -106$$

$$\text{kada } R_L \rightarrow \infty, R_L' \rightarrow R_C \Rightarrow A_v = -\frac{\beta \cdot R_C}{r_\pi} \approx -158$$

Ulazna otpornost:

$$Z_{in} \stackrel{def}{=} \frac{v_{in}}{i_{in}}$$

$$i_{in} = \frac{v_{in}}{R_B} + \frac{v_{in}}{r_\pi}$$

$$\Rightarrow Z_{in} = R_B \parallel r_\pi \approx 531\Omega$$

Strujno pojačanje:

$$A_i \stackrel{def}{=} \frac{i_{out}}{i_{in}}$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2 \approx 3.33k\Omega$$

$$i_B = i_{in} \cdot \frac{R_B}{R_B + r_\pi}$$

$$i_{out} = -\beta \cdot i_B \cdot \frac{R_C}{R_C + R_L} = -\beta \cdot i_{in} \cdot \frac{R_B}{R_B + r_\pi} \cdot \frac{R_C}{R_C + R_L}$$

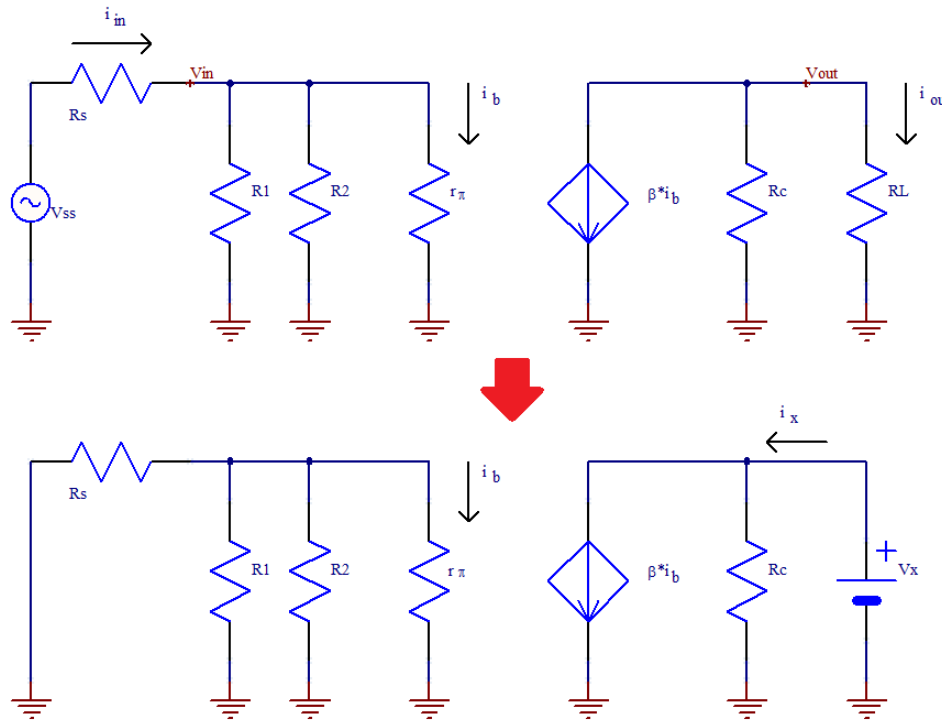
$$A_i = -\beta \cdot \frac{R_B}{R_B + r_\pi} \cdot \frac{R_C}{R_C + R_L} \approx -28$$

Pojačanje snage:

$$G \stackrel{def}{=} \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{v_{out} \cdot i_{out}}{v_{in} \cdot i_{in}} = A_v \cdot A_i \approx 2968$$

Određivanje izlazne otpornosti

- Prilikom određivanja izlazne otpornosti crta se nova ekvivalentna šema kola, pri čemu se ulazni generator zamenjuje kratkim spojem, a potrošač fiktivnim test-generatorom:



$$Z_{out} \stackrel{def}{=} \frac{V_X}{i_X}$$

$$i_X = \frac{V_X}{R_C} + \beta \cdot i_B$$

$$R_B' = R_1 \parallel R_2 \parallel R_S$$

$$0 - R_B' \cdot i_B - r_\pi \cdot i_B = 0 \Rightarrow i_B \cdot (R_B' + r_\pi) = 0$$

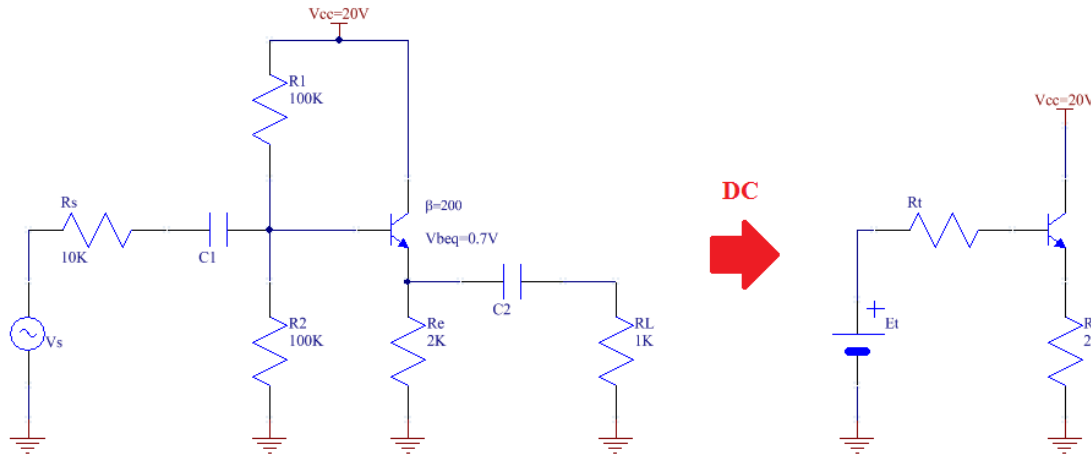
$$R_B' + r_\pi > 0 \Rightarrow i_B = 0$$

$$i_X = \frac{V_X}{R_C} \Rightarrow Z_{out} = R_C = 1K\Omega$$

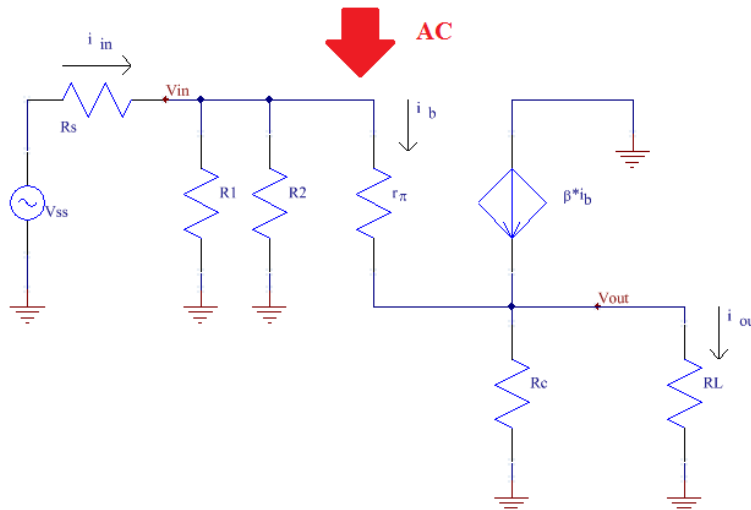
- Zaključak:** pojačavački stepen sa zajedničkim emiterom ima veliko naponsko i značajno strujno pojačanje. Sa druge strane, ulazna otpornost je relativno mala, a izlazna otpornost je relativno velika pošto je jednaka otporniku koji je vezan na red sa kolektorom. Zbog nepovoljne ulazne otpornosti, ovakav pojačavač se u praksi često vezuje na red (kaskadira) sa drugim pojačavačkim stepenima, koji imaju bolje karakteristike u pogledu ulazne/izlazne otpornosti.

Analiza pojačavača sa zajedničkim kolektorom

- Kod pojačavača sa zajedničkim kolektorom, ulazni signal se dovodi na bazu, a izlaz je na emiteru:



Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



DC analiza

$$E_T = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 20V \cdot \frac{100K}{100K + 100K} = 10V$$

$$R_T = R_1 \parallel R_2 = 50K\Omega$$

pretpostavka: aktivni režim $\Rightarrow i_C = \beta \cdot i_B, i_E = (1 + \beta) \cdot i_B$

$$E_T - R_T \cdot i_B - v_{BE} - R_E \cdot (1 + \beta) \cdot i_B = 0$$

$$i_B = \frac{E_T - v_{BE}}{R_T + R_E \cdot (1 + \beta)} = \frac{10V - 0.7V}{50K + 2K \cdot (1 + 200)} = 20.6\mu A$$

$$i_C = \beta \cdot i_B = 4.1mA$$

$$V_{CC} - v_{CE} - R_E \cdot (1 + \beta) \cdot i_B = 0$$

$$v_{CE} = V_{CC} - R_E \cdot (1 + \beta) \cdot i_B = 11.73V > v_{CES} = 0.2V$$

$$r_\pi = \frac{V_T}{I_{BQ}} = \frac{25mV}{20.6\mu A} = 1215\Omega$$

Naponsko pojačanje:

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$$

$$R_L' = R_L \parallel R_E = \frac{1K \cdot 2K}{1K + 2K} = 667\Omega$$

$$v_{in} - r_\pi \cdot i_B - v_{out} = 0$$

$$(1 + \beta) \cdot i_B = \frac{v_{out}}{R_L'} \Rightarrow i_B = \frac{v_{out}}{(1 + \beta) \cdot R_L'}$$

$$v_{in} = v_{out} \cdot \left(1 + \frac{r_\pi}{(1 + \beta) \cdot R_L'} \right)$$

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{(1 + \beta) \cdot R_L'}{r_\pi + (1 + \beta) \cdot R_L'} \approx 0.991$$

Ulazna otpornost:

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}}$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2 = 50K\Omega, R_L' = R_L \parallel R_E \approx 667\Omega$$

$$i_{in} = \frac{v_{in}}{R_B} + i_B$$

$$v_{in} - r_\pi \cdot i_B - R_L' \cdot (1 + \beta) \cdot i_B = 0 \Rightarrow i_B = \frac{v_{in}}{r_\pi + R_L' \cdot (1 + \beta)}$$

$$i_{in} = v_{in} \cdot \left(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{r_\pi + R_L' \cdot (1 + \beta)} \right)$$

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = R_B \parallel (r_\pi + R_L' \cdot (1 + \beta)) \approx 36.5K\Omega$$

Zaključak: stepen sa zajedničkim kolektorom primenjuje se onda kada se zahteva visoka ulazna, ili niska izlazna otpornost

Strujno pojačanje:

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}}$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2 = 50K\Omega$$

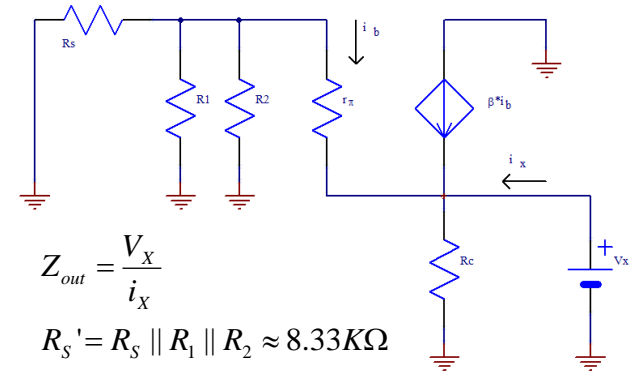
$$i_{out} = (1 + \beta) \cdot i_B \cdot \frac{R_E}{R_L + R_E} \Rightarrow i_B = i_{out} \cdot \frac{R_L + R_E}{(1 + \beta) \cdot R_E}$$

$$R_B \cdot (i_{in} - i_B) - r_\pi \cdot i_B - i_{out} \cdot R_L = 0$$

$$i_{in} \cdot R_B = i_{out} \cdot \left(R_L + (R_B + r_\pi) \cdot \frac{R_L + R_E}{(1 + \beta) \cdot R_E} \right)$$

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{(1 + \beta) \cdot R_E \cdot R_B}{(1 + \beta) \cdot R_E \cdot R_L + (R_B + r_\pi) \cdot (R_L + R_E)} \approx 36.2$$

Izlazna otpornost:



$$Z_{out} = \frac{V_X}{i_X}$$

$$R_S' = R_S \parallel R_1 \parallel R_2 \approx 8.33K\Omega$$

$$i_X + (1 + \beta) \cdot i_B = \frac{V_X}{R_E}$$

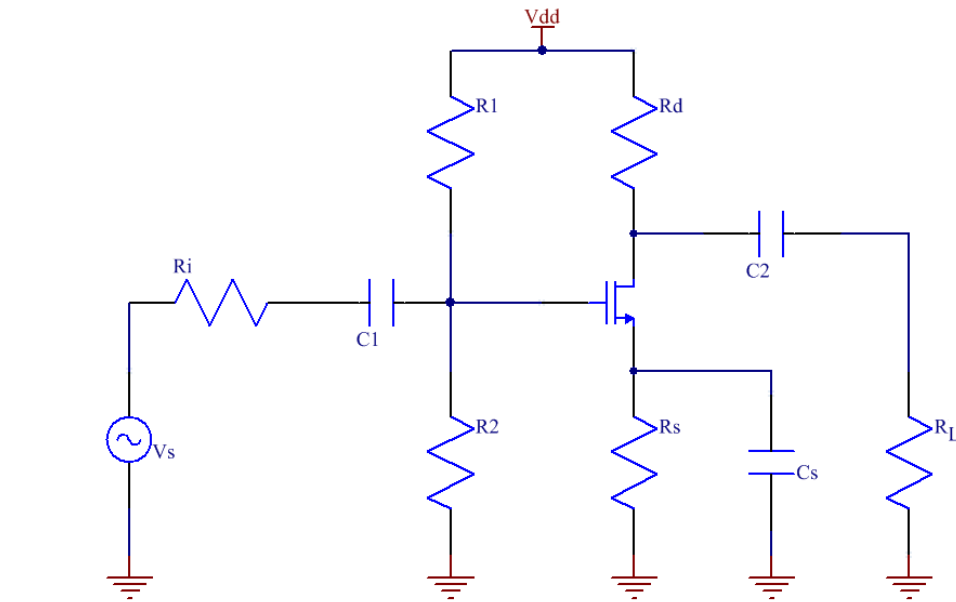
$$0 - R_S' \cdot i_B - r_\pi \cdot i_B - V_X = 0 \Rightarrow i_B = -\frac{V_X}{R_S' + r_\pi}$$

$$i_X = V_X \cdot \left(\frac{1}{R_E} + \frac{(1 + \beta)}{R_S' + r_\pi} \right)$$

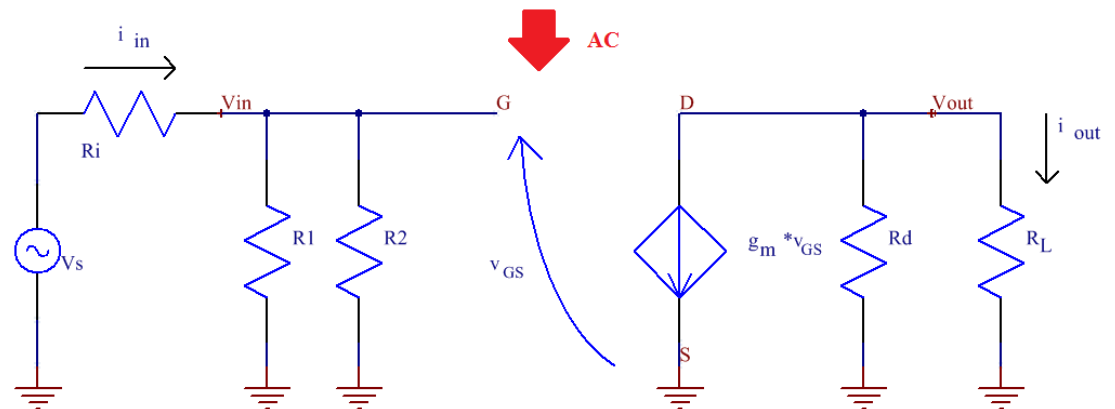
$$Z_{out} = \frac{V_X}{i_X} = R_E \parallel \frac{R_S' + r_\pi}{1 + \beta} \approx 47\Omega$$

Analiza pojačavača sa zajedničkim sorsom

- U nastavku sledi analiza MOS pojačavača u spoju sa zajedničkim sorsom. Analiza je data u opštim brojevima, čime se podrazumeva da je MOSFET polarisan tako da radi u oblasti zasićenja i da je radna tačka prethodno određena analizom DC režima.



Pojačavač sa zajedničkim sorsom



Naponsko pojačanje:

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$$

$$R_L' = R_L \parallel R_D = \frac{R_L \cdot R_D}{R_L + R_D}$$

$$v_{in} = v_{GS}$$

$$v_{out} = -g_m \cdot v_{GS} \cdot R_L' = -g_m \cdot v_{in} \cdot R_L'$$

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -g_m \cdot R_L'$$

Ulazna otpornost:

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = R_1 \parallel R_2 = R_G$$

Strujno pojačanje:

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}}$$

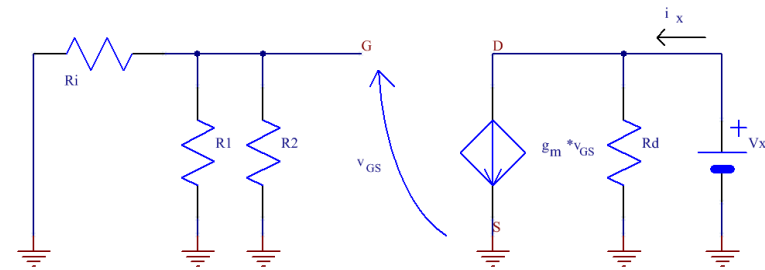
$$R_G = R_1 \parallel R_2$$

$$v_{GS} = R_G \cdot i_{in}$$

$$i_{out} = -g_m \cdot v_{GS} \cdot \frac{R_D}{R_L + R_D} = -g_m \cdot R_G \cdot i_{in} \cdot \frac{R_D}{R_L + R_D}$$

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}} = -g_m \cdot \frac{R_G \cdot R_D}{R_L + R_D}$$

Izlazna otpornost:



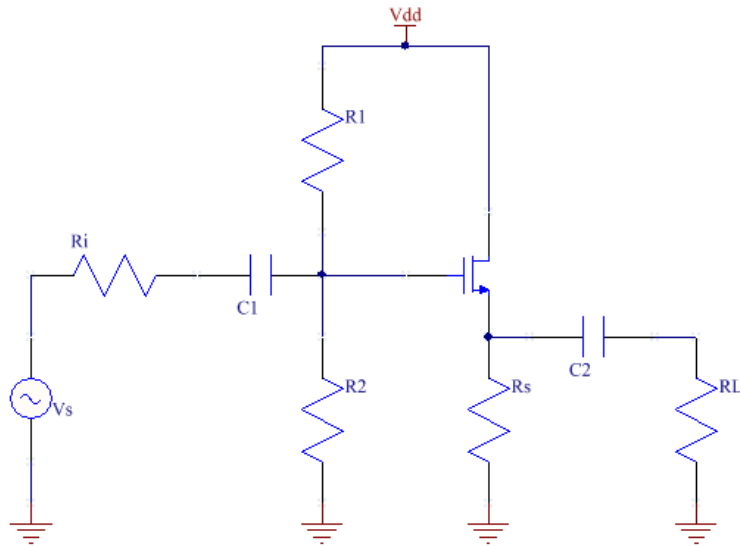
$$Z_{out} = \frac{V_x}{i_x}$$

u ulaznom delu nema generatora $\Rightarrow v_{GS} = 0$

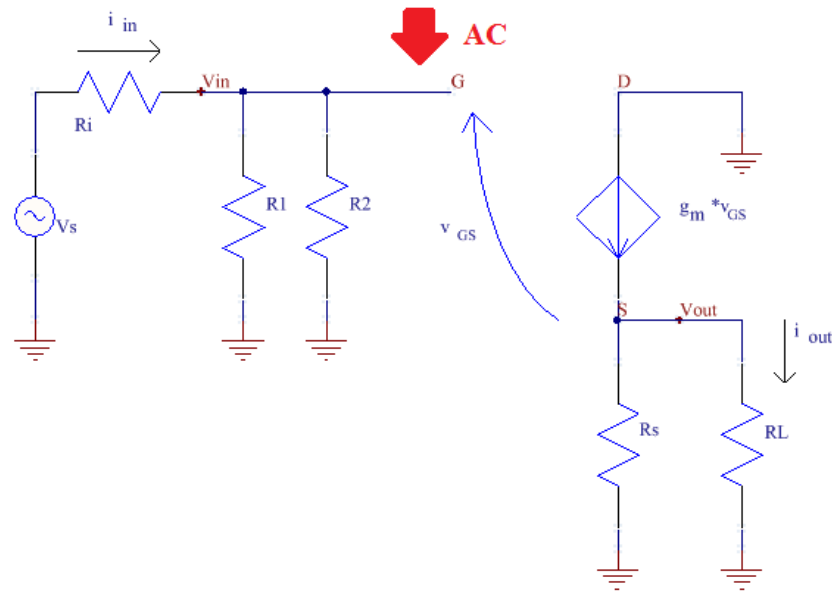
$$i_x = \frac{V_x}{R_d} + g_m \cdot v_{GS} = \frac{V_x}{R_d}$$

$$Z_{out} = \frac{V_x}{i_x} = R_d$$

Analiza pojačavača sa zajedničkim drejnom



Pojačavač sa zajedničkim drejnom



Naponsko pojačanje:

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$$

$$R_L' = R_L \parallel R_S = \frac{R_L \cdot R_S}{R_L + R_S}$$

$$v_{GS} = v_{in} - v_{out}$$

$$v_{out} = g_m \cdot v_{GS} \cdot R_L' = g_m \cdot (v_{in} - v_{out}) \cdot R_L'$$

$$v_{out} (1 + g_m \cdot R_L') = v_{in} \cdot g_m \cdot R_L'$$

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_m \cdot R_L'}{1 + g_m \cdot R_L'}$$

Ulazna otpornost:

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = R_1 \parallel R_2 = R_G$$

Strujno pojačanje:

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}}$$

$$R_G = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

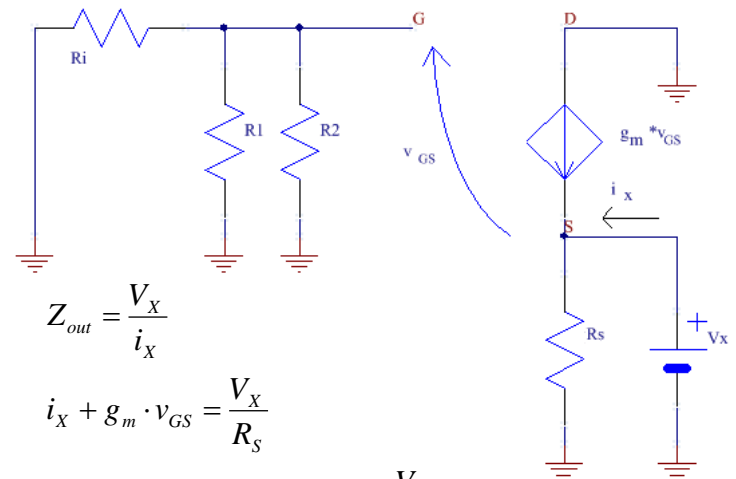
$$v_{GS} = v_{in} - v_{out} = i_{in} \cdot R_G - i_{out} \cdot R_L$$

$$i_{out} = g_m \cdot v_{GS} \cdot \frac{R_S}{R_L + R_S} = \frac{g_m \cdot R_S}{R_L + R_S} \cdot (i_{in} \cdot R_G - i_{out} \cdot R_L)$$

$$i_{out} \cdot (R_L + R_S + g_m \cdot R_S \cdot R_L) = i_{in} \cdot g_m \cdot R_G \cdot R_S$$

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{g_m \cdot R_G \cdot R_S}{R_L + R_S + g_m \cdot R_S \cdot R_L}$$

Izlazna otpornost:



$$Z_{out} = \frac{V_X}{i_X}$$

$$i_X + g_m \cdot v_{GS} = \frac{V_X}{R_S}$$

$$v_{GS} = -V_X \Rightarrow i_X - g_m \cdot V_X = \frac{V_X}{R_S}$$

$$i_X = V_X \cdot \left(g_m + \frac{1}{R_S} \right)$$

$$Z_{out} = \frac{V_X}{i_X} = \frac{R_S}{g_m \cdot R_S + 1}$$