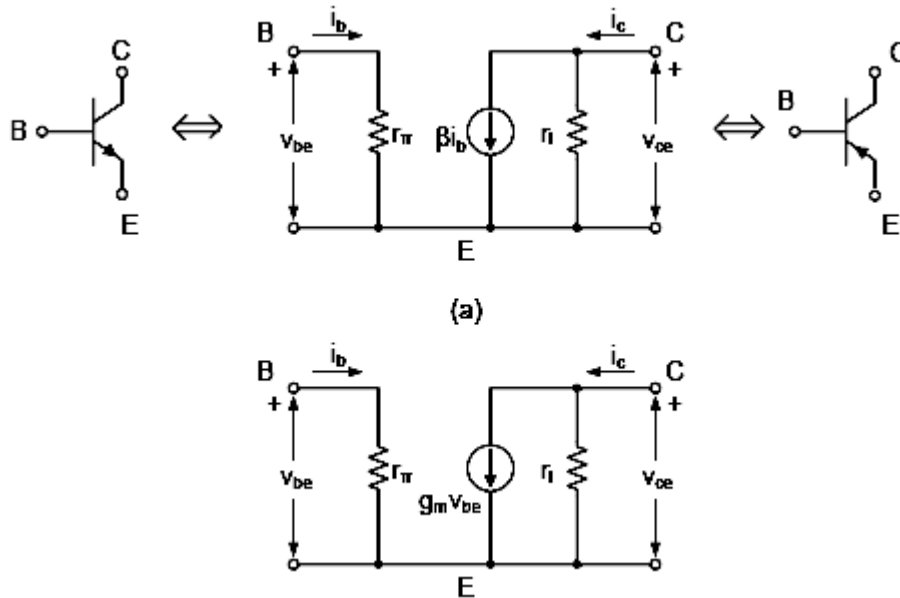


10. Neka elektronska kola

- Alternativni model bipolarnog tranzistora za male signale**

Često se u modelu bipolarnog tranzistora za male signale umesto strujom kontrolisanog strujnog izvora $\beta \cdot i_b$ koristi naponom kontrolisan strujni izvor $g_m \cdot v_{be}$



Ekvivalentni modeli bipolarnog tranzistora za male signale

Kako je $\beta i_b = \beta \frac{v_{be}}{r_\pi} = \frac{\beta}{r_\pi} \cdot v_{be} = g_m \cdot v_{be}$, sledi da je $g_m = \frac{\beta}{r_\pi}$.

Transkonduktansa g_m se direktno može odrediti iz statičkih karakteristika tranzistora kao

$$g_m = \left. \frac{di_C}{dv_{BE}} \right|_Q = \frac{d}{dv_{BE}} \left[I_s e^{v_{BE}/V_T} \right]_Q = I_s e^{v_{BE}/V_T} \Big|_Q \cdot \frac{1}{V_T} = \frac{I_{CQ}}{V_T},$$

gde je I_{CQ} statička struja kolektora u mirnoj radnoj tački Q .

- Kaskadni pojačavači**

Jednostepeni pojačavači realizovani u bipolarnoj, JFET ili MOS tehnologiji imaju niz nedostataka koja ih čine nepraktičnim za realizaciju u integrisanoj tehnologiji. Na primer, naponsko pojačanje u praznom hodu stepena za ZE odnosno stepena sa ZS, presudno zavisi od veličine otpornika u kolu kolektora, odnosno drejna:

$$A_{v0} = -\frac{\beta R_C}{r_\pi} = -g_m R_C \text{ (stepen ZE), odnosno } A_{v0} = -g_m R_D \text{ (stepen ZS) u praznom hodu.}$$

Veće naponsko pojačanje zahteva upotrebu većih otpornika. Dimenzije integrisanih otpornika su nekoliko puta, pa čak i nekoliko desetina puta, veće od dimenzija tranzistora. Dakle, upotreba velikih otpornika smanjuje broj komponenti na datoj površini silicijuma.

Dalje, sve opisane konfiguracije sa jednim tranzistorom, bez obzira na tehnologiju, nužno koriste kondenzatore za spregu sa pobudnim izvorom i sa potrošačem. Kondenzatori su neophodni da se ne bi poremetila mirna radna tačka tranzistora priključivanjem pobude ili narednog stepena. Sprežni kondenzatori treba da imaju veliku kapacitivnost, da bi i za sporo

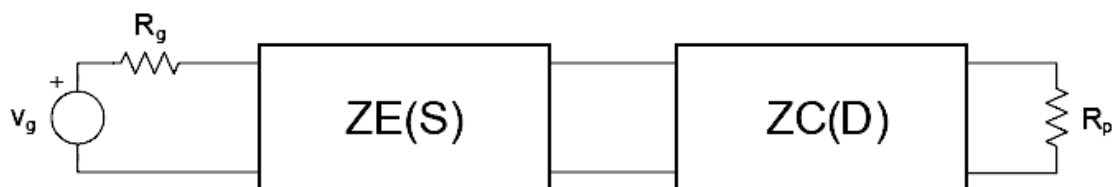
promenljive signale (niske učestanosti) predstavljali kratke spojeve. U realizacijama sa diskretnim komponentama, ovakvi kondenzatori ne predstavljaju problem. Međutim, u integrisanoj tehnologiji nije moguće realizovati kondenzatore velikog kapaciteta na silicijumskoj pločici, pa se mora tražiti neko alternativno rešenje.

Najposle, jednostepeni pojačavači imaju različite osobine. Na primer, stepen za ZE (ZS) ima veliko naponsko pojačanje, ali mu izlazna otpornost nije mala, $R_i = R_c \parallel r_i \approx R_c$ za stepen ZE, odnosno $R_i = r_{ds} \parallel R_D \approx R_D$ za stepen ZS. Najmanju izlaznu otpornost ima stepen sa ZC (ZD), ali je njegovo naponsko pojačanje manje od 1.

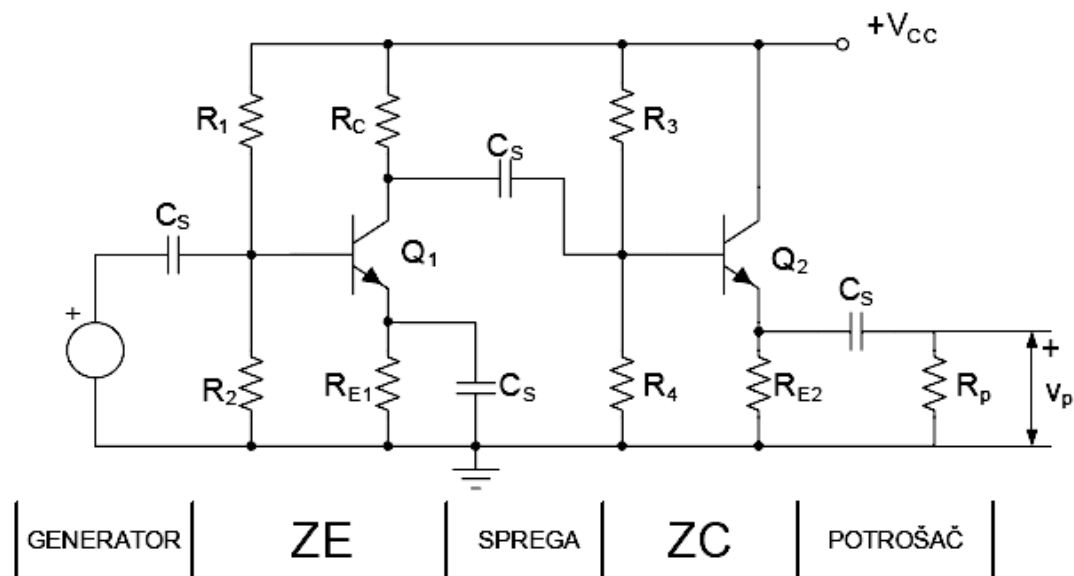
Poželjne karakteristike naponskog pojačavača su:

- velika ulazna otpornost (da ne bi suviše strujno opterećivao prethodni stepen/pobudu),
- veliko naponsko pojačanje,
- mala izlazna otpornost (ponaša se kao idealni naponski izvor prema sledećem stepenu/potrošaču)

Da bi se ispunili ovi zahtevi, pribegava se kaskadnom povezivanju dva ili više jednostepena pojačavača. Ako nam treba veliko naponsko pojačanje i mala izlazna otpornost, logično rešenje je kaskadno sprezanje stepena ZE i ZC, tako da se izlaz prvog ZE stepena dovodi na ulaz drugog ZC stepena. Analogno se može postupiti i sa MOS pojačavačima.



Kaskadna veza dva pojačavačka stepena



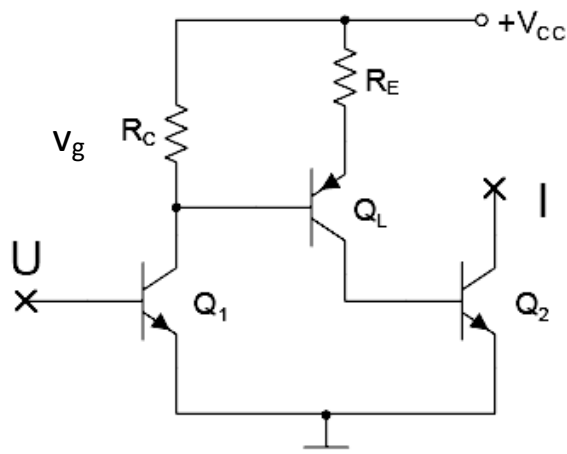
Dvostepeni RC pojačavač ZE–ZC

Povezivanje jednostepenih pojačavača treba obaviti tako da njihovi jednosmerni režimi rada (polarizacije) ostanu nepromenjeni nakon sprezanja, da bi se omogućio optimalni projektovani radni režim svakog pojačavača ponaosob. Sprezanje se obično obavlja preko kondenzatora velike kapacitivnosti, koji za jednosmerni napon (polarizaciju) predstavlja otvorenu vezu, a za korisni, naizmenični signal predstavlja kratak spoj. Na ovaj način, korisni signal se prenosi između stepeni bez slabljenja, a jednosmerni naponi jednog stepena ni na

koji način ne remete polarizaciju drugog stepena. Ovakvi višestepeni pojačavači sa sprežnim kondenzatorima nazivaju se RC pojačavači.

Realizacija RC pojačavača ne predstavlja problem u diskretnoj tehnologiji, ali u integrisanoj tehnologiji nije moguće napraviti sprežne kondenzatore velike kapacitivnosti.

U integrisanoj tehnologiji često se umesto sprežnih kondenzatora koriste tzv. pomerači nivoa. Izlaz prvog ZE stepena (kolektor Q_1) se preko pomerača nivoa, tranzistora Q_L , povezuje na ulaz drugog ZC stepena (baza Q_2). Ulazno kolo U i izlazno kolo I nisu prikazani.



Pomerač nivoa

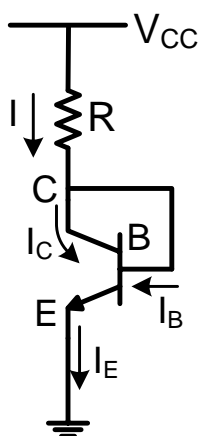
Napon između kolektora i baze PNP tranzistora Q_L jednak je razlici napona $v_{B2} - v_{C1}$, bez obzira na struju koja protiče kroz njega, pod uslovom da je njegova bazna struja mnogo manja od kolektorske struje tranzistora Q_1 . Ako je strujno pojačanje β tranzistora Q_L dovoljno veliko, njegova bazna struja će biti dovoljno mala da se ne poremeti napon na kolektoru Q_1 koji je postojao pre sprežanja. Otpornikom R_E se reguliše intenzitet kolektorske struje tranzistora Q_L , a samim tim i bazne struje

tranzistora Q_2 , jer su one jednake. Međutim, naizmenični signal se prenosi sa slabljenjem između pojačavačkih stepeni. Sprežni kondenzatori C_s više nisu unutar čipa pojačavača, ali se mogu spolja priključiti za povezivanje ulaznog i izlaznog signala.

• Strujno ogledalo – osnovna realizacija u bipolarnoj tehnologiji

Jednostavan način realizacije strujnog izvora je korišćenje tranzistora kao diode u kolu koje se naziva strujno ogledalo.

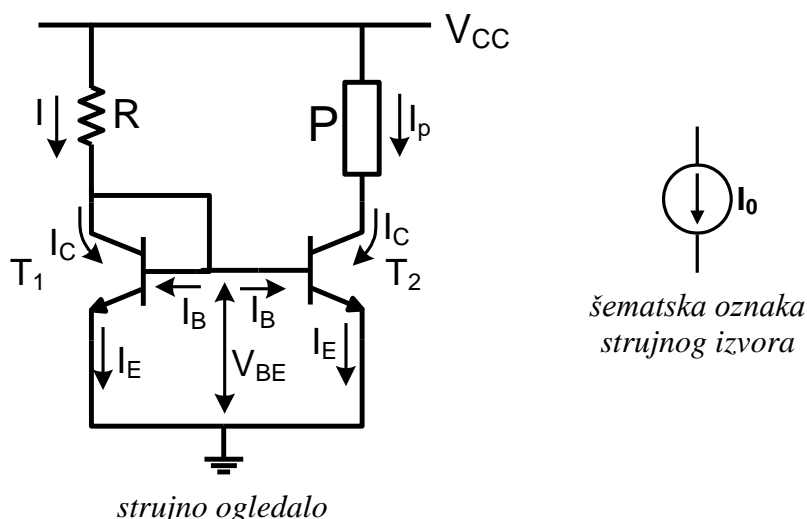
Tranzistor povezan kao dioda :



Primitimo da su baza i kolektor tranzistora kratko spojeni, pa je BC spoj uvek polarisan inverzno (nepropusno). U početnom trenutku, po uključivanju napajanja, tranzistor je neprovodan, nema struje kroz otpornik R , pa ni pada napona na njemu. Na bazi tranzistora je tada napon $v_B = V_{CC}$, a emitor je na masi, pa će tranzistor sigurno provesti, jer je obezbeđena direktna polarizacija spoja BE velikim naponom.

Kada tranzistor provede, ulazi u direktni aktivni režim, napon $V_{BE} \approx 0.7[V]$ praktično ostaje konstantan, a struja kroz otpornik je $I = (V_{CC} - V_{BE}) / R = \text{const.}$ Tranzistor se ponaša se kao propusno polarisana dioda. Promenom otpornosti R može se kontrolisati struja tranzistora.

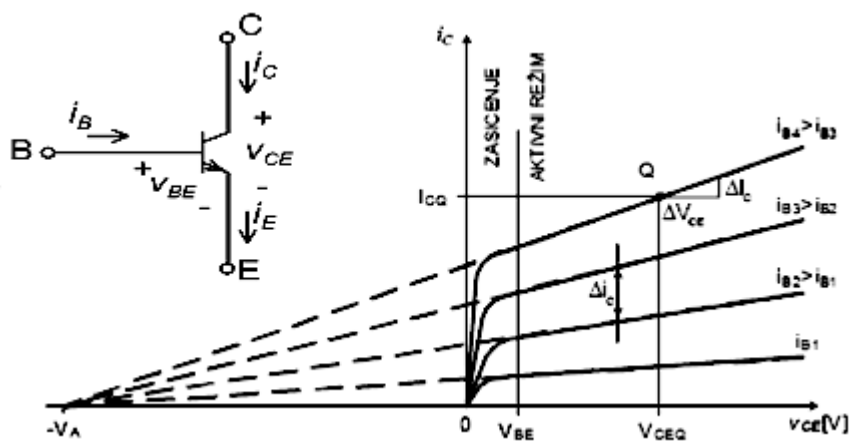
Neka je P potrošač u kolu strujnog ogledala koji treba napajati konstantnom strujom bez obzira na promenu njegove otpornosti. Na osnovu prethodnog, kroz otpornik R i tranzistor T_1 povezan kao dioda, protiče struja $I = (V_{CC} - V_{BE}) / R = \text{const.}$ Ako su tranzistori T_1 i T_2 isti ili vrlo slični, onda su i njihove bazne struje jednake, jer su im i naponi V_{BE} uvek jednaki. Iz jednakosti baznih struja sledi i jednakost kolektorskih struja, jer oba tranzistora imaju isto strujno pojačanje β .



Struja kroz potrošač P je onda $I_p = I = (V_{CC} - V_{BE})/R$, nezavisno od vrednosti otpornosti potrošača P. Jačina struje kroz potrošač se kontroliše otpornikom R. Strujno ogledalo se ponaša kao strujni izvor sve dok je pad napona na potrošaču P značajno manji od napona napajanja V_{CC} , tj. sve dotle dok tranzistor T_2 ne uđe u zasićenje, jer tada prestaje da važi relacija $I_{C2} = \beta I_{B2}$. Dakle, maksimalna otpornost potrošača P određena je uslovom da spoj kolektor baza tranzistora T_2 ostane inverzno polarisan, odnosno uslovom $V_{CE2} = V_{CC} - I_p R_{P\max} \geq V_{BE2} \approx 0.7[\text{V}]$. Strujno ogledalo je vrlo teško realizovati u diskretnoj tehnologiji, dok se visoko upareni tranzistori lako dobijaju u integrisanoj tehnologiji.

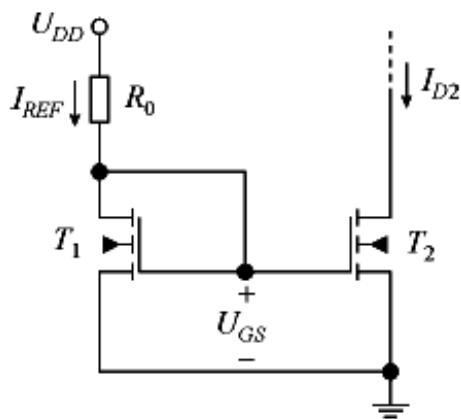
Postoje dva nedostatka prethodne realizacije. Prvi je velika zavisnost preslikane struje od uparenosti strujnog pojačanja tranzistora β . Ako se jedan od tranzistora više zagreje, sa porastom temperature porašće i njegovo β , pa će se strujno ogledalo „razdesiti“.

Drugi nedostatak je uticaj napona v_{CE} na struju kolektora i_C . Na izlaznoj karakteristici tranzistora u direktnom aktivnom režimu, struja i_C se menja sa promenom napona v_{CE} i pri konstantnoj struji baze i_B . Izlazne karakteristike $i_C = f(v_{CE})$ nisu horizontalne linije paralelne apscisnoj osi, već se seku u jednoj tački koja je određena Early-evim naponom $-V_A$. Zato, pri promeni otpornosti potrošača najpre dolazi do promene napona v_{CE} tranzistora T_2 a zatim i do promene njegove struje, iako referentna struja I ostaje konstantna.



Izlazna karakteristika bipolarnog tranzistora $i_C = f(v_{CE})$

• Strujni izvor sa MOSFET tranzistorima



Kako su drejn i gejt MOSFET-a T_1 kratko spojeni, kanal je stisnut na strani drejna, pa T_1 radi u režimu saturacije. Oba tranzistora rade sa jednakim naponima U_{GS} u području zasićenja.

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

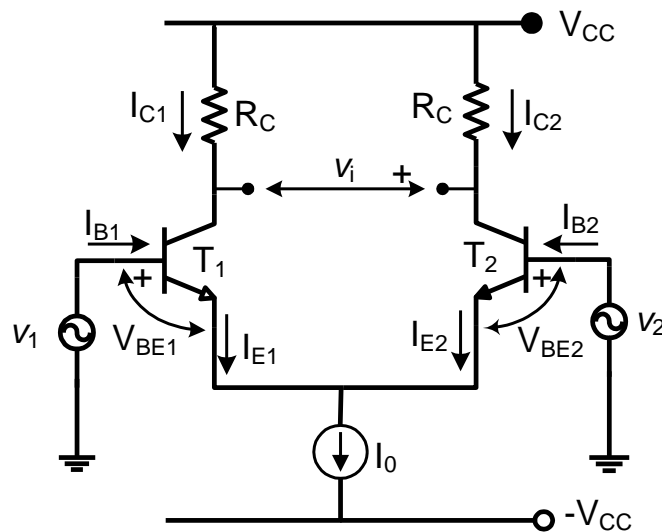
$$I_{D2} = \frac{K'_n}{2} \frac{W_2}{L_2} (U_{GS} - V_T)^2, \quad K'_n = \mu_n C_{ox}.$$

$$I_{D2} = I_{REF} \frac{W_2 / L_2}{W_1 / L_1}, \text{ što za jednake tranzistore daje}$$

$I_{D2} = I_{REF}$ pa se dobija strujno ogledalo. Izlazni otpor strujnog izvora je $R_{iz} = r_{d2} \approx 1 / \lambda_n I_{D2}$.

• Diferencijalni pojačavač

Diferencijalni pojačavač pojačava razliku ulaznih signala $(v_2 - v_1)$, a potiskuje signal njihove srednje vrednosti $(v_1 + v_2)/2$.



diferencijalni pojačavač u bipolarnoj tehnologiji

Analiza rada diferencijalnog pojačavača i izvođenje izraza za diferencijalno i pojačanje signala srednje vrednosti biće predmet razmatranja u okviru Analogne elektronike. Za sada, navedimo samo osnovnu postavku. Ako su upotrebljeni tranzistori identični ili barem vrlo slični, a ulazni naponi vremenski konstantni (jednosmerni) i jednaki, $V_1 = V_2$, jednosmerni izlazni napon V_I treba da bude nula. Ovakvo stanje pojačavača se naziva simetrirano ili izbalansirano. Kako je $V_1 = V_2$, to je i $V_{BE1} = V_{BE2}$ jer su emiteri oba tranzistora kratko spojeni, pa su uz isti koeficijent strujnog pojačanja ($\beta \gg 1$) oba tranzistora, jednake i kolektorske i emitorske struje oba tranzistora. Kako je $I_{E1} + I_{E2} = I_0$ i $I_{E1} = I_{E2}$, to su jednosmerne emitorske struje jednake $I_{E1} = I_{E2} = I_0 / 2$, gde je I_0 struja strujnog izvora.

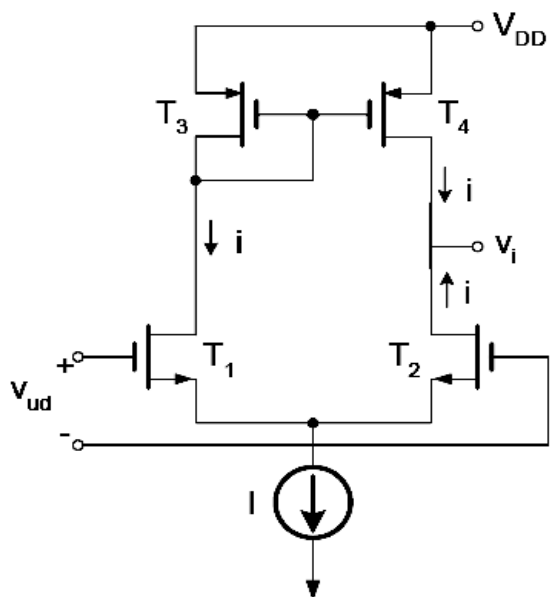
Naponi emitera oba tranzistora su jednaki $v_{E1} = v_{E2}$, a koeficijent strujnog pojačanja tranzistora $\beta \gg 1$, pa približno važi $i_{C1} \approx i_{E1}$ i $i_{C2} \approx i_{E2}$. Trenutna vrednost izlaznog napona je onda: $v_I = v_{I2} - v_{I1} = (V_{CC} - R_C i_{C2}) - (V_{CC} - R_C i_{C1}) = R_C (i_{C1} - i_{C2})$.

Navedimo ovde, bez izvođenja, još samo izraz za pojačanje signala razlike (diferencijalno pojačanje): $A_d = (R_C I_0) / (2V_T) = g_m R_C = (\beta / r_\pi) R_C$, gde je $I_{CQ} \approx I_{EQ} = I_0 / 2$ jednosmerna kolektorska struja oba tranzistora u MRT (pri $V_2 = V_1$), a $g_m = I_{CQ} / V_T$, β i $r_\pi = \beta / g_m$ hibridni parametri modela za male signale. Dakle, pojačanje razlike ulaznih napona je veliko, jer je β veliko i $R_C \gg r_\pi$.

Diferencijalni pojačavač sa MOS tranzistorima bi se mogao realizovati na isti način kao i sa bipolarnim. Međutim, kako otpornici u drejnu ne smeju da budu veliki zbog obezbeđenja dovoljne jednosmerne struje drejna, kao i zbog toga što je transkonduktansa (g_m) MOS tranzistora znatno manja od transkonduktanse bipolarnih tranzistora, pojačanje takvog diferencijalnog pojačavača bilo bi suviše malo, a njegova realizacija u integrisanoj tehnici neefikasna zbog korišćenja otpornika.

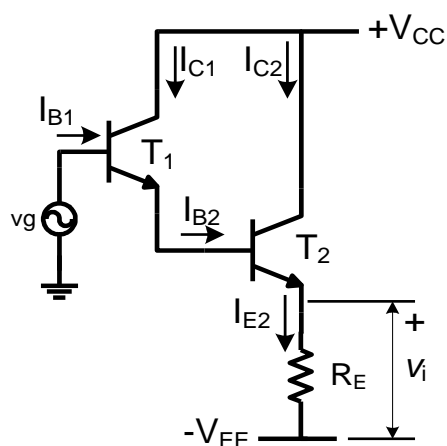
Zato se u integrisanoj tehnici uvek primenjuje nešto složenija realizacija diferencijalnog pojačavača sa strujnim izvorima kao dinamičkim opterećenjem pojačavačkih tranzistora.

Sa savremenim MOS tranzistorima može se postići diferencijalno naponsko pojačanje od 20 do 100 puta.



integrisani MOS dif. poj. sa aktivnim opterećenjem i nesimetričnim izlazom

• Darlingtonov par



Pojačavač sa Darlingtonovom spregom može se ekvivalentirati jednim tranzistorom čije je strujno pojačanje jednako proizvodu strujnih pojačanja upotrebljenih tranzistora.

Kako je koeficijent strujnog pojačanja upotrebljenih tranzistora β veliki, to se bazna struja oba tranzistora može zanemariti u odnosu na kolektorsku, pa važi:

$$i_{E2} \approx i_{C2} = \beta_2 \cdot i_{B2}. \text{ Dalje je}$$

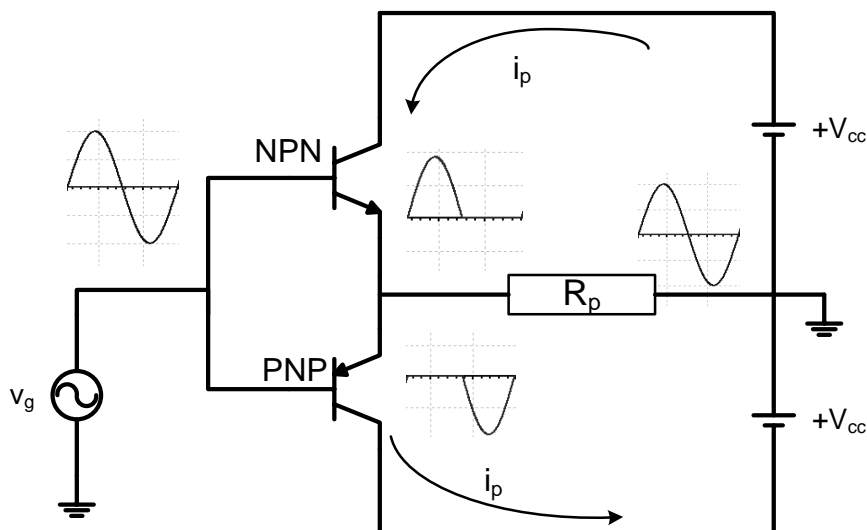
$$i_{B2} \approx i_{E1} \approx i_{C1} = \beta_1 \cdot i_{B1}.$$

Izlazna struja je onda $i_{E2} \approx \beta_2 \cdot i_{B2} = \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot i_{B1}$, pa se Darlingtonov par ponaša kao jedan tranzistor sa izuzetno velikim faktorom strujnog pojačanja $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$.

• Pojačavač snage sa komplementarnim parom

Korišćenjem NPN i PNP tranzistora moguće je napraviti snažan izlazni stepen koji se može direktno spregnuti kako sa prethodnim pojačavačkim stepenom, tako i sa potrošačem. Zbog odsustva sprežnih kondenzatora nema neželjenog slabljenja u području niskih učestanosti (pogodno za izlazni stepen audio pojačavača).

Neka je pobuda naponska, prostoperiodična, sinusnog oblika. Tokom pozitivne poluperiode ulaznog napona, NPN tranzistor radi u direktnom aktivnom režimu kao pojačavač u sprezi sa ZC (emitter – follower). Za to vreme PNP tranzistor je zakočen, pa kroz njega ne protiče struja. Dakle, potrošač R_p se napaja strujom preko gornje baterije V_{CC} i NPN tranzistora.



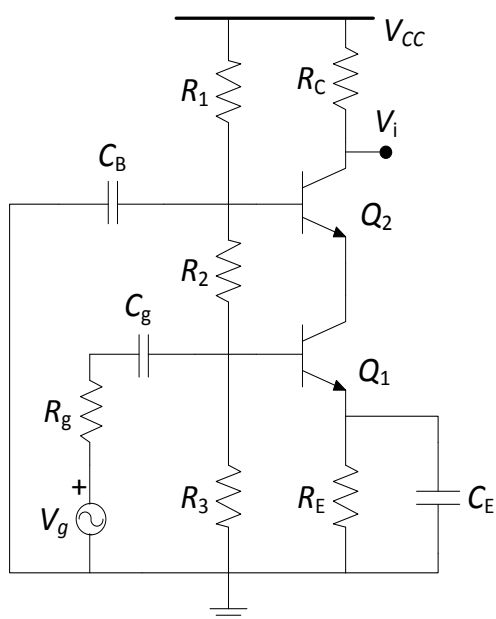
Tokom negativne poluperiode, NPN tranzistor je zakočen, a PNP tranzistor provodan u direktnom aktivnom režimu. Potrošač se napaja strujom preko donje baterije V_{CC} i PNP tranzistora.

Izobličenja izlaznog signala koja unosi pokazana šema su znatna i najčešće neprihvatljiva u praksi. Osnovni problem je prekid u napajanju potrošača R_p kada pobudni napon prolazi kroz nulu, jer su tada kratkotrajno zakočena oba tranzistora. Naponi na njihovim bazama su nedovoljni da obezbede propusnu polarizaciju BE spojeva. Pored ovoga treba voditi računa i o strujnoj zaštiti izlaza od preopterećenja.

• Kaskodni pojačavač

Kaskodni pojačavač je dvostepeni pojačavač gde je stepen sa ZE na ulazu i stepen sa ZB na izlazu. Osnovna odlika mu je velika brzina rada, pa se može koristiti i na visokim učestanostima.

Pojednostavljena analiza rada pojačavača (detaljna analiza je u okviru Analogne elektronike): Za naizmenični signal baterija V_{CC} i svi sprežni kondenzatori u kolu su kratko spojeni. Struje kolektora tranzistora Q_1 i Q_2 su približno jednake $i_{C1} = i_{E2} = i_{B2} + i_{C2} \approx i_{C2}$ jer je $\beta_1 \approx \beta_2 \gg 1$. Sledi da su onda i naponi spojeva BE tranzistora jednaki, $v_{BE1} = v_{BE2}$, jer je $i_C \approx I_S e^{v_{BE}/V_T}$.



Dalje je $v_{BE1} \approx v_g$ jer je tipično $R_g \approx 0$. Takođe $v_{C1} = -v_{BE2}$, jer je baza Q_2 na masi za naizmenični signal, pa je naponsko pojačanje prvog stepena:

$$A_1 = \frac{v_{C1}}{v_g} = \frac{-v_{BE2}}{v_{BE1}} = -1. \text{ Naponsko pojačanje}$$

drugog stepena izračunava se iz $v_{C2} = -i_{C2}R_C = -g_{m2}v_{BE2} \cdot R_C$ i $v_{E2} = -v_{BE2}$ kao

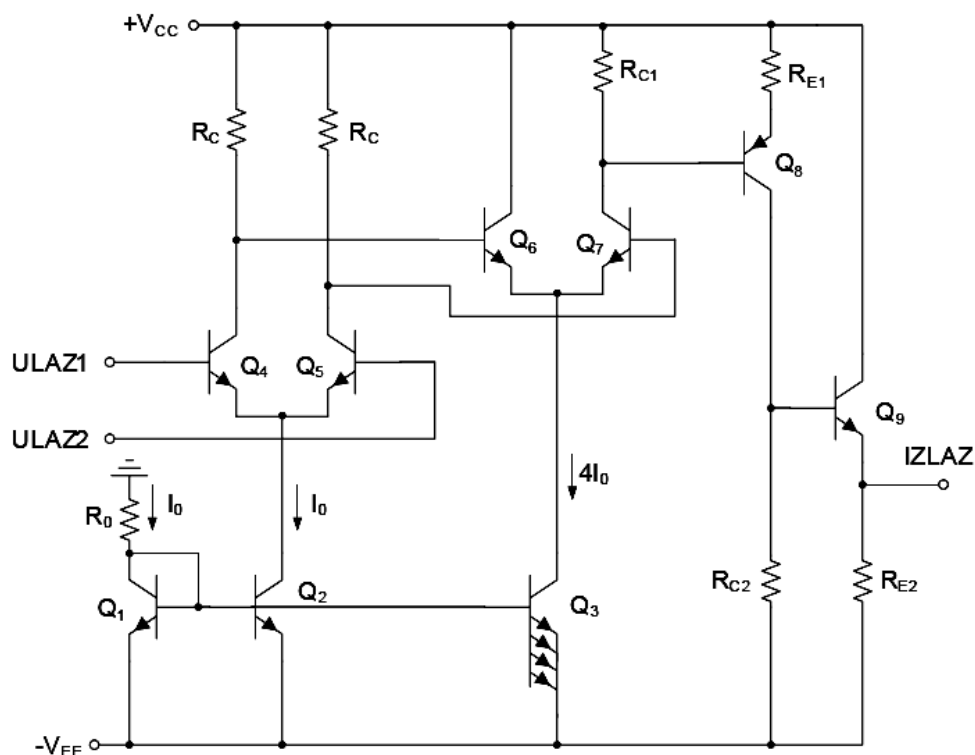
$$A_2 = \frac{v_{C2}}{v_{E2}} \approx \frac{1}{-v_{BE2}} (-g_{m2}R_C)v_{BE2} \approx g_{m2}R_C, \text{ pa}$$

je ukupno naponsko pojačanje,

$$A = A_1 \cdot A_2 = -g_{m2} \cdot R_C, \text{ približno jednako pojačanju stepena sa ZE.}$$

• Složeniji višestepeni pojačavači

Višestepeni pojačavači se mogu praviti i sa više od dva pojačavačka stepena.



Višestepeni naponski pojačavač u bipolarnoj tehnologiji

Q_1, Q_2, Q_3 — strujno ogledalo za polarizaciju:

Q_1, R_0 zadavanje referentne struje ; Q_2 i Q_3 (višeemitorski) preslikački tranzistori

Q_4, Q_5 — prvi diferencijalni pojačavač

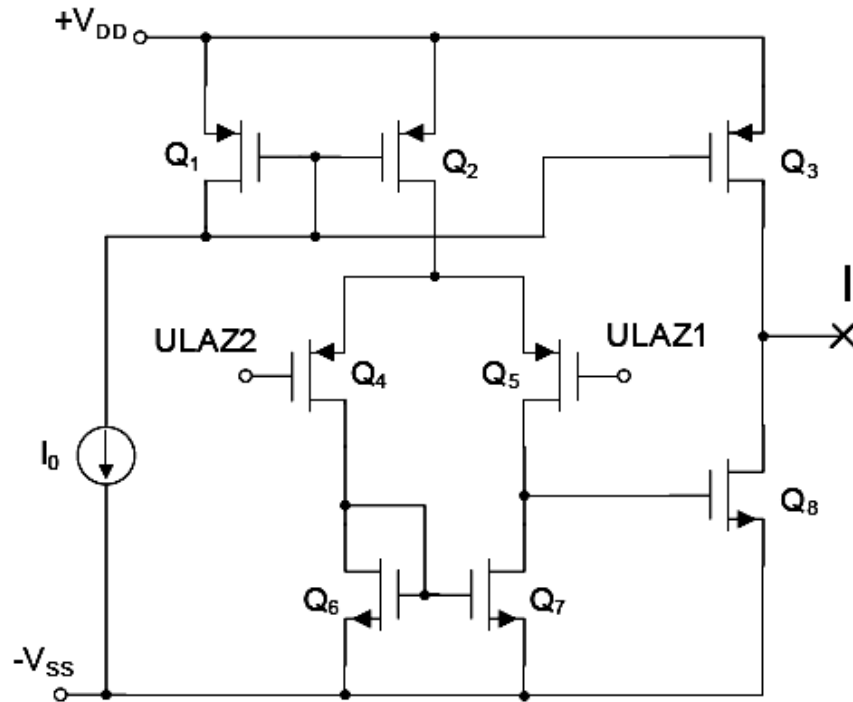
Q_6, Q_7 — drugi diferencijalni pojačavač

Q_8 — pomerač nivoa sa R_{E1} i R_{C2}

Q_9 — izlazni stepen sa ZC

Naponsko pojačanje je približno:

$$A_V = \frac{v_{IZLAZ}}{v_{ULAZ1} - v_{ULAZ2}} = (g_{m1} R_C) \left(\frac{1}{2} g_{m2} R_{C1} \right) \frac{R_{C2}}{R_{E1}}$$



Višestepeni pojačavač u MOS tehnologiji

I_0 — strujni izvor

Q_1, Q_2, Q_3 — strujna ogledala za polarizaciju

Q_4, Q_5 — diferencijalni pojačavač

Q_6, Q_7 — aktivno opterećenje dif. pojačavača (strujno ogledalo)

Q_8 — izlazni stepen sa ZS

Naponsko pojačanje je približno:

$$A_V = \frac{v_I}{v_{ULAZ1} - v_{ULAZ2}} = g_{m45} (r_{0Q7} \parallel r_{0Q5}) g_{m8} (r_{0Q8} \parallel r_{0Q3}).$$