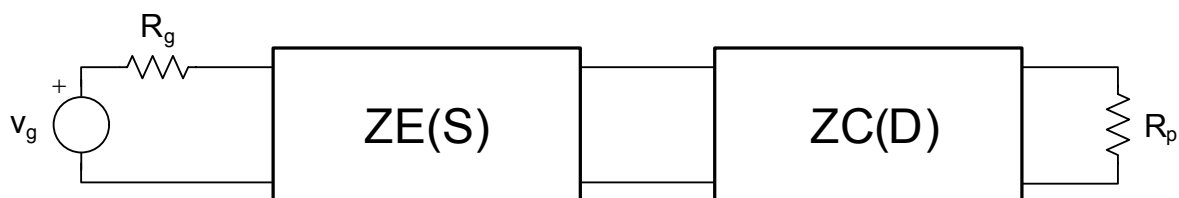


## 10. VIŠESTEPENI POJAČAVAČI

Jednostepeni pojačavači imaju različite osobine. Na primer, stepen sa zajedničkim emitorom (sorsom) ima naponsko pojačanje veće od jedan, ali njegova izlazna otpornost nije najmanja. Najmanja je izlazna otpornost kod stepena sa zajedničkim kolektorom (drejnom), ali je njegovo naponsko pojačanje manje od jedan.

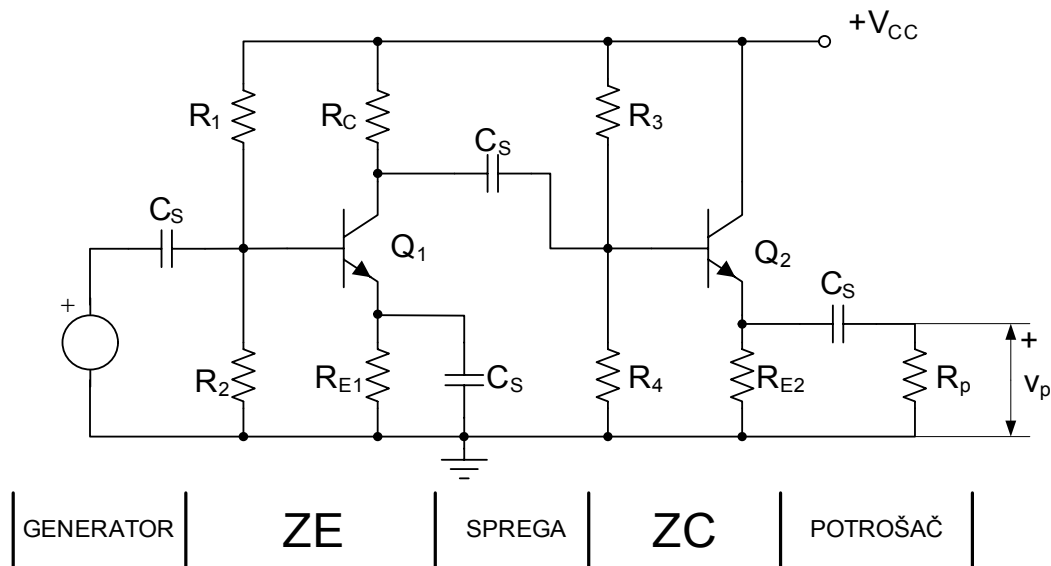
Ako se traži, na primer, da pojačavač ima veliko naponsko pojačanje i malu izlaznu otpornost, onda se kaskadno povežu stepen sa zajedničkim emitorom (sorsom) i zajedničkim kolektorom (drejnom), slika 10.1. Termin kaskadno znači da se izlaz prethodnog stepena poveže na ulaz narednog stepena.



Slika 10.1. Kaskadna veza pojačavačkih stepena.

i

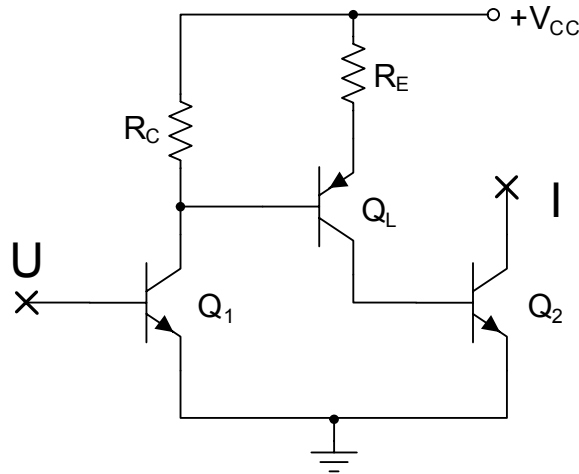
Sprezanje pojačavačkih stepeni u višestepeni pojačavač treba obaviti tako, da pre i posle sprezanja, jednosmerni režim rada svakog stepena ostane nepromenjen, onakav kako je optimalno izabrano (projektovano) za svaki stepen pojedinačno. Sprezanje se može obaviti sa sprežnim kondenzatorima velike kapacitivnosti  $C_S$  kao što se povezuju generator i potrošač kod jednostepenog pojačavača. Sprežni kondenzator  $C_S$  se napuni na jednosmerni napon koji je postojao pre povezivanja kondenzatora  $C_S$  u tačkama kola gde je kondenzator vezan. Kondenzator  $C_S$  je mala impedansa, kratak spoj ( $1/\omega C_S$ ) za naizmenični signal tako, da se naizmenični signal prenosi bez smanjenja (slabljenja) sa izlaza prethodnog stepena na ulaz narednog stepena.



Slika 10.2. RC pojačavač ZE,ZC.

Višestepeni pojačavači sa sprežnim kondenzatorima se zovu RC pojačavači, slika 10.2.

Sprezanje više stepeni u integrisanoj tehnologiji nije izvodljivo sa sprežnim kondenzatorom jer se on ne može da napravi u integrisanoj tehnici. Element za sprezanje u integrisanoj tehnici, koji treba da ima potreban pad jednosmernog napona i mali pad naizmeničnog napona, se pravi preko kola za pomeranje nivoa, slika 10.3. Izlaz prethodnog pojačavačkog stepena, tranzistor  $Q_1$ , se povezuje na ulaz narednog stepena, baza tranzistora  $Q_2$ , preko pomerača nivoa, tranzistor  $Q_L$ .

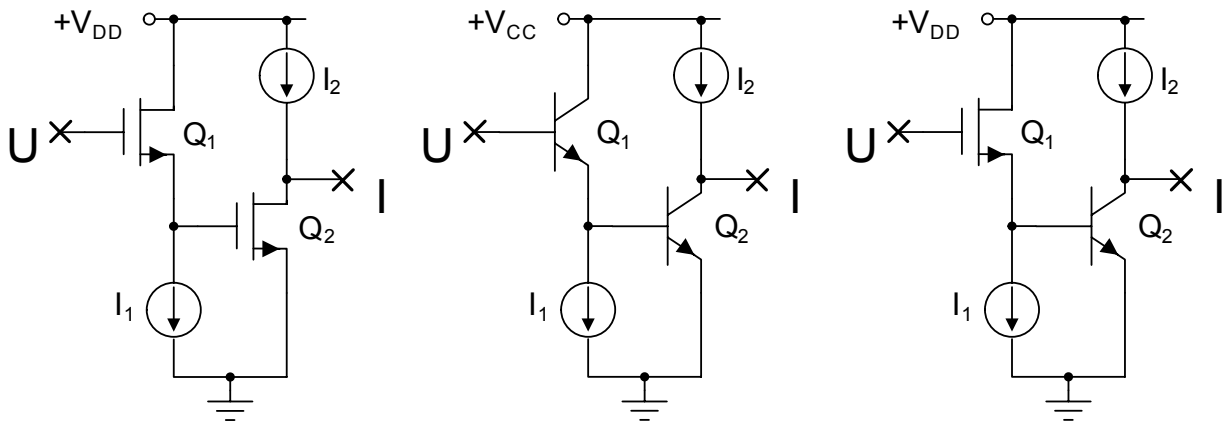


Slika 10.3. Pomeranje nivoa kod sprezanja.

Napomena: Simbol  $\times$  — znači da je na tom mestu šema prekinta (nije nacrtano celo kolo).

Tranzistor  $Q_L$  ima napon posmatrano između baze  $Q_L$  i kolektora  $Q_L$ , jednak razlici napona od kolektora  $Q_1$  do mase i napona od baze  $Q_2$  do mase, nezavisno od struje kroz  $Q_L$  pod pretpostavkom da je  $\beta$  od  $Q_L$  vrlo veliko tako da je bazna struja  $Q_L$  zanemarljiva u odnosu na kolektorsku struju  $Q_1$ . Otpornik  $R_E$  služi za podešavanje kolektorske struje  $Q_L$ , odnosno bazne struje  $Q_2$  jer su to iste struje. Naponsko pojačanje za naizmenični signal od izlaza (kolektor  $Q_1$ ) do ulaza (baza  $Q_2$ ) je približno  $a = -r_{\pi} / R_E$ , gde je  $r_{\pi}$  ulazna otpornost stepena sa  $Q_2$ .

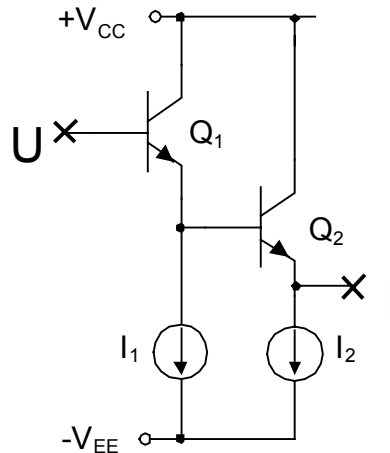
Pomerači nivoa zahtevaju dodatne komponente u kolu i prenose naizmenični signal sa slabljenjem. Stoga se pojačavači u integrisanim kolima najčešće sprežu direktno.



Slika 10.4. Višestepeni pojačavač ZC(ZD) - ZE(ZS).

Na slici 10.4. je pokazan dvostepeni pojačavač kod koga je ulazni stepen zajednički kolektor (drejn), a izlazni stepen je zajednički emitor (sors). Sprega obezbedjuje veliku ulaznu impendansu (ulazni stepen) i veliko naponsko pojačanje (izlazni stepen). Pošto nije nacrtana kompletna šema, nije definisan napon na ulazu  $U$ , niti na izlazu  $I$ .

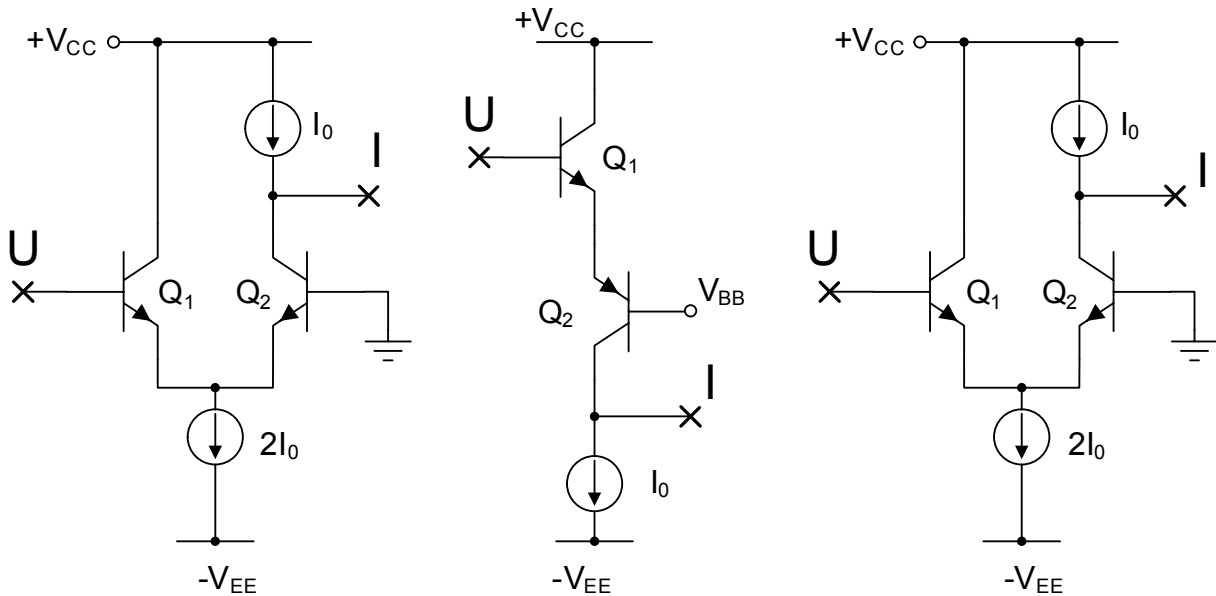
Na slici 10.5. je pokazan dvostepeni pojačavač sa zajedničkim kolektorom (drejnom) koji obezbedjuje visoku ulaznu i malu izlaznu impedansu, idealni naponski pratilac (voltage follower).



Slika 10.5. Višestepeni pojačavač ZC - ZC.

Na slici 10.6. je pokazan dvostepeni pojačavač sa zajedničkim kolektorom (drejnom) na ulazu i zajedničkom bazom (gejtom) na izlazu. Ulazni stepen obezbedjuje visoku ulaznu impendansu, a izlazni daje veliko naponsko pojačanje i veliku izlaznu otpornost. Naponi na ulazu  $U$  i izlazu  $I$  nisu definisani jer nije nacrtano kompletno kolo.

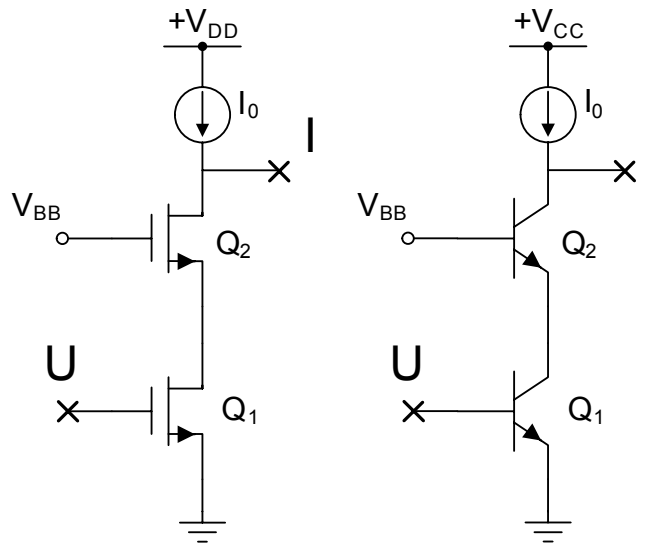
Ponovljena slika



Slika 10.6. Višestepeni pojačavač ZC(ZD) - ZB(ZG).

Dvostepeni kaskadni pojačavač sa zajedničkim emitorom (sorsom) na ulazu i zajedničkom bazom (gejtom) na izlazu se zove kaskodni pojačavač. Odlikuje se velikom brzinom rada (može da pojačava signale visokih učestanosti). Objašnjenje ove tvrdnje izlazi iz okvira kursa. Pomoć u razumevanju može biti formulacija Milerove teoreme koja je data u dodatku. Kaskodni pojačavač sa

MOS tranzistorima i sa bipolarnim tranzistorima je pokazan na slici 10.7. Naponi na ulazu i izlazu nisu definisani jer nije nacrtana cela šema.



Slika 10.7. Kaskodni pojačavač .

Ulazna impedansa stepena sa zajedničkom bazom (gejtom) je mala, pa je naponsko pojačanje od baze do kolektora stepena sa zajedničkim emitorom (sorsom) malo. To prema Milerovoj teoremi znači da se kapacitivnost kolektor (drejn)-baza (gejt) tranzistora Q1 slabo uvećava jer je  $K$  malo. Stoga je kaskodni pojačavač brz.

Uočiti da tranzistor Q2 u sprezi sa zajedničkom bazom (gejtom) nema usporenja u radu jer je kapacitivnost emitor (sors) - kolektor (drejn) zanemarljivo mala.

Pojačanje kaskodnog pojačavača je približno:

$$\text{za MOS:} \quad A_v \cong \frac{V_I}{V_U} \approx -g_{mQ1} \cdot r_{0Q1} \cdot g_{mQ2} \cdot r_{0Q2} \quad (10.1)$$

$$\text{za bipolarni:} \quad A_v \cong \frac{V_I}{V_U} \approx -\beta_{Q1} \cdot g_{mQ2} \cdot r_{0Q2} = -r_{\pi Q1} \cdot g_{mQ1} \cdot g_{mQ2} \cdot r_{0Q2} \cdot \quad (10.2)$$

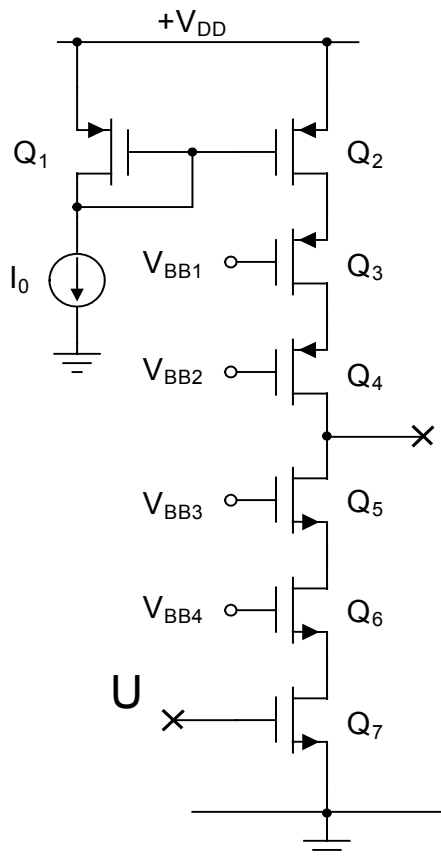
Izlazne otpornosti su približno:

$$\text{za MOS:} \quad R_I \cong g_{mQ2} \cdot r_{0Q2} \cdot r_{0Q1} \quad (10.3)$$

$$\text{za bipolarni:} \quad R_I \cong \beta_{Q2} \cdot r_{0Q2} \cdot \quad (10.4)$$

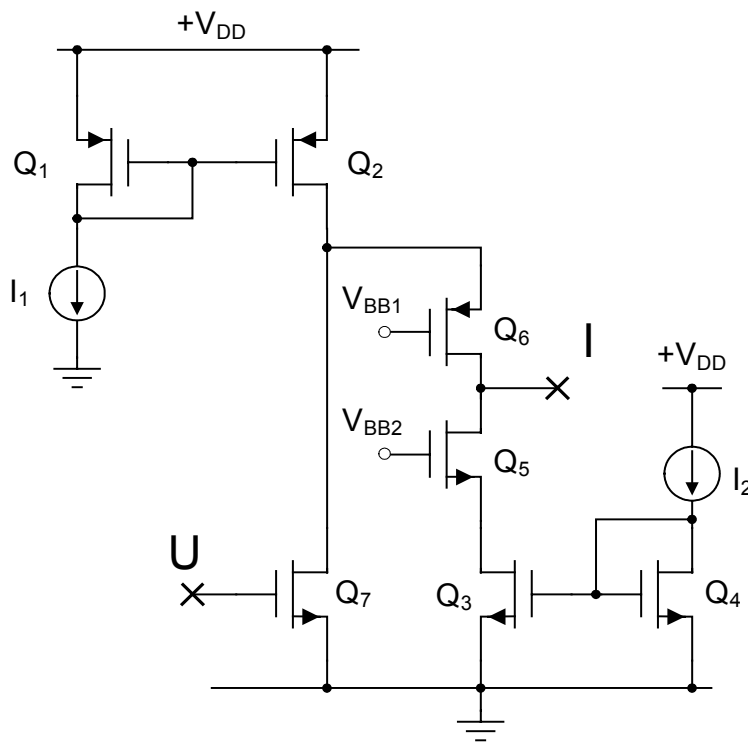
Račun je obavljen pod pretpostvkom da je strujni izvor idealan. Da bi se povećala izlazna otpornost jednosmernog strujnog izvora za polarizaciju kaskodnog pojačavača, koristi se kaskodna veza dva strujna izvora. Takođe se koriste i dva stepena sa zajedničkim gejtom da bi se povećala izlazna otpornost samog kaskodnog pojačavača, slika 10.8. Veća izlazna otpornost kaskodnog pojačavača znači veće naponsko pojačanje.

Konstrukcija na slici 10.8. ima dupli kaskodni pojačavač sa duplim (kaskodnim) jednosmernim strujnim izvorom i svih pet tranzistora su poredjani u liniji što se označava kao teleskopski kaskodni pojačavač. Njegova mana je što ima mnogo tranzistora između krajeva baterije za napajanje, što nije podesno kada se koriste mali naponi napajanja. Duple konstrukcije se ne prave sa bipolarnim tranzistorima jer se ne povećava izlazna otpornost (10.4).



- \*  $I_0$  - strujni izvor za polarizaciju
- \* Q1, Q2 - ogledalo za polarizaciju strujom ostalih tranzistora
- \*  $V_{BB1}$ ,  $V_{BB2}$ ,  $V_{BB3}$ ,  $V_{BB4}$  - su jednosmerne baterije koje definišu mirnu radnu tačku
- \* napon  $U$  u radnoj tački nije definisan dok se ne nacрта ostatak kola
- \* Q3, Q4 – kaskodni strujni izvor velike otpornosti (dupli)
- \* Q5, Q6 – dupli stepen sa zajedničkim gejtom
- \* Q7 – stepen sa zajedničkim sorsom

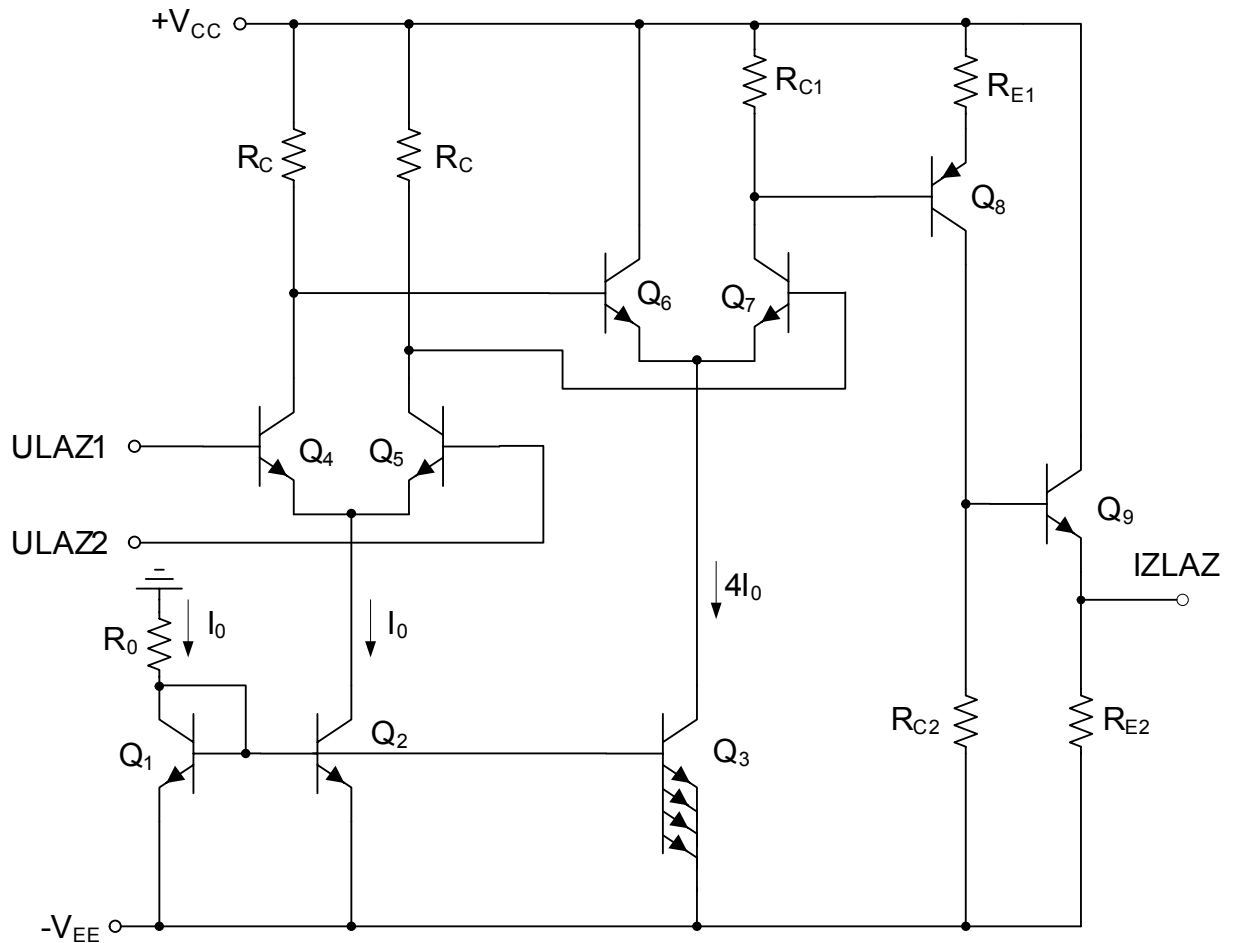
Slika 10.8. Dupli kaskodni pojačavač sa duplim kaskodnim strujnim izvorom.



- \*  $I_1, I_2$  - strujni izvori za polarizaciju
- \* Q1, Q2 – ogledalo za polarizaciju
- \* Q3, Q4 – ogledalo za polarizaciju
- \* Q5 – strujni izvor za kaskodni pojačavač
- \* Q6 – stepen sa zajedničkim gejtom
- \* Q7 – stepen sa zajedničkim sorsom

Slika 10.9. Presavijeni kaskodni pojačavač.

Konstrukcija na slici 10.9. se označava kao presavijen (folded) kaskodni pojačavač. Napravljen je kombinacijom P-kanalnih i N-kanalnih tranzistora i smanjuje broj tranzistora između napajanja i mase. Prikazana je jednostruka (ne dupla) savijena konstrukcija.

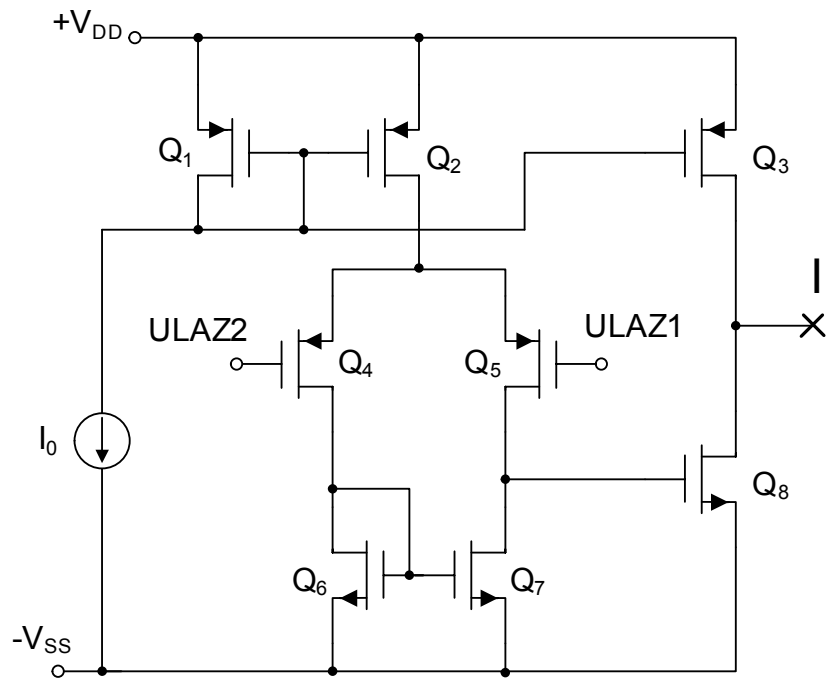


Slika 10.10. Višestepeni integrisani pojačavač sa direktnom spregom.

- \* Q1,Q2,Q3 – strujno ogledalo
- \* Q4,Q5 – prvi diferencijalni pojačavač
- \* Q6,Q7 – drugi diferencijalni pojačavač
- \* Q8 – pomerač nivoa zajedno sa  $R_{E1}$  i  $R_{C2}$
- \* Q9 – izlazni stepen sa zajedničkim kolektorom
- \* Približna vrednost za naponsko pojačanje je:

$$A_v = \frac{v_I}{v_{U1} - v_{U2}} \cong (R_C g_{m1}) \left( \frac{1}{2} R_{C1} g_{m2} \right) \left( \frac{R_{C2}}{R_{E1}} \right).$$

Višestepeni pojačavači se prave i sa više od dva pojačavačka stepena. Slika 10.10. prikazuje integrisani bipolarni pojačavač sa direktnom spregom. Slika 10.11. pokazuje MOS pojačavač u integrisanoj tehnici.



Slika 10.11. Višestepeni MOS integrisani pojačavač sa direktnom spregom.

- \*  $I_0$  – izvor za polarizaciju tranzistora strujom
- \* Q1, Q2, Q3 – ogledala za polarizaciju
- \* Q4, Q5 - diferencijalni pojačavač
- \* Q6, Q7 – ogledala za preslikavanje struja u smislu aktivnog opterećenja diferencijalnog pojačavača
- \* Q8 – izlazni stepen sa zajedničkim emitorom
- \* Približna vrednost za naponsko pojačanje je:

$$A_v = \frac{v_I}{v_{U1} - v_{U2}} \cong g_{m45} (r_{oQ7} \parallel r_{oQ5}) g_{m8} (r_{oQ8} \parallel r_{oQ3}).$$