

Predmet: ELEKTRONIKA U MEHATRONICI
Predmetni nastavnik: Dr Nándor Burány

1. Semestar specijalističkih studija iz
Mehatronike

1. GLAVA
KOLA ANALOGNE ELEKTRONIKE

Teme

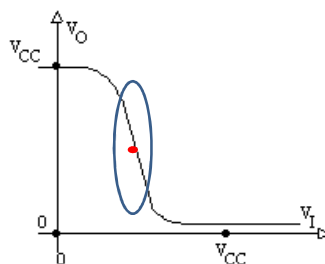
- ❖ Linearna kola:
 - pojačavači,
 - filtri
 - oscilatori
- ❖ Nelinearna kola:
 - kola za zaštitu,
 - modulatori/demodulatori
 - (analogni) množači,
 - ispravljač,
 - nelinearni pojačavač
 - komparator
- ❖ Fizičke osobine analognih kola

Pojačavačka kola

- Cilj je: povećanje signala (struja, napon, snaga).
- Gde je to potrebno: audio tehnika, senzori, aktuatori, merenja, regulaciona kola itd.
- Obradiće se sledeće **teme**:
 - modelovanje pojačavača
 - pojačavači sa povratnom spregom,
 - operacioni pojačavači,
 - kola sa operacionim pojačavačima,
 - pojačavač sa zajedničkim emitorom,
 - pojačavač sa zajedničkim kolektorom,
 - pojačavač sa zajedničkom bazom,
 - diferencijalni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima,
 - strujni izvori, aktivna opterećenja, strujna ogledala,
 - unutrašnja struktura i realni parametri operacionih pojačavača
 - realizacija pojačavača sa željenom prenosnom karakteristikom,
 - merenje parametara operacionog pojačavača.

Šta je potrebno za realizaciju pojačavača?

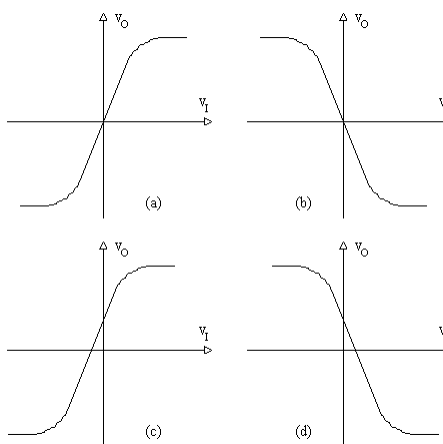
- **Ideja:** potrebno je realizovati strmu prenosnu karakteristiku – tako se može dobiti jak odziv na promenu ulaznog signala – veliko pojačanje.
- **Zadaci** pri realizaciji pojačavača:
 - dobijanje strme prenosne karakteristike,
 - podešavanje i stabilizacija radne tačke da bi bili na pogodnom delu karakteristike,
 - pravilno priključivanje izvora signala i potrošača.



5

Pojačavačke karakteristike

- **Idealno** bi bilo da se formira prenosna karakteristika oblika $V_O = k \cdot V_I$.
- Kod realnih pojačavača preko izvesnih ulaznih vrednosti karakteristika gubi strminu. Razlog je: tranzistori se zakoče ili ulaze u zasićenje.
- Podela pojačavača prema karakteristici:
 - da li karakteristika prolazi kroz koordinatni početak (pojačavači bez ofseta ili sa ofsetom)
 - rastuća (neinvertujuća) i opadajuća (neinvertujuća) karakteristika.



6

Modelovanje pojačavača

- Svaki linearni pojačavač se može opisati sa svega tri parametra:
 - pojačanje (A),
 - ulazna otpornost (R_I),
 - izlazna otpornost (R_O).

- Pojačanje se definiše na četiri načina:

- naponsko pojačanje:

$$A_V = V_o / V_i$$

- strujno pojačanje:

$$A_I = I_o / I_i$$

- prenosna otpornost:

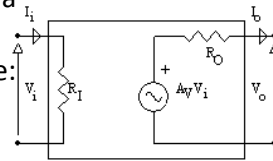
$$R_M = V_o / I_i$$

- prenosna

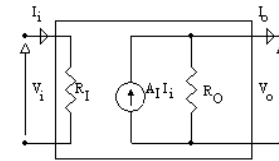
provodnost:

$$G_M = I_o / V_i$$

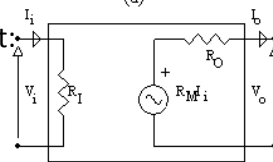
- Ubiranje u određenu kategoriju se vrši na bazi odnosa ulazne otpornosti pojačavača i otp. izvora i na bazi odnosa izlazne otp. pojačavača i otp. potrošača.



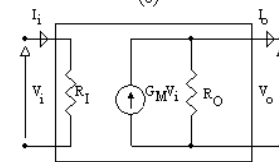
(a)



(b)



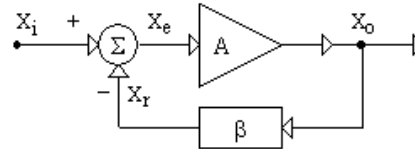
(c)



(d)

Pojačavači sa povratnom spregom - osnovi

- povratna sprega: kombinacija ulaznog signala sa izlaznim signalom.
- Cilj: poboljšanje parametara pojačavača.
- Blok šema:



- Polazne jednačine:

$$X_o = A X_e \quad X_e = X_i - X_r \quad X_r = \beta X_o$$

- Rezultati:

$$X_o = \frac{A}{1 + \beta A} X_i \quad A_r = \frac{A}{1 + \beta A}$$

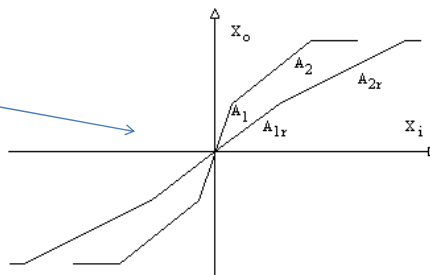
Tipovi povratne sprege

- **negativna** (vraćeni signal smanjuje ulazni signal – primenjuje se kod pojačavača, regulacionih kola itd.), smanjuje se rezultatno pojačanje ($A_r < A$). To se lako nadoknađuje sa dodatnim pojačavačkim stepenom u osnovnom pojačavaču.
- **pozitivna** (vraćeni signal povećava ulazni signal – primenjuje se kod oscilatora, komparatora itd.), rezultatno pojačanje je veće ($A_r > A$) ili čak postane beskonačno.

9

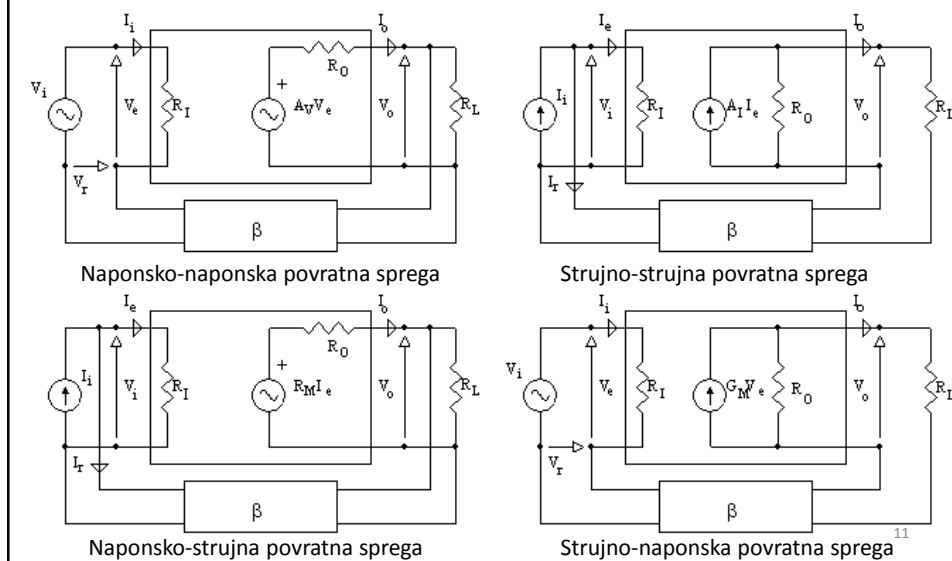
Osobine pojačavača sa negativnom povratnom spregom

- A_r pokazuje manju osetljivost na promene parametara osnovnog pojačavača:
$$\frac{dA_r}{A_r} = \frac{1}{1 + \beta A} \frac{dA}{A}$$
- Linearizuje se prenosna karakteristika:
- Proširuje se frekvencijski opseg.
- Poboljšava se ulazna i izlazna otpornost.



10

Povezivanja kola povratne spregu u zavisnosti od modela pojačavača

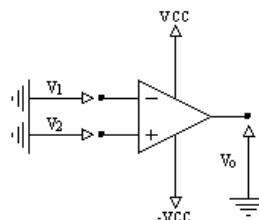


Operacioni pojačavači – osnovi

- Dobar naponski pojačavač ima sledeće osobine: veliko pojačanje, velika ulazna otpornost, mala izlazna otpornost.
- Sa jednim tranzistorom ili sa malim brojem tranzistora ne može se ostvariti takav idealizovani pojačavač.
- Proizvode se takvi, skoro idealni pojačavači – to su operacioni pojačavači.

Grafički simbol i karakteristike

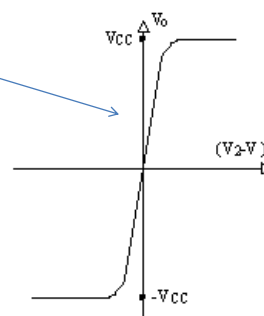
- Grafički simbol (diferencijalni ulaz, dvostruko napajanje, jednostrani izlaz):



- Prenosna karakteristika:
- Pojačanje na linearnom delu:

$$V_o = A(V_2 - V_1)$$

- $A \sim 10^5$, $R_i \sim G\Omega$ ili $T\Omega$, $R_o \sim \Omega$ ili 10Ω .



13

Kola sa idealnim operacionim pojačavačima – osnovi

- Operacioni pojačavači se redovno primenjuju sa (negativnom povratnom spregom).
- Nema potrebe za direktnu primenu kola sa tako velikim pojačanjem kao što je tipično kod operacionih pojačavača, javljaju se i razni problemi (zasićenje, izobličenje, zaoscilovanje...)
- Veliko pojačanje \rightarrow jaka povratna sprega \rightarrow stabilni parametri.

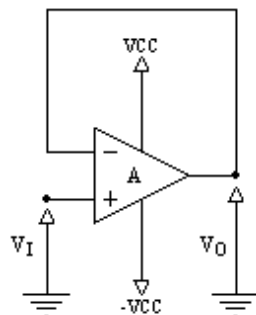
14

Sleditelj napona

- Kompletan izlazni signal se vraća na invertujući ulaz.
- Jednačine:

$$V_I = V_+ = V_-$$

$$V_O = V_I$$
- Osobine:
 - jedinično pojačanje,
 - velika ulazna otpornost,
 - mala izlazna otpornost.
- Primena: odvojni stepen.



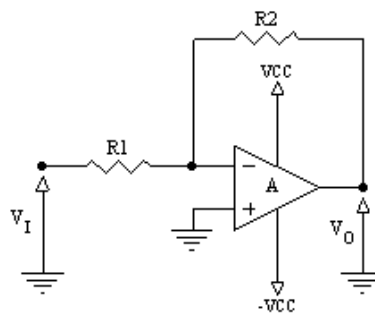
15

Invertujući pojačavač

- Invertujući pojačavač kod kojeg se može precizno zadati pojačanje.
- Trebalo bi da se analizira kao naponski pojačavač sa strujnom pobudom.
- Jednačine:

$$I_{R1} = \frac{V_I}{R_1} \quad V_O = V_I - R_2 I_{R2}$$

$$A_r = \frac{V_O}{V_I} = -\frac{R_2}{R_1}$$
- Pojačanje je određeno odnosom dva otpornika.

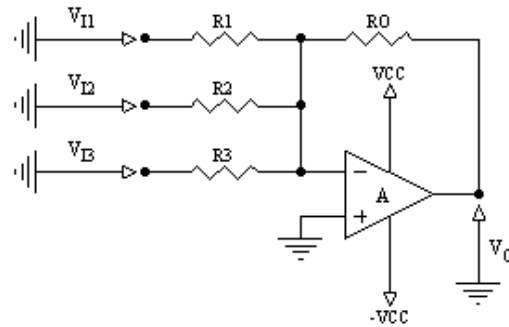


16

Pojačavač za sabiranje signala

- Uopštenje invertujućeg pojačavača za slučaj više ulaza.
- Polazi se od uslova $V_- = V_+ = 0$.
- Izraz za izlazni napon je sledeći:

$$V_o = -\frac{R_o}{R_1}V_{I1} - \frac{R_o}{R_2}V_{I2} - \frac{R_o}{R_3}V_{I3}$$



17

Neinvertujući pojačavač

- Polazna jednačina je:
 $V_I = V_+ = V_-$
- Odavde struja otpornika R_1 je:

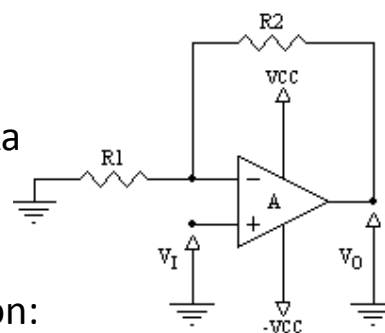
$$I_{R1} = \frac{V_I}{R_1}$$

- Formula za izlazni napon:

$$V_o = V_I + R_2 I_{R1} = V_I + \frac{V_I}{R_1} R_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_I,$$

- Rezultujuće pojačanje je:

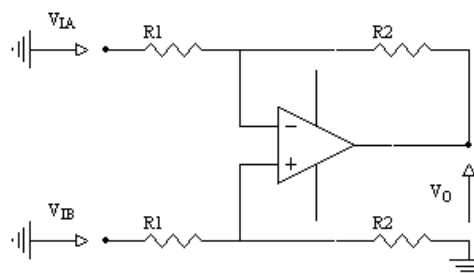
$$A_v = \frac{V_o}{V_I} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



18

Pojačavač razlike dva napona

- Nije uzemljen nijedan kraj izvora signala – treba da se pojača razlika potencijala između dve tačke.
- Za proračun izlaznog signala koristi se teorema superpozicije.
- Postoje i bolja ali komplikovanija rešenja za ovu namenu.



$$V_{OA} = -\frac{R_2}{R_1} V_{IA}$$

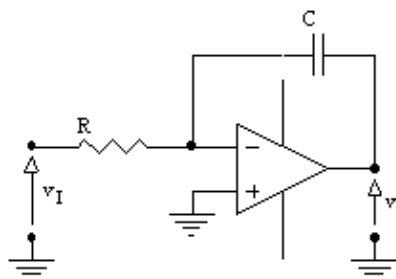
$$V_{OB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{IB} = \frac{R_2}{R_1} V_{IB}$$

$$V_O = (V_{IB} - V_{IA}) \frac{R_2}{R_1}$$

19

Kolo za integraljenje

- Formira vremenski integral ulaznog signala.
- Polazni uslov je: $V_- = V_+ = 0$.
- Struja otpornika je jednaka struji kondenzatora.
- Pošto je $v_O = v_1 - v_C$ sledi:



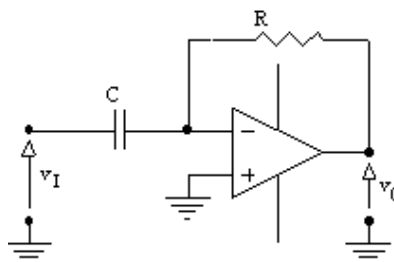
$$i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt}$$

$$v_O(t) = -\frac{1}{RC} \int v_I(t) dt$$

20

Kolo za diferenciranje

- Otpornik i kondenzator menjaju mesta.
- Slično izvođenje kao kod kola za integraljenje.
- Formula za izlazni napon (formira se izvod signala):
- Ovo kolo je jako osetljivo na smetnje i sklon je zaoscilovanju.



$$v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$

21

Uvod u konstrukciju tranzistorskih pojačavača

Već i sa **jednom aktivnom komponentom** može da se dobije značajno pojačanje, ako se uspešno reše sledeći zadaci:

- Treba da se formira kolo kod koje je jedan deo **prenosne karakteristike sa velikom strminom**.
- Aktivnu komponentu treba tako **polarisati** da bi kolo radilo na strmom delu karakteristike.
- Ulazni i izlazni **signal treba tako spregnuti** da prisustvo izvora signala i potrošača ne dovodi do promene u polarizaciji (treba da reaguje samo na signal!).

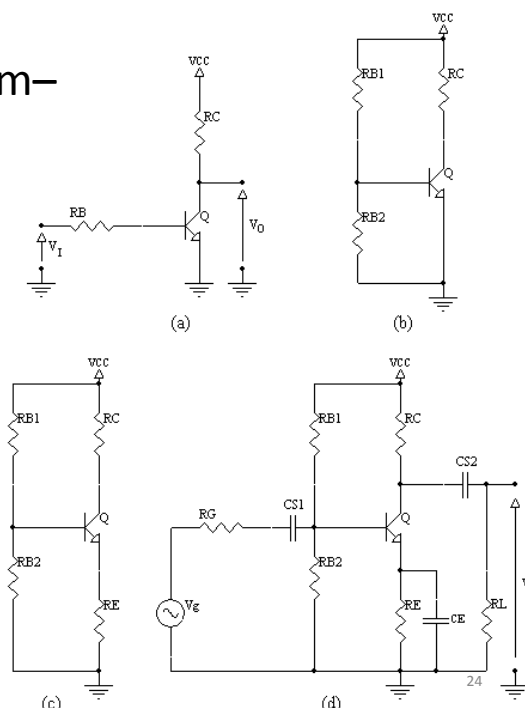
22

Elementi prostih pojačavača

- Aktivna komponenta može biti: bipolarni tranzistor, **JFET**, **MOSFET**, ponekad **IGBT** – pogodnim ulaznim signalima kod ovih komponenti moguća je kontinualna promena struje/napona.
- **Tiristor nije pogodan** za izgradnju pojačavača zbog bistabilnog ponašanja.
- Redovno je **jedan izvod aktivne komponente zajednički** za ulazno i izlazno kolo: po tome pojedini pojačavački stepeni dobijaju svoje nazive (pojačavač sa zajedničkim emitorom, pojačavač sa zajedničkim kolektorom, pojačavač sa zajedničkom bazom,...).
- **Pored aktivnih komponenti** za izradu pojačavača uglavnom koristimo otpornike i izvore napajanja. Po potrebi se koriste kondenzatori, ređe kalemovi (uglavnom u radio tehnici).²³

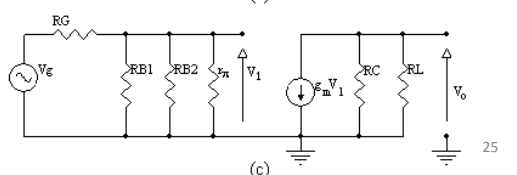
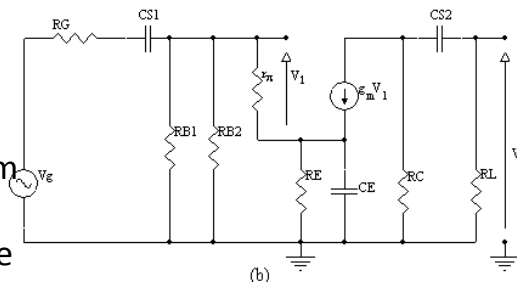
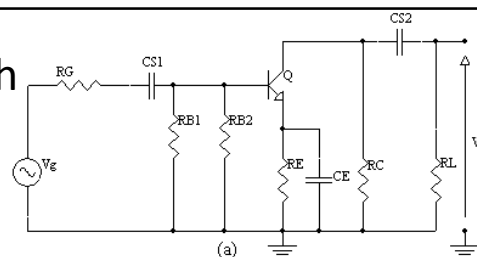
Pojačavač sa zajedničkim emitorom – konstrukcija

- Pojačavač sa zajedničkim emitorom se može izvesti iz prostog kola sa bipolarnim tranzistorom koji u izvesnom opsegu ulaznog signala ima strmu prenosnu karakteristiku (a).
- Dovođenje u pogodnu radnu tačku obezbeđuju R_{B1} i R_{B2} + izvor napajanja (b).
- Stabilizacija radne tačke se vrši pomoću R_E (c).
- V_g i R_L se priključuju preko kondenzatora (d) – formira se RC visoko propusnik. C_E smanjuje uticaj R_E na pojačanje.



Analiza za režim malih signala

- Proračun parametara A_v , A_i , R_i , R_o .
- Isključuje se izvor napajanja ($V_{CC}=0$) (a).
- Tranzistor se zamenjuje sa hibridnim- π modelom (b).
- Zanemare se impedanse kondenzatora (c) – na ovom koraku je emitor postao zajednički izvod za ulaz i izlaz.

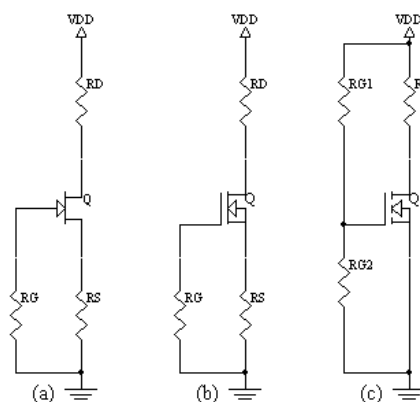


Osobine pojačavača sa zajedničkim emitorom

- Kolo dobijeno prethodnim modelovanjem se analizira poznatim metodama analize elektronskih kola – izračuna se pojačanje i ulazna i izlazna otpornost.
- Očekuju se sledeći rezultati:
 - $A_v=10...100$,
 - $A_i=10...100$,
 - $R_i=1k\Omega...10k\Omega$,
 - $R_o=1k\Omega...10k\Omega$.
- Dobija se relativno veliko naponsko i strujno pojačanje.
- Ulazna i izlazna otpornost su umereni.

Pojačavači sa zajedničkim sorsom

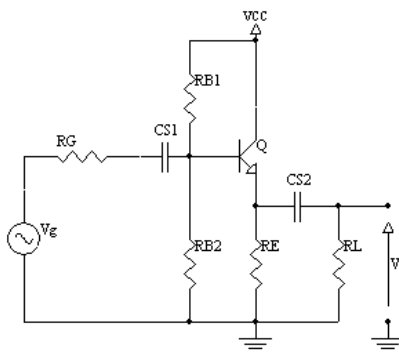
- Tu će source biti zajednički izvod – tako će se dobiti slični rezultati.
- Polarizaciju ovih komponenti treba rešiti na sledeće načine:
 - JFET (a),
 - MOSFET sa ugrađenim kanalom (b),
 - MOSFET sa indukovanim kanalom (c).
- Naponsko pojačanje se dobije na sličnom nivou. Pošto je struja gate-a jednaka nuli, dobija se skoro beskonačno strujno pojačanje i ulazna otpornost.



27

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom – konstrukcija

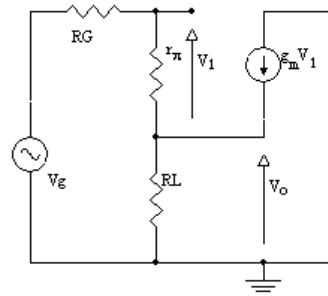
- Polazna šema je slična kao kod pojačavača sa zajedničkim emitorom.
- Ne koristi se kolektorski otpornik.
- Izlazni signal se uzima sa emitora.
- Ne koriste se sprežni kondenzatori u svakom slučaju – potrošač može biti ujedno i emitorski otpornik.



28

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom – analiza i karakteristike

- Isti koraci u modelovanju kao kod prethodnog kola.
- Na kraju modelovanja kolektor postaje zajednički izvod.
- Očekivani rezultati:
 - $A_v \approx 1$,
 - $A_f = 10 \dots 100$,
 - $R_i = 10 \text{ k}\Omega \dots 100 \text{ k}\Omega$,
 - $R_o = 10 \Omega \dots 100 \Omega$.
- Pogodan za odvojni stepen.

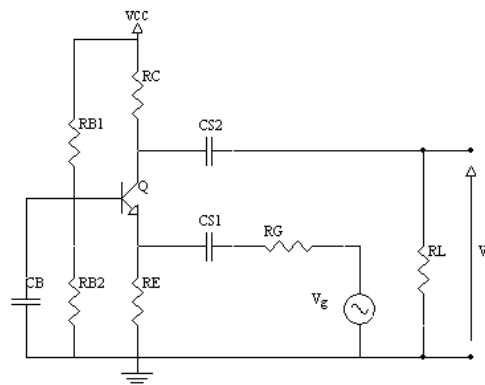


- Slični pojačavači se mogu graditi sa JFET-om ili MOSFET-om (zajednički drain).
- Kod njih će se dobiti još veća ulazna otpornost i strujno pojačanje.

29

Pojačavač sa zajedničkom bazom – konstrukcija

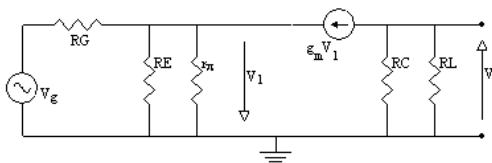
- Polazna šema je slična kao kod pojačavača sa zajedničkim emitorom.
- Ulazni signal se vodi na emitor.
- Izlazni signal se uzima sa kolektora.



30

Pojačavač sa zajedničkom bazom – analiza i karakteristike

- Isti koraci u modelovanju kao kod prethodnog kola.
- Na kraju modelovanja baza će postati zajednički izvod (zbog C_B -a).
- Očekivani rezultati:
 - $A_V = 10 \dots 100$,
 - $A_f \approx 1$,
 - $R_i = 10 \Omega \dots 100 \Omega$,
 - $R_o = 1 k\Omega \dots 10 k\Omega$.
- Slični pojačavači se mogu graditi sa JFET-om ili MOSFET-om (zajednički gate).



31

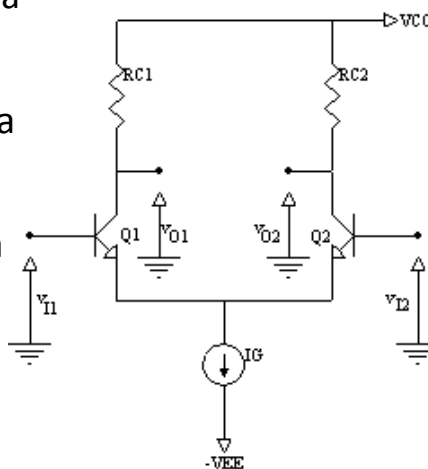
Diferencijalni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima

- Jednotranzistorski pojačavači se obično ne mogu direktno sprežati niti međusobno, niti sa izvorom signala niti sa potrošačem, zbog velikog ofseta.
- U velikom broju slučajeva to nije nikakav problem (na pr. audiotehnika, radiotehnika...).
- U drugim slučajevima (na pr. merna tehnika, obrada jednosmernih i niskofrekvencijskih signala) potrebno je realizovati pojačavače bez (značajnog) ofseta i time omogućiti direktno sprežanje.
- Diferencijalni pojačavač ima takve osobine.

32

Konstrukcija tranzistorskog diferencijalnog pojačavača

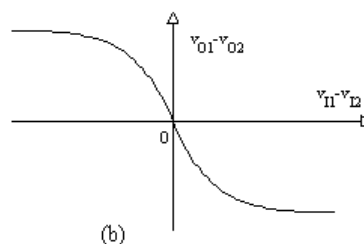
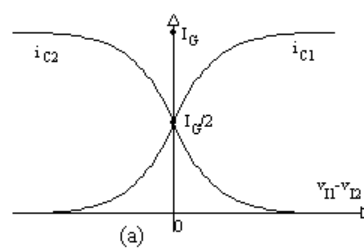
- Potrebna su dva tranzistora i strujni izvor.
- Simetrična sprega, parametri tranzistora treba da su slični.
- Dva ulaza. Nije obavezno da se koriste oba ulaza (na pr. jedan se može uzemljiti). Za ulazni signal se obično smatra razlika napona između dve baze.
- Izlazni naponi su naponi kolektora ili češće njihova razlika.



33

Karakteristike tranzistorskog diferencijalnog pojačavača

- Ako važi $v_{I1} = v_{I2}$ (konkretne vrednosti se mogu varirati u širokom opsegu), kolo je u ravnoteži: struje kolektora su jednake, nema razlike napona između kolektora.
- U slučaju $v_{I1} - v_{I2} \neq 0$ kolo postaje neuravnoteženo. Zbir struja je i dalje jednak struji strujnog izvora, ali se javlja sve veća razlika (a).
- Javlja se razlika napona na izlazu (b).



34

Analiza diferencijalnog pojačavača sa bipolarnim tranzistorima

- Centralni deo prenosne karakteristike je pogodan za realizaciju pojačavača (linearni, strmi segment).
- Tranzistori se zamene hibridnim- π modelom.
- Izračunamo parametre A_v , $A_{\bar{v}}$, $R_{\bar{v}}$, R_o .
- Dobijemo slične vrednosti kao kod stepena sa zajedničkim kolektorom.

35

Parametri diferencijalnog pojačavača sa tranzistorima

- Obično se definišu dva naponska pojačanja:

- pojačanje razlike:
$$A_{vd} = \frac{v_{O2} - v_{O1}}{v_{I2} - v_{I1}},$$

- pojačanje srednje vrednosti:
$$A_{vc} = \frac{v_{O1} + v_{O2}}{v_{I1} + v_{I2}}.$$

- Redovno važi $A_{vd} \gg 1$, $A_{vc} \ll 1$.
- Odnos gornjih vrednosti je CMRR – common mode rejection ratio – faktor potiskivanja srednje vrednosti:

$$CMRR = \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \text{ vagy } CMRR[dB] = 20 \log_{10} \frac{A_{vd}}{A_{vc}}.$$

- Mogu se koristiti i JFET-ovi i MOSFET-ovi za realizaciju diferencijalnog pojačavača.

36

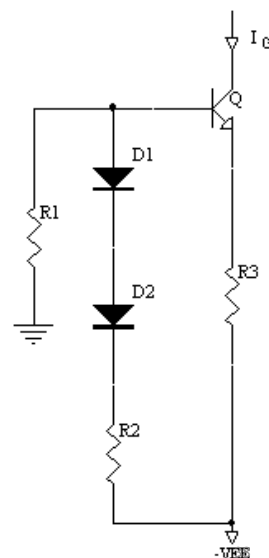
Strujni izvori, aktivna opterećenja, strujna ogledala

- **Polarizacija** tranzistora pomoću **izvora napajanja i otpornika** – primenjuje se u prostim diskretnim kolima.
- **Strujni izvori, aktivna opterećenja, strujna ogledala** – u analognim **integriranim kolima** za polarizaciju se koriste ovi sklopovi – postižu se bolje performanse, lakša realizacija u integriranoj tehnici.

37

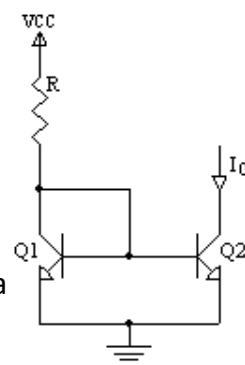
Strujni izvor sa bipolarnim tranzistorom

- Razdelnik R_1, D_1, D_2, R_2 dovodi konstantan napon na bazu.
- Pošto je $V_{BE} \approx \text{const.}$, i struja i napon otpornika R_3 će biti približno konstantni.
- Pošto je $\beta \gg 1$, $I_G = I_C \approx I_E$.
- Diode smanjuju osetljivost na promenu temperature.
- Tranzistor treba da radi u aktivnom režimu. Uslov za aktivni režim je: $V_C > V_B$.
- Strujni izvor suprotnog polariteta se dobija pomoću PNP tranzistora i promenom polariteta napajanja.



Tranzistorsko strujno ogledalo

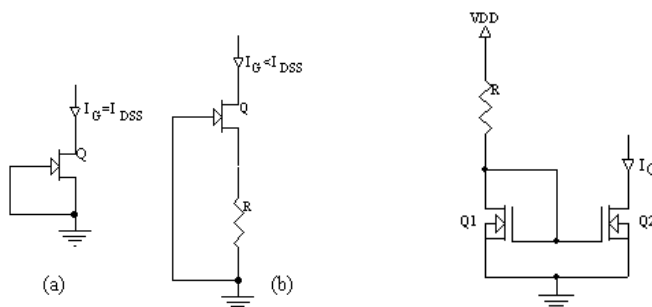
- U integrisanoj tehnici kao strujni izvor obično se koristi strujno ogledalo.
- Struja kolektora Q_1 je konstantna ako su V_{CC} i R konstantne vrednosti.
- Struja kolektora tranzistora Q_2 imaće sličnu vrednost zato što su jednake vrednosti V_{BE} .
- U diskretnoj tehnici ovaj sklop ne bi radio dobro zato što će tranzistori biti na različitim temperaturama.
- Paralelnim vezivanjem dodatnih tranzistora sa Q_2 (vezuju se samo baze i emitori), dobija se strujni izvor sa više izlaza.
- I u ovom slučaju možemo realizovati strujni izvor suprotnog polariteta ako koristimo PNP tranzistore i obrnemo napajanje.



39

Strujni izvori sa JFET-om i MOSFET-om

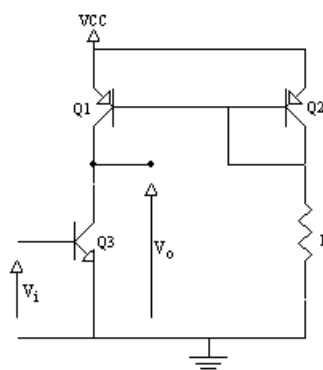
- U oblasti zasićenja struja drain-a JFET-a je približno konstantna. Ako je $V_{GS}=0$, $I_D=I_{DSS}$ (a). Ubacivanjem otpornika na red sa sourc-om, I_D se može podešavati (b).
- Kod strujog ogledala sa MOSFET-om jednakost napona V_{GS} obezbeđuje poklapanje upravljačke i izlazne struje.



40

Stepen sa zajedničkim emitorom opterećen strujnim ogledalom

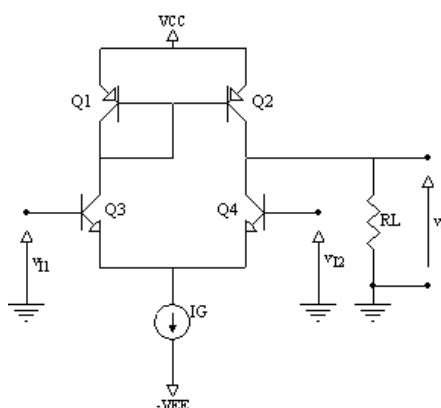
- Stepen sa zajedničkim emitorom opterećen strujnim ogledalom (PNP izvedba).
- Može se postići otpornost opterećenja reda stotine $k\Omega$.
- Može se dobiti naponsko pojačanje za jedan ili dva reda veličine veći nego kod običnog stepena sa zajedničkim emitorom (sa otpornim opterećenjem).



41

Diferencijalni pojačavač opterećen strujnim ogledalom

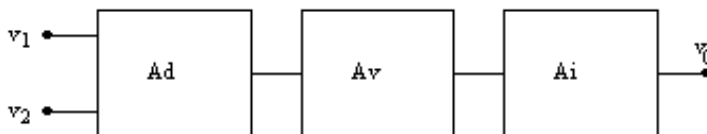
- Ne koriste se posebni izvori za pojedine kolektore
- Kolektor od Q_1 , se vezuje na upravljački priključak strujnog ogledala, a kolektor Q_2 se vezuje na izlaz strujnog ogledala.
- Promena struje I_{C1} se preslikava na izlaz strujnog ogledala i sabere se sa promenom od I_{C2} .
- Na izlazu se javlja dvostruka vrednost promene struje jednog kolektora (dvostruko pojačanje).
- Izlaz nije u diferencijalnoj formi već se dobija na otporniku (R_L) vezanom na masu.



42

Unutrašnja struktura i realni parametri operacionih pojačavača

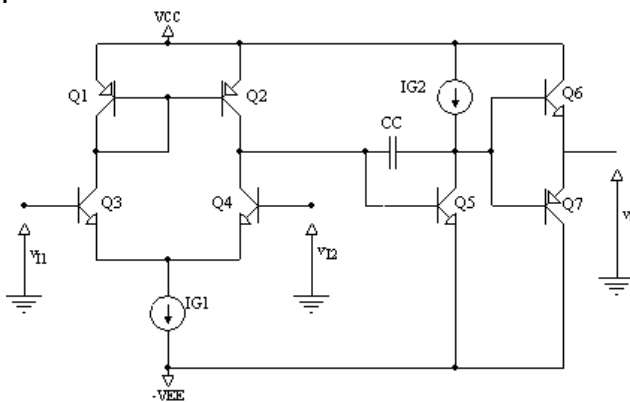
- Može se smatrati da je operacioni pojačavač idealni naponski pojačavač.
- Takvo ponašanje se redovno dobija spajanjem tri pojačavačka stepena:
 - diferencijalni pojačavač na ulazu,
 - naponski pojačavač u srednjem delu,
 - strujni pojačavač (odvojni stepen) na izlazu.



43

Principiska šema operacionog pojačavača

- Uprošćena šema operacionog pojačavača sa bipolarnim tranzistorima je prikazana na slici.
- Mogu se realizovati slična kola JFET-ovima i MOSFET-ovima.
- Ima i hibridnih rešenja.



44

Tipični parametri operacionog pojačavača

- Naponsko pojačanje: $\sim 10^5 \dots 10^6$. Manji deo potiče od ulaznog diferencijalnog pojačavača, veći deo od naponskog pojačavačkog stepena.
- Ulazna otpornost: $\sim G\Omega \dots T\Omega$. To je daleko veće od ulazne otpornosti jednog običnog diferencijalnog stepena. Te vrednosti se postižu posebnim tehnikama (mali I_{G1} , tranzistori sa velikim pojačanjem, kompenzacija baznih struja, primena JFET-a ili MOSFET-a).
- Malu izlaznu otpornost obezbeđuje stepen sa zajedničkim kolektorom.

45

Napajanje operacionog pojačavača

- Većina operacionih pojačavača je predviđena za dvostruko napajanje, na pr. $\pm 15V$. Nema napojne nožice za priključivanje mase od napajanja.
- Mogući odnosno dozvoljeni opseg promene ulaznih i izlaznih napona je obično uži za 1-2V od opsega napona napajanja.
- Promena izlaznog napona u celokupnom opsegu napajanja je rešiv samo kod CMOS izvedbi (pojačavači sa zajedničkim source-om).
- Postoje kola projektovana za jednostruko napajanje (samo masa i V_{CC}).
- Kod tih kola redovno se reši da ulazni naponski opseg doseže bar do jednog kraja opsega napona napajanja ili čak malo preko toga.
- Ova osobina olakšava projektovanje raznih pojačavača greški (česta primena operacionih pojačavača).

46

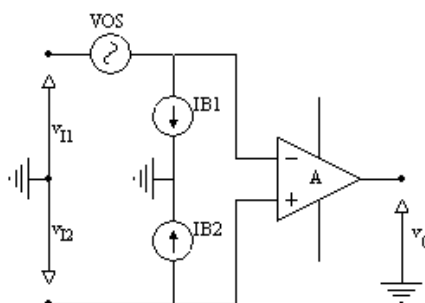
Ulazni naponski ofset operacionog pojačavača

- Prenosna karakteristika $V_I=f(V_O)$ ne prolazi tačno kroz koordinatni početak.
- Pored ulaznog signala verovatno će biti potrebno dovesti i mali jednosmerni signal, da bi izlazni signal bio na nuli kada je ulazni signal na nuli. Taj mali signal je ulazni ofset (V_{OS}).
- Uobičajene vrednosti ulaznog naponskog ofseta su: 1-2mV.
- Postoje precizioni operacioni pojačavači koji imaju naponski ofset reda $10 \mu\text{V}$.
- Ako se ništa ne preduzme, javiće se odstupanje na izlazu. Redovno je to pomeranje izlaza veće od ulaznog ofseta.

47

Model za kompenzaciju ofseta operacionog pojačavača

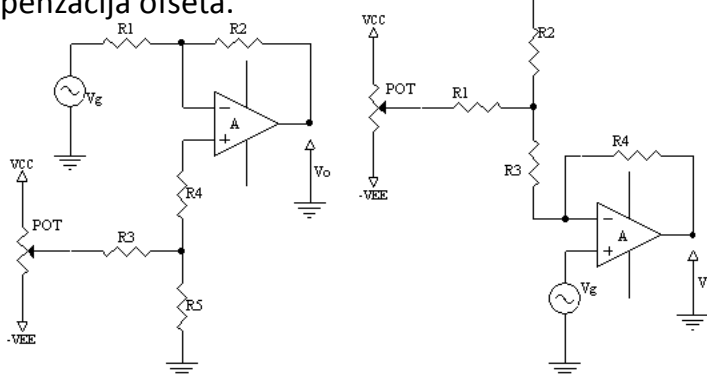
- Ako operacioni pojačavač ima posebne izvode za kompenzaciju ofseta, potrebno je povezati te izvode na onaj način kako nalaže proizvođač.
- Često se istim kolom kompenzuje ulazni ofset i uticaj ulaznih struja.



48

Način kompenzacije ofseta operacionog pojačavača

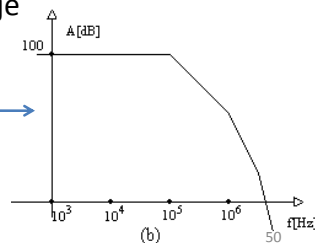
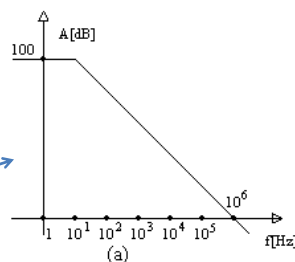
- Odgovarajućim razdelnikom formiramo mali jednosmerni napon. Postoji mogućnost podešavanja potenciometrom.
- U većini primena operacionih pojačavača ne vrši se kompenzacija ofseta.



49

Zavisnost pojačanja od frekvencije kod operacionog pojačavača

- Navedeno veliko pojačanje važi samo na niskim frekvencijama.
- Pri porastu frekvencije pojačanje opada (obično se dobija nagib od -20dB/dec).
- Razlozi: parazitne kapacitivnosti tranzistora.
- Postoje dve kategorije operacionih pojačavača:
 - operacioni pojačavač sa unutrašnjom (fabričkom) kompenzacijom – primenjuje se kapacitivna povratna sprega na naponski pojačavački stepen,
 - nekompensovani pojačavač.
- Operacioni pojačavači sa fabričkom frekvencijskom kompenzacijom su daleko popularnija: lakša primena, ne javlja se zaoscilovanje sve dok je $\beta < 1$.



Slew rate kod operacionog pojačavača

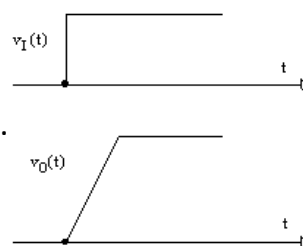
- Usled frekvencijske kompenzacije naponski pojačavački stepen se ponaša kao integrator.

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{I_I}{C_C},$$

gde je:

- I_I – ulazna struja naponskog pojačavača.
- C_C – kapacitivnost kompenzacionog kondenzatora.
- Pošto je $|I_I| \leq |I_G|$, maksimalna brzina promene izlaznog signala je:

$$\left(\frac{dv_o}{dt}\right)_{\max} = \frac{I_G}{C_C}.$$



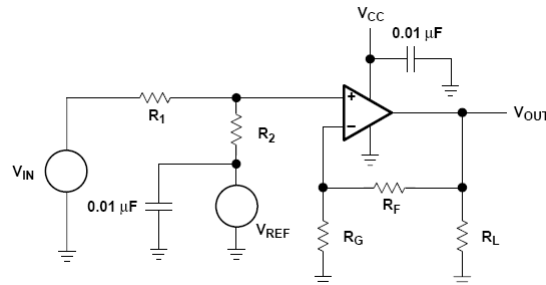
51

Realizacija željene DC prenosne karakteristike sa operacionim pojačavačem

- Invertujući pojačavači ($m < 0$)
- Neinvertujući pojačavači ($m > 0$)
- Pojačavači sa pozitivnim ofsetom ($b > 0$)
- Pojačavači sa negativnim ofsetom ($b < 0$)

Način dimenzionisanja dat na sledećim slajdovima.

Case 1: $V_{OUT} = +mV_{IN} + b$



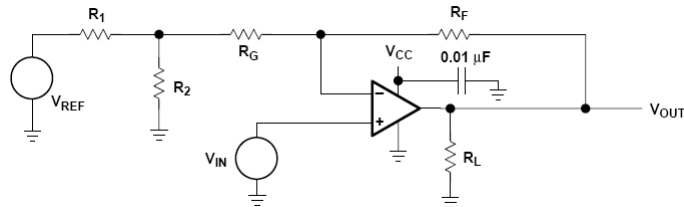
$$V_{OUT} = V_{IN} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_F + R_G}{R_G} \right) + V_{REF} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_F + R_G}{R_G} \right)$$

$$m = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_F + R_G}{R_G} \right)$$

$$b = V_{REF} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_F + R_G}{R_G} \right)$$

53

Case 2: $V_{OUT} = +mV_{IN} - b$



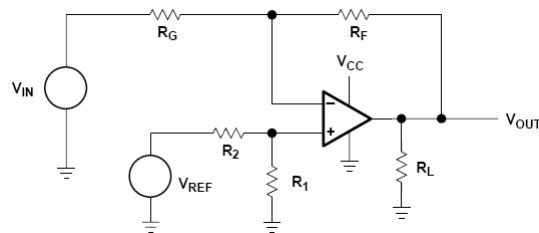
$$V_{OUT} = V_{IN} \left(\frac{R_F + R_G + R_1 \parallel R_2}{R_G + R_1 \parallel R_2} \right) - V_{REF} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_F}{R_G + R_1 \parallel R_2} \right)$$

$$m = \frac{R_F + R_G + R_1 \parallel R_2}{R_G + R_1 \parallel R_2}$$

$$|b| = V_{REF} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_F}{R_G + R_1 \parallel R_2} \right)$$

54

Case 3: $V_{OUT} = -mV_{IN} + b$



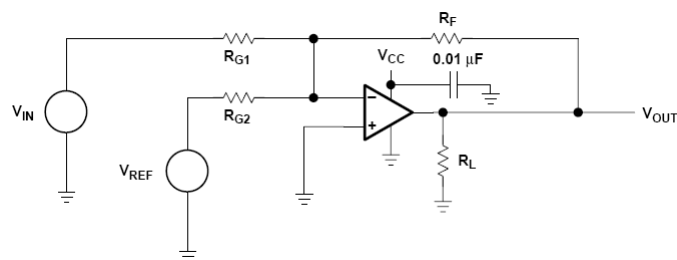
$$V_{OUT} = -V_{IN} \left(\frac{R_F}{R_G} \right) + V_{REF} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_F + R_G}{R_G} \right)$$

$$|m| = \frac{R_F}{R_G}$$

$$b = V_{REF} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_F + R_G}{R_G} \right)$$

55

Case 4: $V_{OUT} = -mV_{IN} - b$



$$V_{OUT} = -V_{IN} \frac{R_F}{R_{G1}} - V_{REF} \frac{R_F}{R_{G2}}$$

$$|m| = \frac{R_F}{R_{G1}}$$

$$|b| = V_{REF} \frac{R_F}{R_{G2}}$$

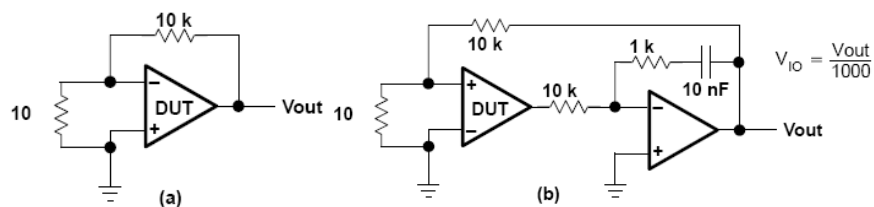
56

Kola za merenje karakteristika operacionih pojačavača

Merenje:

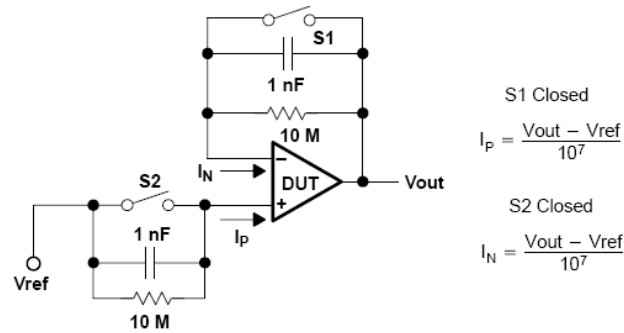
- ulaznog naponskog ofseta
- ulazne struje polarizacije
- naponsko pojačanje bez povratne sprege

Test Circuits for Input Offset Voltage



58

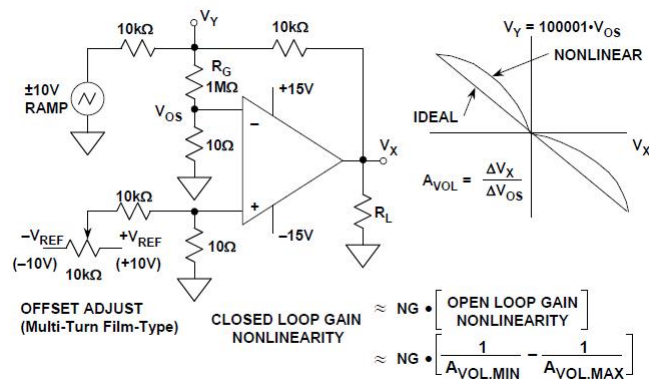
Test Circuit – I_{IB}



59

Merenje naponskog pojačanja bez povratne sprege

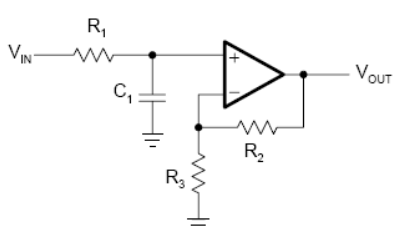
- Invertujući pojačavač
- Signal povratne sprege je razdвоен sa 10 Ω/1M Ω
- Kompenzovan ulazni naponski ofset.



Aktivni filtri

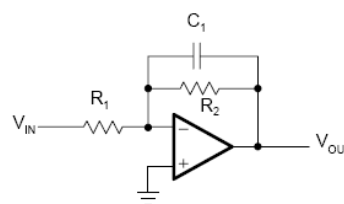
- Propusnik niskih učestanosti
- Propusnik visokih učestanosti
- Propusnik opsega učestanosti
- Filtri prvog reda
- Filtri drugog reda
- Realizacija filtara višeg reda

First-Order Low-Pass Filter



First-Order Noninverting Low-Pass Filter

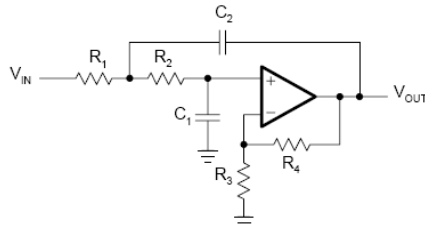
$$A(s) = \frac{1 + \frac{R_2}{R_3}}{1 + \omega_c R_1 C_1 s}$$



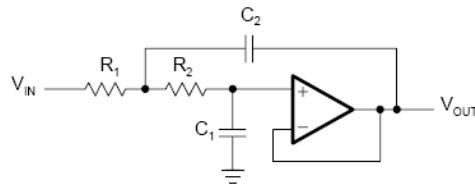
First-Order Inverting Low-Pass Filter

$$A(s) = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{1 + \omega_c R_2 C_1 s}$$

Second-Order Low-Pass Filter



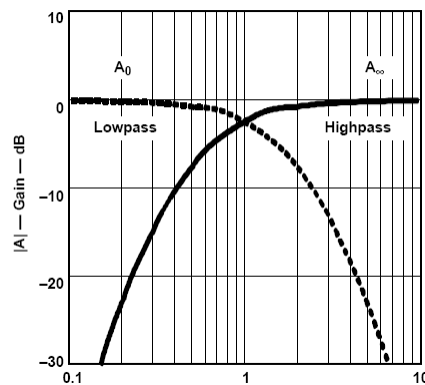
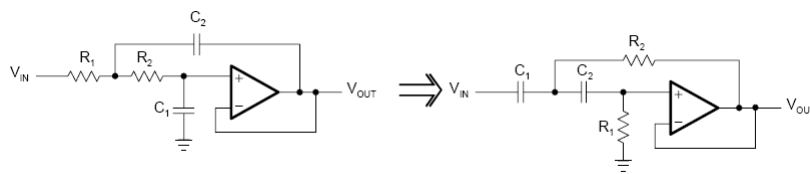
$$A(s) = \frac{A_0}{1 + \omega_c [C_1(R_1 + R_2) + (1 - A_0)R_1C_2]s + \omega_c^2 R_1R_2C_1C_2s^2}$$



$$A(s) = \frac{1}{1 + \omega_c C_1(R_1 + R_2)s + \omega_c^2 R_1R_2C_1C_2s^2}$$

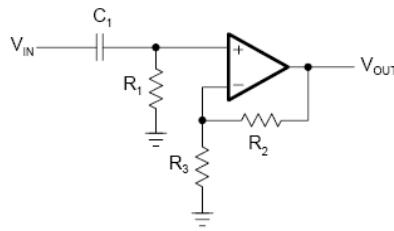
63

High-Pass Filter Design

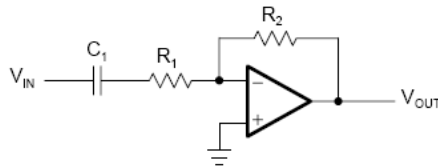


64

First-Order High-Pass Filter



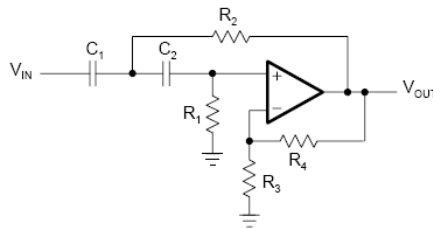
First-Order Noninverting High-Pass Filter



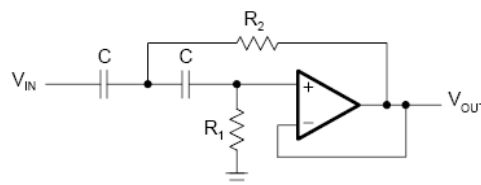
First-Order Inverting High-Pass Filter

65

Second-Order High-Pass Filter



$$A(s) = \frac{\alpha}{1 + \frac{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2(1 - \alpha)}{\omega_c R_1 R_2 C_1 C_2} \cdot \frac{1}{s} + \frac{1}{\omega_c^2 R_1 R_2 C_1 C_2} \cdot \frac{1}{s^2}} \quad \text{with} \quad \alpha = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

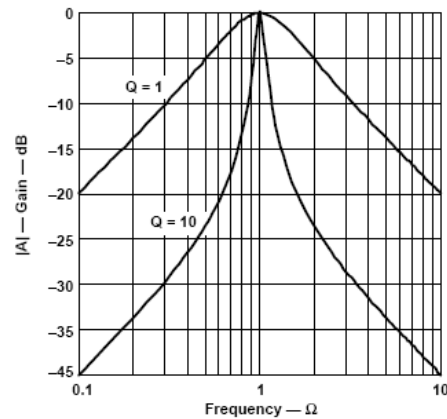


$$A(s) = \frac{1}{1 + \frac{2}{\omega_c R_1 C} \cdot \frac{1}{s} + \frac{1}{\omega_c^2 R_1 R_2 C^2} \cdot \frac{1}{s^2}}$$

66

Second-Order Band-Pass Filter

$$A(s) = \frac{\frac{A_m}{Q} \cdot s}{1 + \frac{1}{Q} \cdot s + s^2}$$



Gain Response of a Second-Order Band-Pass Filter

Sallen-Key Band-Pass

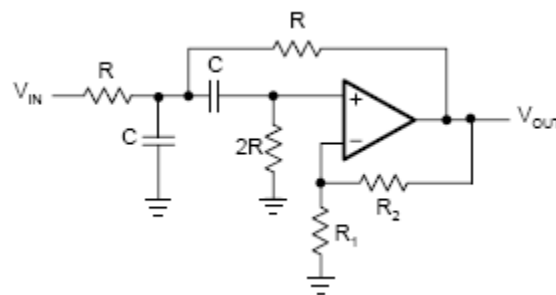
$$A(s) = \frac{G \cdot RC \omega_m \cdot s}{1 + RC \omega_m (3 - G) \cdot s + R^2 C^2 \omega_m^2 \cdot s^2}$$

mid-frequency: $f_m = \frac{1}{2\pi RC}$

inner gain: $G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

gain at f_m : $A_m = \frac{G}{3 - G}$

filter quality: $Q = \frac{1}{3 - G}$



Oscilatori

- Sinusni
- Pravougaoni, trougaoni

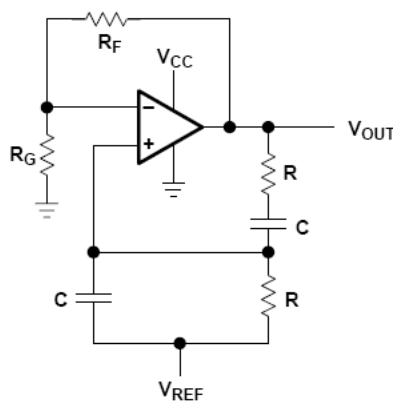
Wien Bridge Oscillator

$$V_+ = V_{\text{TEST}} \left(\frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} \right) = V_{\text{TEST}} \left[\frac{\left(\frac{R_2}{R_2 C_2 s + 1} \right)}{\left(\frac{R_2}{R_2 C_2 s + 1} \right) + \left(R_1 + \frac{1}{C_1 s} \right)} \right]$$

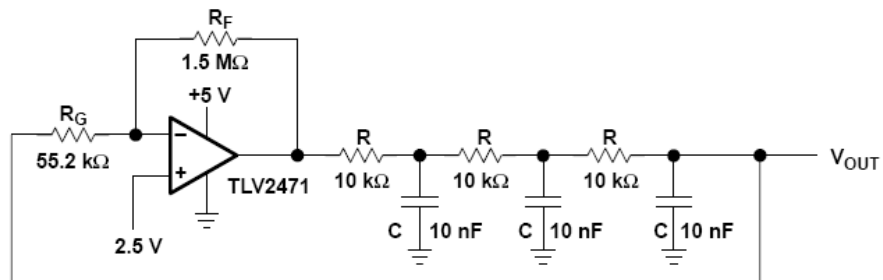
$$\frac{V_+}{V_{\text{TEST}}} = \frac{1}{1 + R_1 C_2 s + \frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{R_2 C_1 s} + \frac{C_2}{C_1}}$$

$$\frac{V_+}{V_{\text{TEST}}} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + j \left(\frac{\omega_0}{\omega_1} - \frac{\omega_2}{\omega_0} \right)}$$

Podesi se $\beta A = 1$ na jednoj određenoj učestanosti.



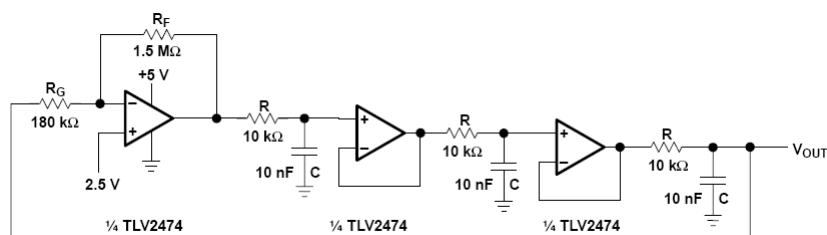
Phase Shift Oscillator, Single Amplifier



Podesi se $\beta A=1$ na jednoj određenoj učestanosti.

71

Phase Shift Oscillator, Buffered



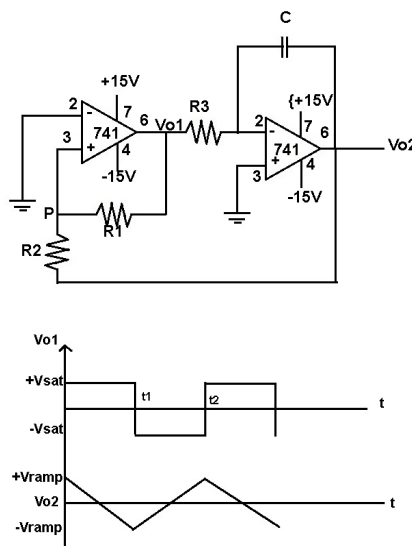
$$A\beta = A \left(\frac{1}{RCs + 1} \right)^3$$

Podesi se $\beta A=1$ na jednoj određenoj učestanosti.

72

Generator pravougaonog i trougaonog signala

- Spoj integratora i komparatora sa histerezisom.
- Amplituda trougla se podešava izborom R1 i R2.
- Frekvencija se podešava izborom R3 i C.



Nelinearna kola

- Cilj je realizacija i korišćenje nelinearne karakteristike komponenti i pojačavača.
- Obradiće se sledeće teme:
 - kola za zaštitu i ograničenje,
 - modulatori i demodulatori,
 - analogni množači,
 - precizni usmerači (ispravljači),
 - nelinearni pojačavači,
 - komparatori.

Zaštita od prekostruja

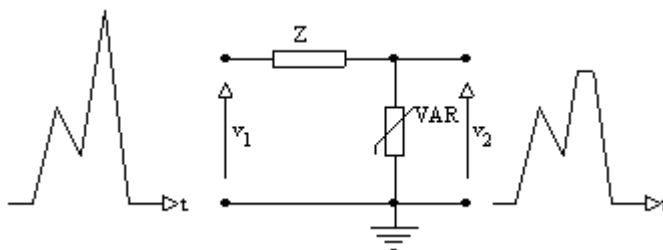
Moguća rešenja:

1. Postavljanje **otpornika** između izvora i potrošača:
 - običan otpornik: stalni značajni gubici, grubo ograničenje,
 - snažni NTC otpornici: veliki gubici pri pokretanju struje, posle zagrevanja gubici se smanjuju,
 - snažni PTC otpornici: do nazivne struje gubici su mali.
2. Primena **regulacionih kola**: složena rešenja, ali se može podesiti precizno ograničenje struje, gubici su uglavnom beznačajni.

75

Zaštita od prenapona

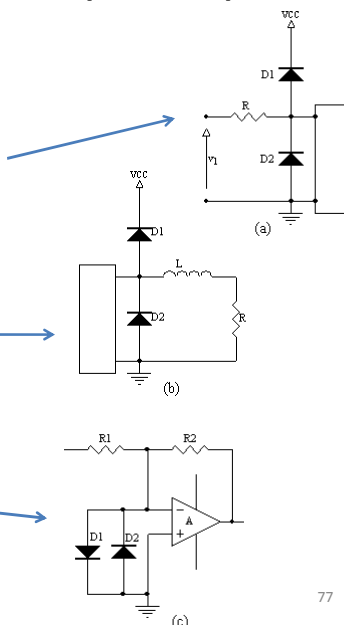
- Mogu se koristiti sledeće komponente: varistori, diode, Zener-ove diode, TVS diode, cevni odvodnici prenapona.
- Metoda: komponenta koja treba da vrši ograničenje se vezuje paralelno potrošaču. Deo napona opadne na rednoj impedansi (Z), kada komponenta koja treba da vrši ograničenje napona provede struju.



76

Diodna kola za zaštitu od prenapona

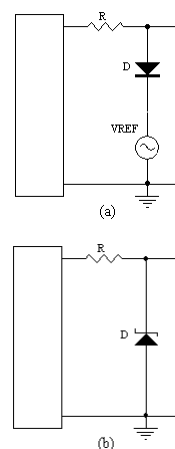
- Ograničenje ulaznog napona za opseg od 0 do VCC.
- Ograničenje izlaznog napona za opseg od 0 do VCC u slučaju induktivnog opterećenja.
- Ograničenje ulaznog napona operacionog pojačavača za opseg od $-V_D$ do $+V_D$.



77

Ograničenje napona diodama

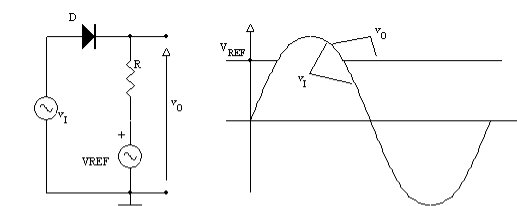
- Izlazni signal ne može da pređe preko vrednosti $V_{REF} + V_D$, pošto poteče struja i višak napona pada na otporniku.
- Umesto diode i izvora napona može da se koristi Zener-ova dioda, ali pri tome će se odseći i deo napona ispod $-V_D$. Ako nema potrebe za tim, treba povezati običnu diodu na red sa Zener-ovom diodom.



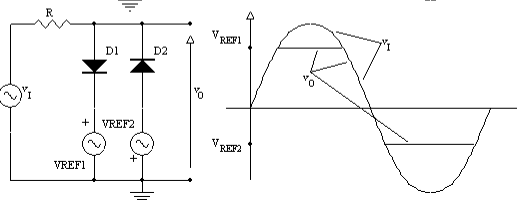
78

Razna kola za odsecanje napona

- Odsecanje dela napona ispod V_{REF} .



- Odsecanje napona i sa gornje i sa donje strane.



79

Modulatori i demodulatori

- Modulacija: pomeranje spektra signala u RF opseg.
- Demodulacija: vraćanje spektra signala u osnovni opseg.
- Modulaciju i demodulaciju vršimo kolima za množenje (mešanje).
- Poznata su tri principa:
 - množači sa nelinearnom prenosnom karakteristikom,
 - prekidački množači,
 - množači na bazi promene parametara.

80

Mešači sa nelinearnom prenosnom karakteristikom – principi

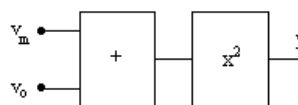
- U slučaju kvadratne karakteristike, ako na ulaz dovedemo zbir modulišućeg signala ($v_m(t)$) i nosećeg signala ($v_o(t)$) dobićemo sledeći izlazni signal:

$$y(t) = v_m^2(t) + 2v_m(t)v_o(t) + v_o^2(t).$$

- Prvi i treći član su nepotrebni ali se filtracijom lako mogu odstraniti.
- Spektar srednjeg člana se poklapa sa spektrom modulišućeg signala, ali je transliran u okolinu frekvencije nosećeg signala.
- Prenosne karakteristike JFET-a i MOSFET-a su približno kvadratne.
- Prenosna karakteristika bipolarnog tranzistora je eksponencijalna ali se može koristiti kvadratna aproksimacija.

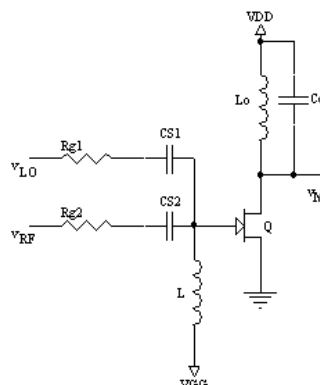
Mešači sa nelinearnom prenosnom karakteristikom – realizacija

- Principsko rešenje:



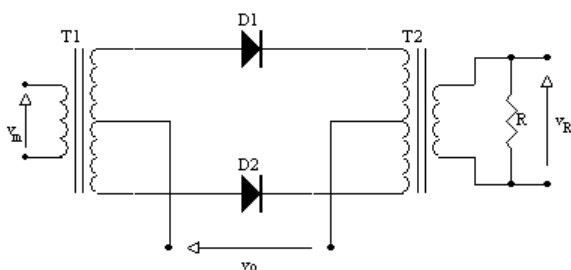
- Stvarna izvedba sa JFET-om:

- ulazni signali se sabiraju preko otpornika,
- filtraciju izlaznog signala vrši rezonantno kolo L_0C_0 .



Prekidački mešači

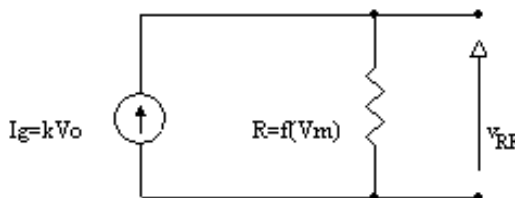
- Signal prekidamo na visokoj frekvenciji – kao da množimo sa pravougaonim signalom – osnovni harmonik pravougaonog signala je sinusoida.
- Simetrično kolo: pravougaoni signal se ne prenosi ni prema ulazu ni prema izlazu, ali otvara/zatvara diode.
- Signal v_m dolazi na izlaz isprekidano.



83

Mešači na bazi promene parametara – principi

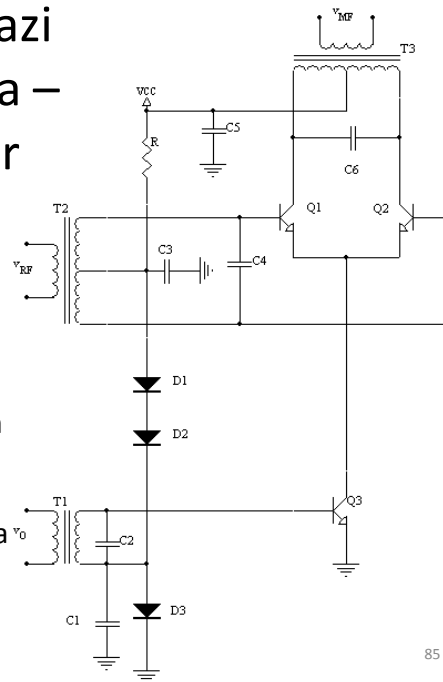
- Jedan od signala (na pr. noseći signal) menja struju strujnog izvora.
- Drugi signal (na pr. modulišući signal) menja otpornost opterećenja.



84

Primer mešača na bazi promene parametara – balansni modulator

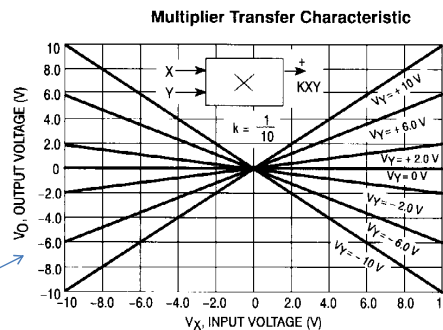
- Signal v_o menja struju strujnog izvora realizovanog tranzistorom Q3.
- Pojačanje diferencijalnog stepena realizovanog tranzistorima Q1 i Q2 je linearna funkcija struje strujnog izvora.
- Signal v_{RF} će se manje ili više pojačavati u zavisnosti od signala v_o .
- Na izlazu dobijemo proizvod dva signala (v_{MF}).



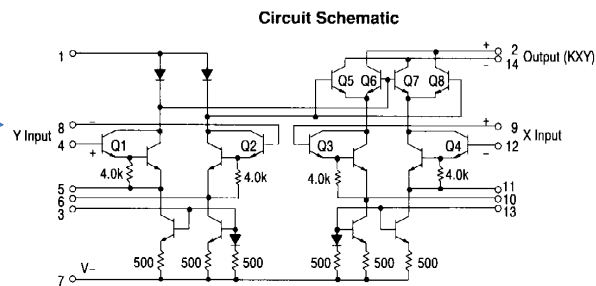
85

Analogni linearni množači

- Na bazi diferencijalnog pojačavača.
- Primer: MC1495.
- Karakteristike:

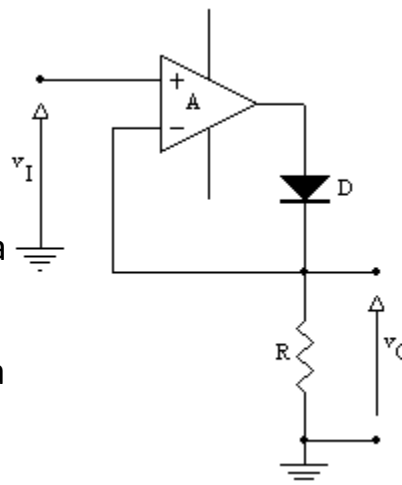


- Unutrašnja struktura:



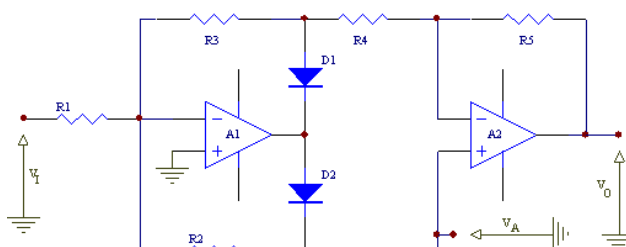
Precizni usmerači – polutalasna verzija

- Kod dosad razmatranih usmerača javlja se veliko odstupanje izlaza od ulaza pri malim vrednostima ulaznog napona.
- Zahvaljujući negativnoj povratnoj sprezi, izlazni signal se u pozitivnoj poluperiodi tačno poklapa sa ulaznim signalom.
- U negativnoj poluperiodi izlaz operacionog pojačavača prelazi u negativno zasićenje – ne dolazi napon na izlaz.



Precizni usmerači – punotalasna verzija

- U slučaju pozitivnog ulaznog napona izlaz se dva puta invertuje: $v_O = v_I \left(-\frac{R_3}{R_1} \right) \left(-\frac{R_5}{R_4} \right)$
- Ako su svi otpornici isti, biće: $v_O = v_I$.
- Za slučaj negativnog ulaznog napona:
$$-\frac{v_I}{R_1} = \frac{v_A}{R_2} + \frac{v_A}{R_3 + R_4}, \quad v_O = v_A \left(1 + \frac{R_5}{R_3 + R_4} \right)$$
- Ako su svi otpornici isti, biće : $v_O = -v_I$.



88

Nelinearni pojačavači – principi

- Za prosto povećanje signala koriste se linearni pojačavači.
- Za specijalne obrade signala potrebne su određene nelinearnosti.
- Najčešće primenjeni nelinearni pojačavači ostvaruju logaritamsku ili eksponencijalnu funkciju.
- Korišćenjem tih kola može se izvršiti množenje signala, dizanje na neki stepen, vađenje korena...

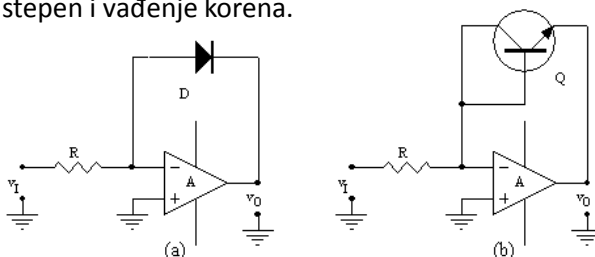
89

Logaritamski pojačavač

- Zavisnost između ulaza i izlaza je sledeći:

$$v_O = -V_T \ln \frac{v_I}{RI_S}$$

- Takvo ponašanje se dobije zahvaljujući strujno-naponskoj karakteristici tranzistora odnosno diode.
- Ponašanje tranzistora je bolje.
- Zamenom mesta diode i otpornika dobija se eksponencijalna prenosna karakteristika.
- Kombinacijom te dva nelinearna pojačavača sa sabiračima, oduzimačima i linearnim pojačavačima, može se vršiti množenje, deljenje dizanje na neki stepen i vađenje korena.



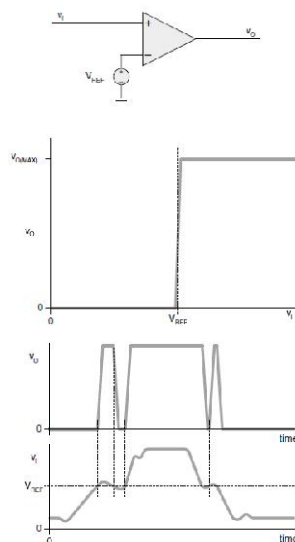
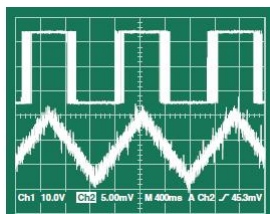
90

Komparatori

- Komparatori **upoređuju dva analogna napona** i formiraju izlazni logički nivo (digitalni izlaz).
- Postoje specijalne integrisane komponente za tu namenu.
- Po potrebi se i operacioni pojačavači mogu koristiti za tu namenu, samo im je brzina znatno manja i logički nivoi su manje precizni.
- Prenosna karakteristika može biti bez histerezisa (prost komparator) ili sa histerezisom (Schmitt-ovo kolo).

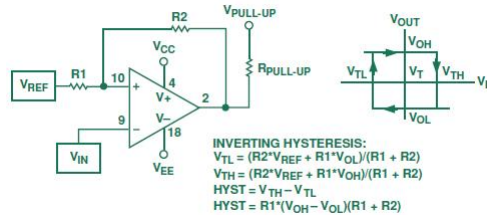
Komparator bez histerezisa

- Komparator se može shvatiti kao pojačavač sa dva ulaza (diferencijalni ulaz) i sa velikim pojačanjem.
- Namesti se referentni napon (prag) oko kojeg treba menja logički nivo.
- Šumovit ulazni signal prouzrokuje višestruku promenu logičkog nivoa (oscilacije) na izlazu kada je ulazni signal oko praga (referentni napon).

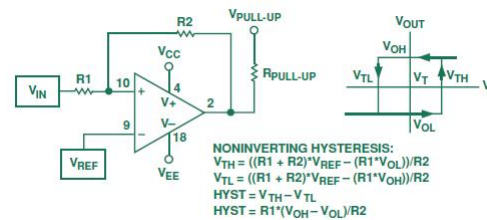


Komparatori sa histerezisom – dvostruko napajanje

- Invertujuća karakteristika.

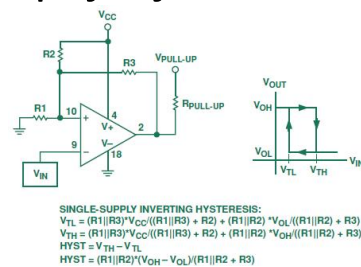


- Neinvertujuća karakteristika

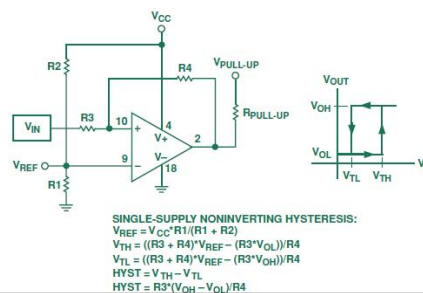


Komparatori sa histerezisom – jednostruko napajanje

- Invertujuća karakteristika.



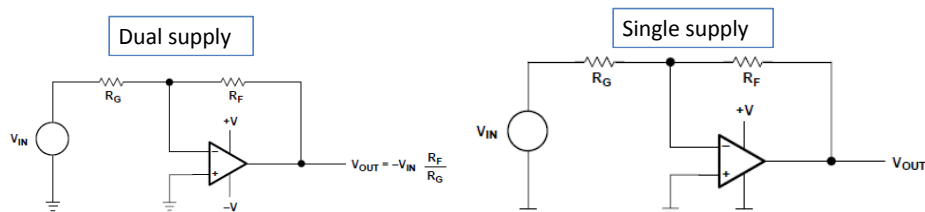
- Neinvertujuća karakteristika.



Fizičke osobine analognih integrisanih kola

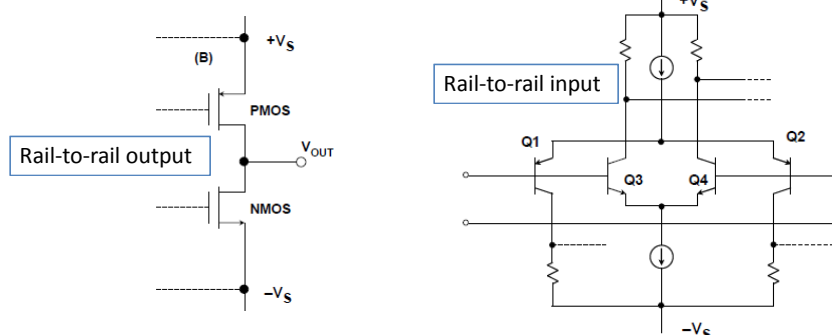
Naponi napajanja

- Može se primeniti jednostruko, dvostruko itd. napajanje (broj nezavisnih izvora za napajanje).
- Kod većine kola ukupan napon napajanja ne prelazi 35V (preko toga dolazi do proboja).
- Osetljivost na varijacije napona napajanja (power supply rejection ratio – PSSR) je važan parametar. To određuje u kojoj meri se talasnost napona napajanja prenosi na izlaz.



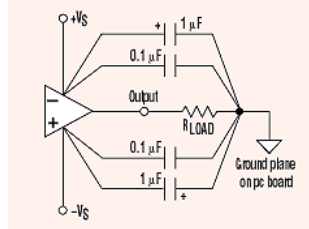
Ulazni/izlazni naponski opseg

- Ulazni naponski opseg (u kom opsegu kolo radi ispravno) – obično uži od napona napajanja.
- Izlazni naponski opseg (koje napone može da generiše kolo na izlazu) – obično uži od napona napajanja.
- Sve više se primenjuju rail-to-rail pojačavači koji iskorišćavaju ceo opseg napajanja (na ulazu i/ili na izlazu).



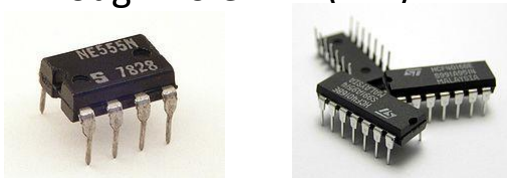
Potrošnja

- **Bez** potrošača – redovno se ta vrednost zadaje u kataloškim podacima.
- **Sa** potrošačem – treba povećati struju potrošnje za struju koja teče prema potrošaču.
- **Filtracija** napona napajanja – redovno se primenjuje kapacitivni filter što bliže napojnim nožicama integrisanog kola, inače može doći do interferencije među raznim kolima. Ujedno se smanjuje preslušavanje talasnosti iz izvora napajanja na izlaz.
- Poželjno je staviti **dve vrste kondenzatora**: elektrolitski kondenzator daje dobru filtraciju na niskim frekvencijama, a keramički na visokim frekvencijama.

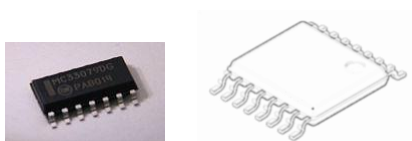


Kućišta

- Through hole: DIL (DIP)



- SMD: SO, TSSOP (sve popularniji zbog veće gustine pakovanja)



Kraj 1. glave

(KOLA ANALOGNE
ELEKTRONIKE)