

KOMPARATORI

Komparatori

- **Naponski komparator** je kolo koje poredi amplitude dva napona. Izlazni napon može da ima jednu od dve diskretne vrednosti zavisno od toga koji je od dva ulaza na višem potencijalu.

Komparator ima dva ulaza, invertujuć i neinvertujuć. Analogni signali na oba ulaza mogu sadržati i jednosmernu i naizmjeničnu komponentu. U najvećem broju primena jedan analogni signal se poredi sa referentnim naponom.

Ukoliko je ulazni signal priključen na neinvertujuć ulaz komparatora a izvor referentnog napona na invertujuć dobija se **neinvertujuća konfiguracija**, koja na izlazu daje logičku jedinicu uvek kada je ulazni signal veći od referentnog. U suprotnom, ukoliko je izvor referentnog napona priključen na neinvertujuć ulaz dobija se **invertujuća konfiguracija**.

Komparatori

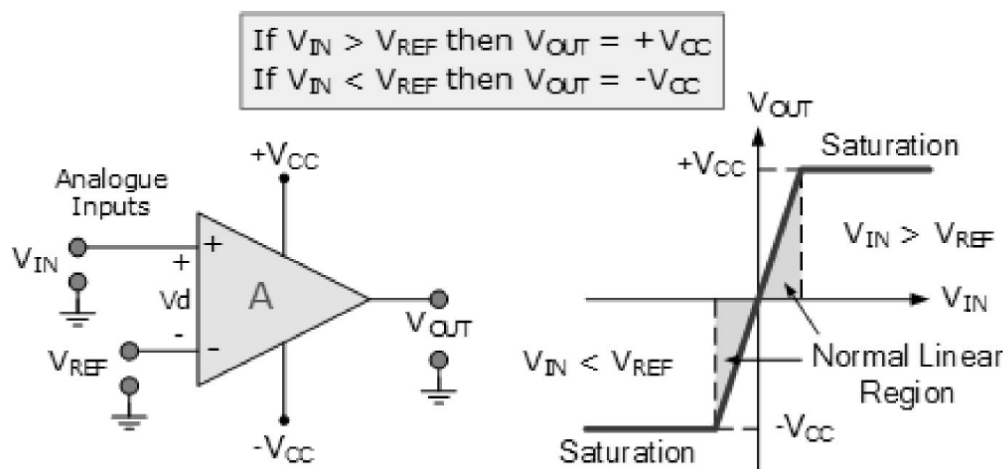
Primene komparatora

Najznačajnija primena komparatora je **konvertovanje analognog signala u digitalni** odnosno povezivanje analognih kola sa digitalnim kolima. Ukoliko je vrednost signala na neinvertujućem ulazu veća od vrednosti na invertujućem ulazu na izlazu se generiše logička jedinica a ukoliko je obrnuto generiše se logička nula. Amplitudski nivo logičke jedinice je blizu vrednosti pozitivnog napajanja kola. Amplitudski nivo logičke nule blizu nultom potencijalu ukoliko komparator ima jednostruko napajanje odnosno blizu negativnom napajanju ukoliko postoji dvostruko napajanje.

Druga značajna primena komparatora je **zaštita uređaja od prevelikih struja**. Prednost komparatora u odnosu na druge tehnike koje se koriste za ovu namenu ogleda se pre svega u velikoj brzini. Najbitnija karakteristika kola za strujnu zaštitu je brzina odziva jer kratkotrajno prisustvo prevelike struje može da ošteti uređaj. Pored velike brzine komparatore odlikuje niska cena, jednostavnost i kompaktnost. Za strujnu zaštitu se primenjuju kola komparatora sa otvorenim kolektorom (drejnom) koja imaju malu vrednost naponskog ofseta i širok opseg promene srednje vrednosti ulaznog napona.

Operacioni pojačavač kao komparator

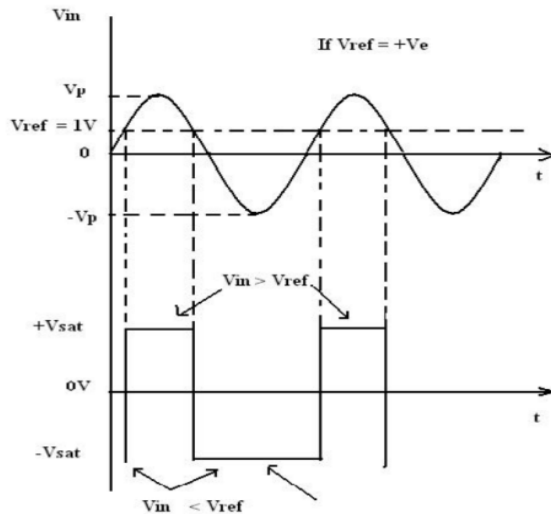
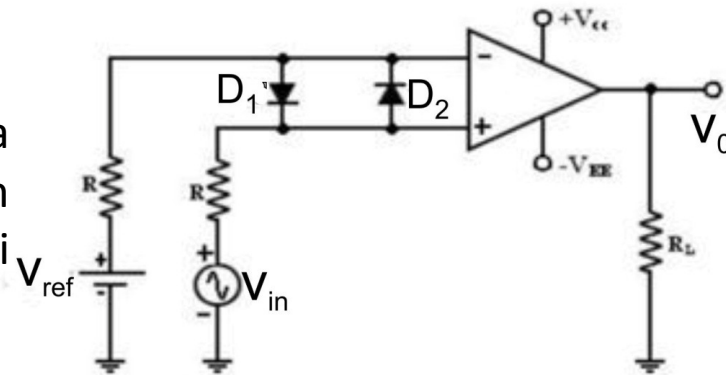
- **Komparator realizovan primenom operacionog pojačavača** može da radi u otvorenoj petlji (bez povratne sprege) ili koristi pozitivnu povratnu spregu. U oba kola izlazni napon odgovara pozitivnom ili negativnom zasićenju operacionog pojačavača. U Op-amp komparatoru bez povratne sprege ulazni signal se dovodi na jedna od ulaza dok se za drugi ulaz priključuje referentni napon.
- Komparator sa operacionim pojačavačem u otvorenoj petlji funkcioniše korektno ukoliko su promene ulaznog signala dovoljno brze i ukoliko u ulaznom signalu nema suviše šuma. U suprotnom ovo kolo praktično osciluje između dva režima zasićenja. Jedna od načina da se ovaj problem prevaziđe je da se uvede pozitivna povratna sprega.



Operacioni pojačavač kao komparator

Praktična realizacija komparatora

Komparator upoređuje napon signala na jednom ulazu sa naponom na drugom ulazu koji je poznat i naziva se referentni napon.



Diode između ulaza operacionog pojačavača imaju ulogu zaštite operacionog pojačavača, jer ograničavaju maksimalnu vrednost ulaznog napona. Otrponici vezani na red sa V_{ref} i V_{in} imaju ulogu da ograniče maksimalnu struju koja utiče u operacioni pojačavač.

Na slici je prikazano kolo neinvertujućeg komparatora za koji važi:

$$V_{in} > V_{ref} \Rightarrow V_0 = V_{sat}$$

$$V_{in} < V_{ref} \Rightarrow V_0 = -V_{sat}$$

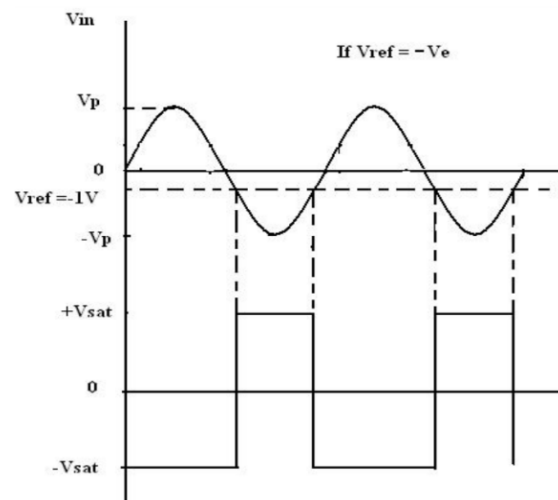
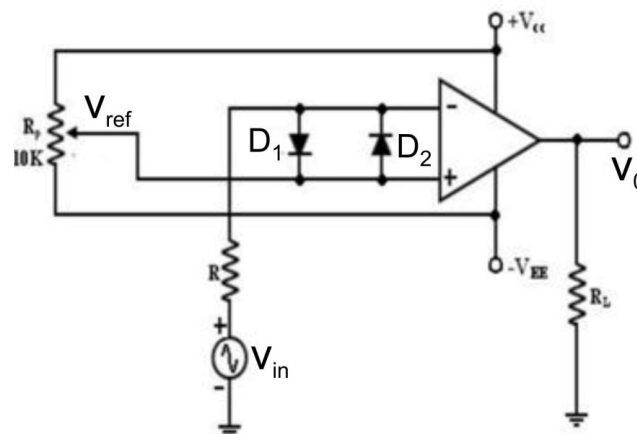
Operacioni pojačavač kao komparator

Invertujući komparator

Ukoliko je referentni napon priključen na neinvertujući ulaz a signal se dovodi na invertujući ulaz dobija se invertujući komparator. Jednačine koje opisuju prenosnu karakteristiku ovog kola su:

$$V_{in} < V_{ref} \Rightarrow V_0 = -V_{sat}$$

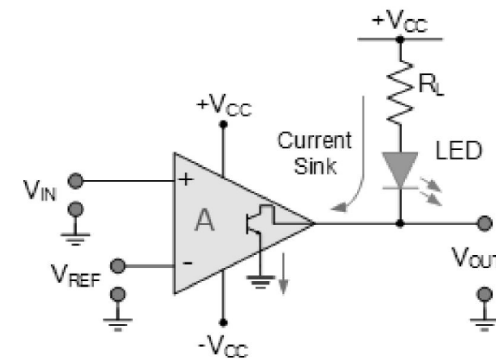
$$V_{in} > V_{ref} \Rightarrow V_0 = +V_{sat}$$



Operacioni pojačavač kao komparator

- Standardni operacioni pojačavači mogu se upotrebiti za realizaciju komparatora. Međutim, oni su optimizovani za rad u linearnom režimu rada i za kola koja sadrže negativnu povratnu spregu. Kada se operacioni pojačavač koristi kao komparator dolaze do izražaja određene neidealnosti kao što su naponski ofset, konačno pojačanje, nelinearnost karakteristike itd.
- **Namenski naponski komparatori** se razlikuju u odnosu na standardne operacione pojačavače po izlaznom stepenu. Izlazni stepen naponskih komparatora sadrži prekidačne tranzistore da bi izlazni napon mogao da se menja što većom brzinom.
- Neka od komercijalnih integrisanih kola naponskih komparatora su : LM311, LM393, LM339.

- Integrisana kola naponskih komparatora najčešće na izlazu imaju tranzistorski prekidač koji konvertuje analogni u digitalni signal. Ovaj prekidač je realizovan u konfiguraciji sa otvorenim kolektorom ili otvorenim drejnom.



Komparatori

Statičke karakteristike komparatora

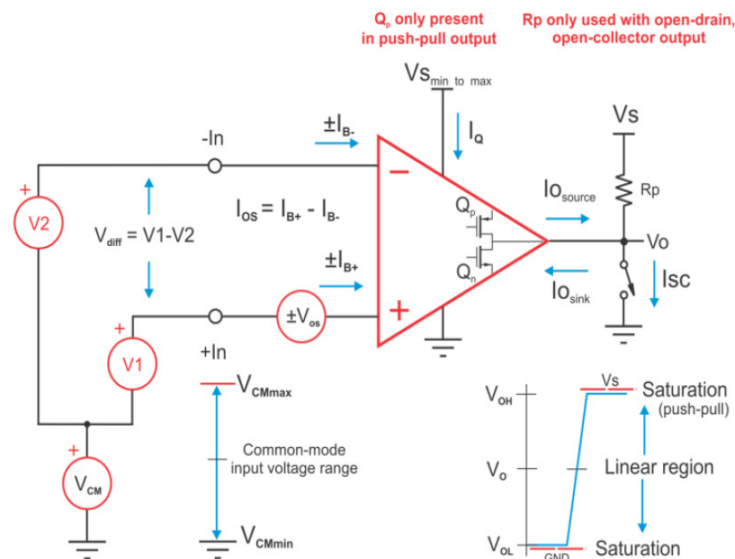
Najznačajniji jednosmerni parametri koji karakterišu komparatore su:

- Ulazni ofset napon, V_{OS}
- Ulazna struja polarizacije (I_{B+} , I_{B-})
- Ulazna ofset struja, I_{OS}
- Opseg promene srednje vrednosti napona (V_{CMmax} , V_{CMmin})

Pored parametara koji se uobičajeno navode za opis operacionih pojačavača postoje i parametri koji su specifični samo za komparatore, kao što su:

- struja kratkog spoja na izlazu, I_{SC}
- vrednost naponskog nivoa logičke jedinice V_{OH}
- vrednost naponskog nivoa logičke nule V_{OL}

Comparator DC Parameters



Commonly specified dc parameters

- Input offset voltage (V_{OS})
- Input bias current (I_B)
- Input offset current (I_{OS})
- Input common-mode voltage range (V_{CM})
- Input differential voltage range (V_{DIFF})
- Voltage output high from rail (V_{OH})
- Voltage output low from rail (V_{OL})
- Output short-circuit current (I_{SC})
- Quiescent current (I_Q)
- Power supply voltage range (V_S)

Less common to comparators

- Open loop gain (A_{OL})
- Voltage offset drift (dV_{OS}/dT)
- Common-mode rejection (CMRR)
- Power supply rejection (PSRR)

Komparatori

Dinamičke karakteristike

-**Vreme odziva t_p** (response time) je vremenski interval koji protekne od pobude Hevisajdovom odskočnom funkcijom do trenutka kada se na izlazu pojavi vrednost napona jednaka polovini zbira logičke nule i jedinice $(V_{OH}+V_{OL})/2$.

-Vreme odziva zavisi od amplitude ulaznog napona ukoliko nije dostignuta maksimalna brzina odziva komparatora (slew-rate). U tom slučaju vreme odziva se može odrediti iz frekvencijske karakteristike komparatora. Kada frekvencijska karakteristika ima jedan dominantna pol dobija se:

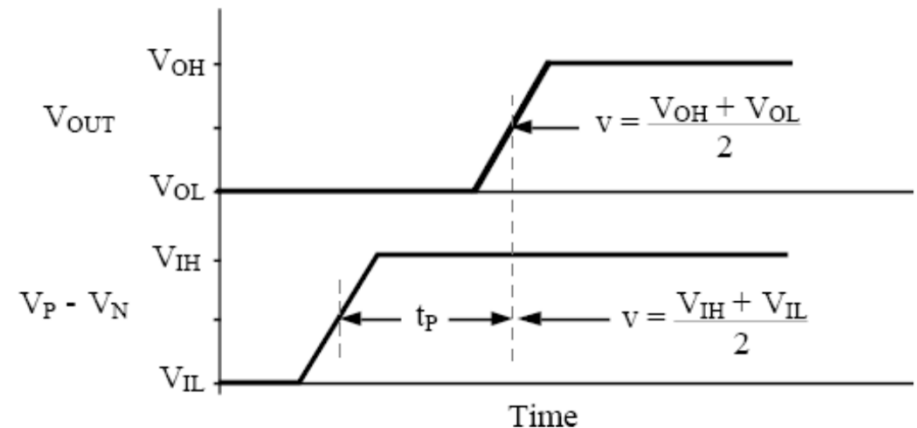
$$A_v(s) = \frac{A_v(0)}{1 + s\tau_c}$$

$$\Delta v_{OUT}(t) = V_{in\ min} A_v(0) (1 - e^{-t/\tau_c})$$

Ukoliko brzina promene signala na ulazu premaši slew-rate konvertora brzina odziva neće se više menjati sa daljim porastom amplitude napona na ulazu.

$$SR = \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right)_{max} = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{t_p}$$

$$t_p = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{2 \cdot SR}$$



Komparatori

Prenosne karakteristike komparatora

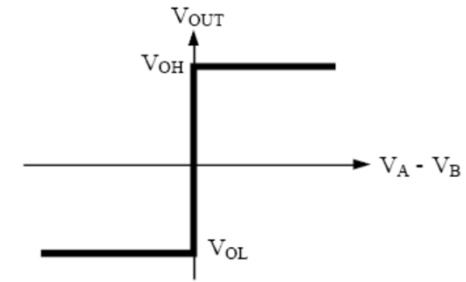
Prenosna karakteristika idealnog komparatora sadrži dva linearna segmenta, logičku jedinicu V_{OH} kada je ulazni diferencijalni napon pozitivan ($V_A - V_B > 0$) i logičku nulu kada je ulazni diferencijalni napon negativan ($V_A - V_B < 0$).

Odziv realnog kola mora da sadrži prelaznu oblast između dva binarna stanja. Za komparator je bitno da ta prelazna oblast bude što uža, odnosno da brzo pređe iz jednog u drugo binarno stanje.

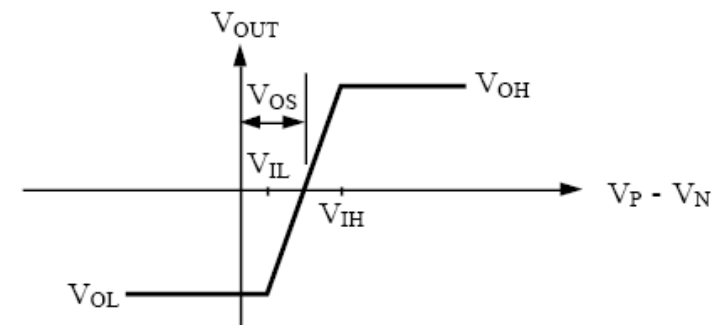
Pored konačnog pojačanja na prenosnu karakteristiku će uticati i ofset napona koji se modelira jednosmerni naponskim generatorom povezanim sa ulazom.

Minimalna vrednost priraštaja ulaznog diferencijalnog napona potrebna da promeni vrednost izlaznog napona iz logičke nule u jedinicu ili obrnuto naziva se **rezolucija komparatora**, V_{inmin} .

$$V_{inmin} = V_{iH} - V_{iL} = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{A_0}$$



$$V_{iH} - V_{iL} = \lim_{A_0 \rightarrow \infty} \frac{V_{OH} - V_{OL}}{A_0} = 0$$



$$A_0 = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{V_{iH} - V_{iL}}$$

Klasifikacija komparatora

Komparatori mogu biti realizovani u MOS ili bipolarnoj tehnologiji.

Dve osnovne kategorije komparatora su

- **Komparatori bez povratne sprege** (open loop comparators)
- **Regenerativni komparatori**

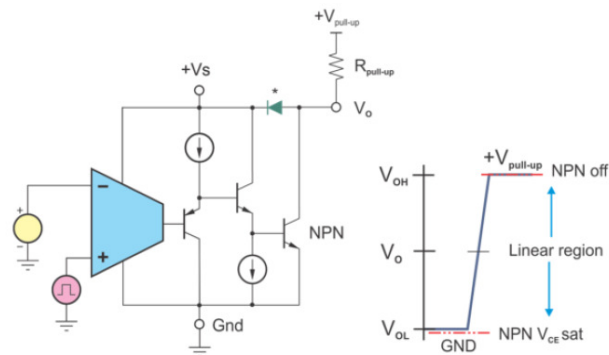
Po strukturi kola komparatori bez povratne sprege se razlikuju od operacionih pojačavača jedino po tome što ne poseduju unutrašnju kompenzaciju. Regenerativni komparatori su kola sa pozitivnom povratnom spregom.

Postoje dva tipa realizacije komparatora bez povratne sprege:

- **sa otovorenim kolektorom** (drejnom)
- **sa komplementarnim push pull izlaznim stepenom.**

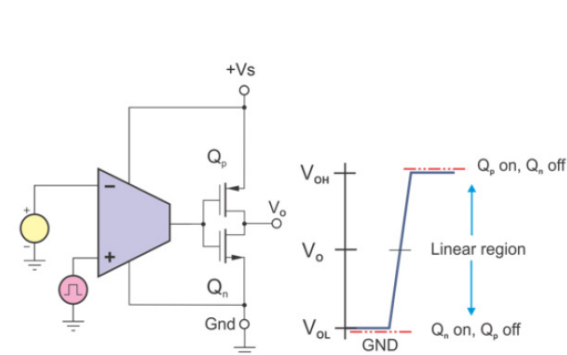
Open-drain/open-collector output (most common)

Useful for wired-or output applications!



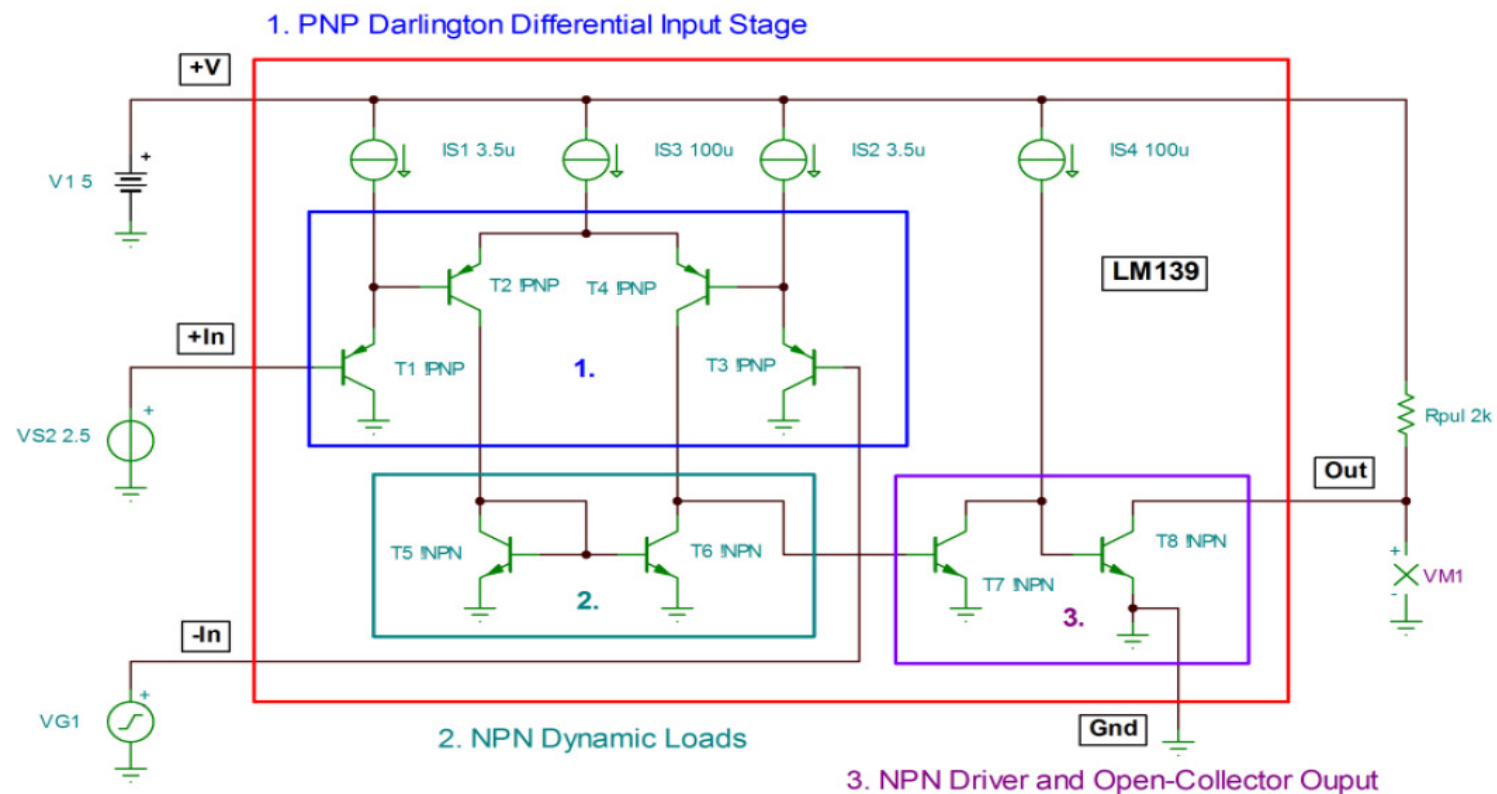
* not present in TLV1701
+Vs and $V_{pull-up}$ may be at any level between +2.2 to +36 V

Push-pull drain-drain/collector-collector output



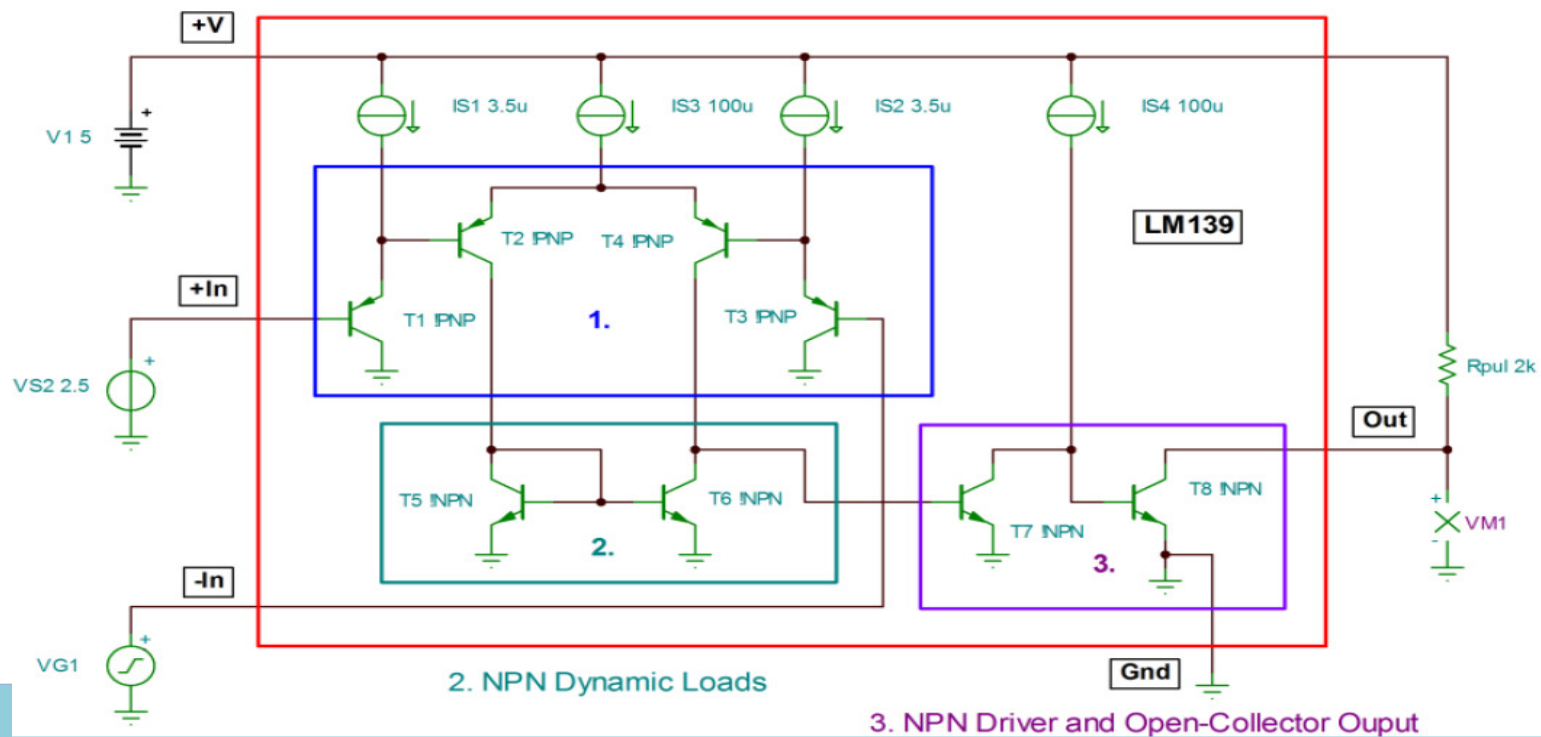
Komparator sa otvorenim kolektorom

Kada je izlazni stepen realizovan otvorenim kolektorom jedan od dva moguća diskretna amplitudna nivoa na izlazu određen je režimom rada tranzistora u izlaznom stepenu. Između kolektora (drejn) ovog tranzistora i napajanja povezan je takozvani podizni otpornik (pull-up resistor). Uloga ove komponente je da spreči da napon na izlazu bude neodređen kada je tranzistor u režimu zakočenja. Ukoliko je tranzistor u zasićenju na izlazu je naponski nivo logičke nule.



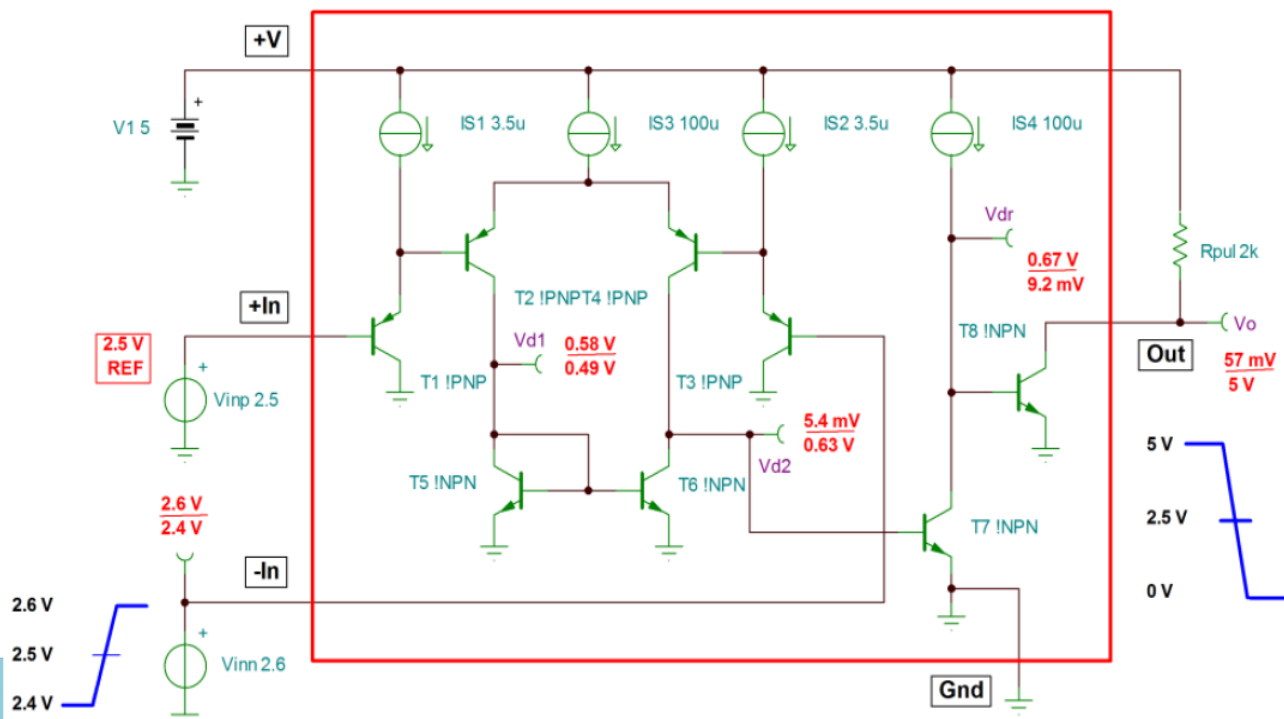
Komparator sa otvorenim kolektorom

Prvi stepen komparatora je diferencijalni pojačavač. Da bi se povećala ulazna impedansa i smanjila struja polarizacije diferencijalni par čine dva Darlingtonovog para pnp tranzistora (T1-T2 i T3-T4). Pomoću refleksnog spoja (strujnog ogledala) koji čine tranzistori T5 i T6, simetrični diferencijalni signal između kolektora diferencijalnog para konvertuje se u asimetričan. Struja koja se dobija na asimetričnom izlazu biće jednaka $I_{B7}=I_{C4}-I_{C2}$, što praktično odgovara struji koja bi tekla na otporniku priključenom između kolektora diferencijalnog para. Signal sa izlaza diferencijalnog pojačavača dovodi se na drajver koga čini tranzistor T7 a nakon toga na izlazni stepen sa otvorenim kolektorom sačinjen od tranzistora T8.



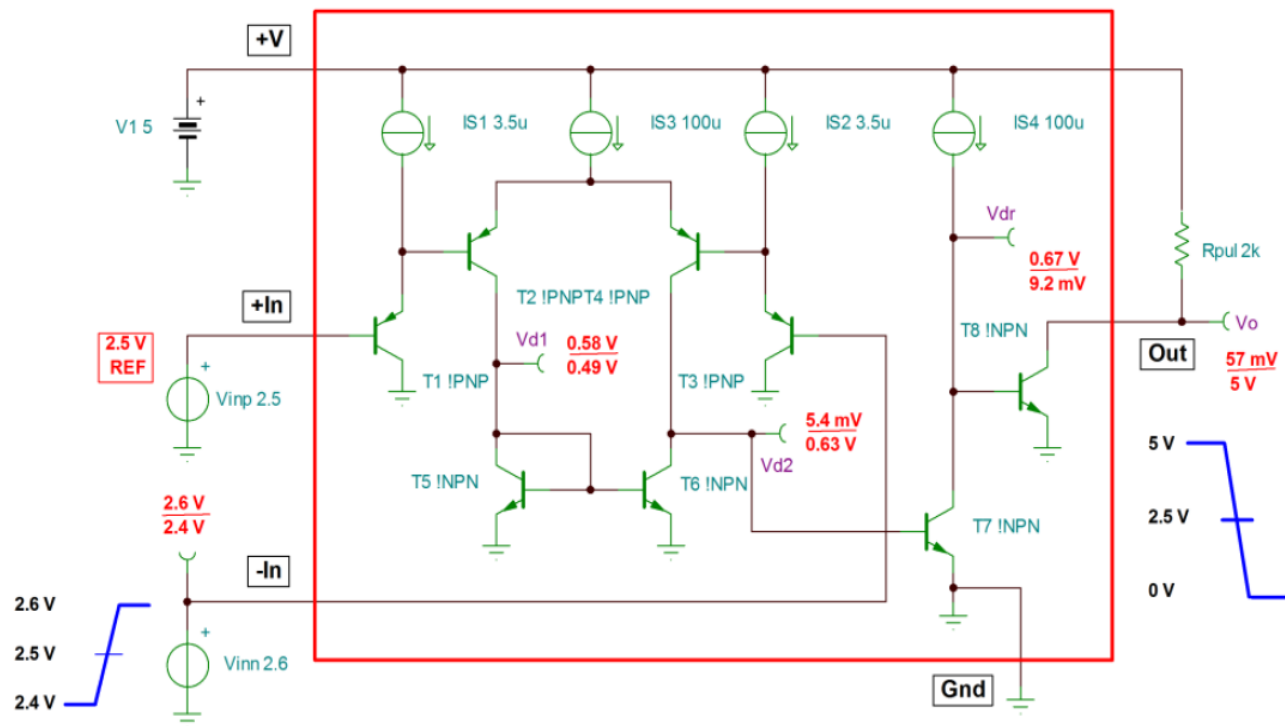
Komparator sa otvorenim kolektorom

Ukoliko je signal na ulazu manji od referentnog levi Darlingtonov par koji čine T1 i T2 preći će u zakočenje i sva struja izvora konstantne struje IS3 će teći kroz desni Darlingtonov par. Kao posledica toga kroz tranzistor T5 i T6 neće teći struja i preći će u režim zakočenja. Struja izvora konstantne struje IS3 preko desnog Darlingtonovog para utiče u tranzistor T7. S obzirom da je u ovom slučaju vrednost struje baze T7 približno jednaka struji kolektora ovaj tranzistor će preći u režim zasićenja. Usled toga kolektor tranzistora T7 biće na veoma niskom potencijalu, koji je ispod praga provođenja tranzistora T8. Pošto je izlazni tranzistor T8 u zakočenju kroz otpornik R_{pul} neće teći struja, što praktično znači da je izlaz na nivou logičke jedinice, V=15 V.



Komparator sa otvorenim kolektorom

Ukoliko je napon na invertujućem ulazu veći od napona na neinvertujućem ulazu veći deo struja izvora konstantne struje IS3 će teći kroz levi Darlingntonov par, a samim tim i kroz tranzistore T5 i T6. U ovom slučaju tranzistor T6 će voditi ali će zbog male vrednosti struje kolektora preći u režim zasićenja. Kao posledica male vrednosti napona na kolektoru T6, napon na emitorskom pn spoju tranzistora T7 će biti ispod praga provođenja i T7 će preći u zakočenje. Sva struja izvora konstantne struje IS4 postaće struja baze tranzistora T8 i usled toga ovaj tranzistor će preći u zasićenje. Najzad, kao posledica zasićenja T8 na izlazu ćemo imati nizak naponski nivo, odnosno logičku nulu.

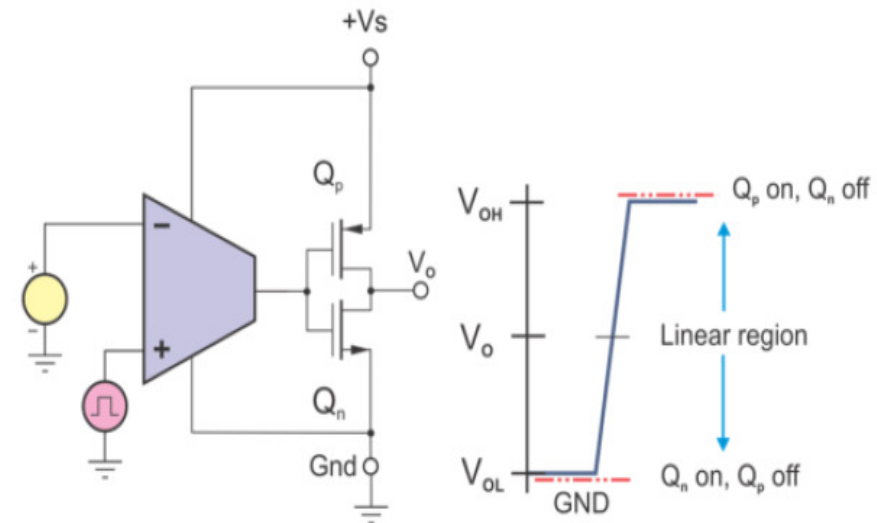


Komparatori

Push-pull komparatori

Primenom push-pull izlaznog stepen obezbeđuje se veća vrednost amplitude izlazne struje a samim tim i veća vrednost slew-rate (maksimalna brzina odziva na izlazu).

U push-pull komparatoru izlazni stepen se sastoji od dva komplementarna tranzistora (N-kanalni i P-kanalni). Tranzistori su povezani na takav način da ne mogu da vode istovremeno. Sors P-kanalnog tranzistora je povezan za pozitivno napajanje a sors N-kanalnog za uzemljenje ili negativno napajanje. Kada vodi P-kanalni FET struja ističe i na izlazu se generiše naponski nivo logičke jedinice. U suprotnom, kada vodi N-kanalni FET struja utiče u komparator što uzrokuje smanjenjem potencijala na izlazu.



Komparatori

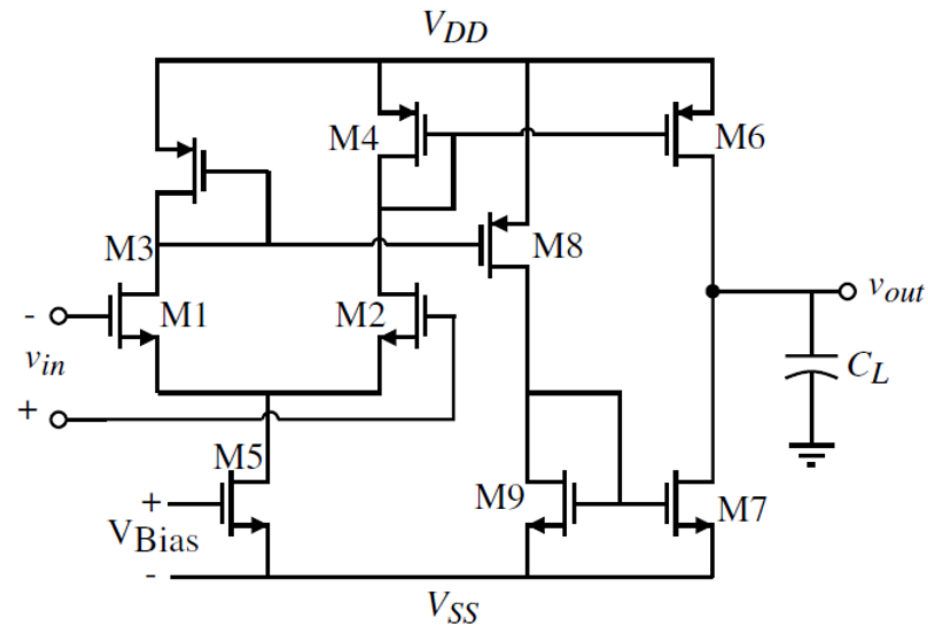
Push-pull komparatori

Kada struja ističe (sourcing) vodi tranzistor M6, a kada utiče (sinking) tranzistor M7.

Tranzistori M2, M4 i M6 su povezani na takav način da je struja kroz M4 jednaka struji M2 i da je struja kroz M6 srazmerna struji M4 (konfiguracija strujnog ogledala).

Struja kroz M3 biće jednaka struji kroz M1, dok će struja M8 biti srazmerna struji M3. Na kraju se preko strujnog ogledala struja M8 prenosi na izlazni tranzistor M7.

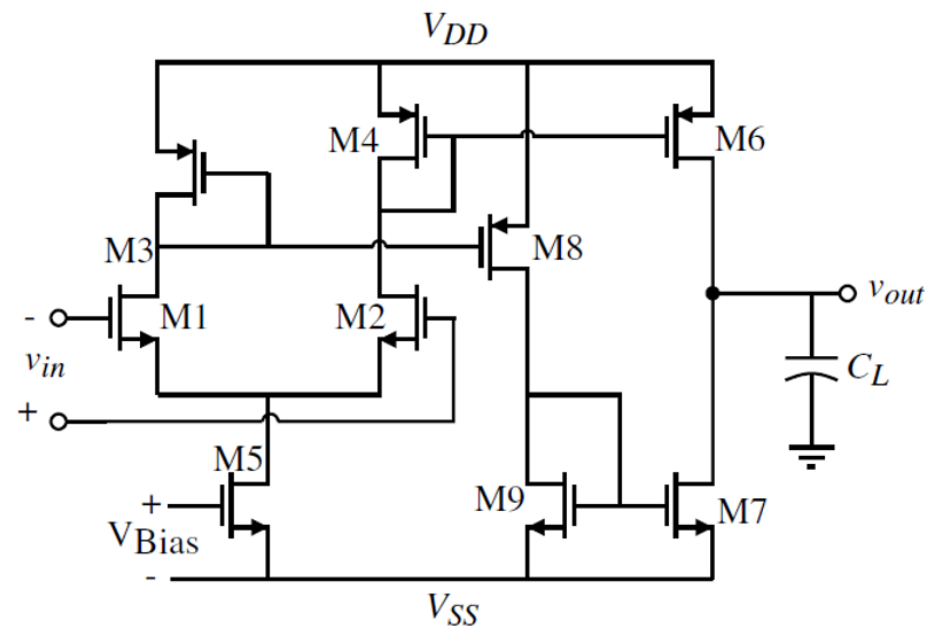
Maksimalna amplituda struje na izlazu biće jednaka proizvodu struje kroz izvor konstantne struje koji čini M5 i pojačanja struje koje se realizuje u paru M3-M8, odnosno M4-M6. Ovo pojačanje se realizuje odgovarajućim odnosom širina kanala tranzistora.



Komparatori

Push-pull komparatori

Nedostatak push-pull komparatora je umanjeno pojačanje u odnosu na standardni operacioni pojačavač. Uzrok tome je način vezivanja tranzistora koji imaju ulogu dinamičke otpornosti u kolu diferencijalnog pojačavača, M3 i M4. Oni su povezani kao MOS diode (kratkospojeni su gejti i drejni) usled čega je njihova dinamička otpornost veoma mala i iznosi $1/g_m$. Da bi se prevazišao ovaj problem koristi se i izmenjeno kolo sa kaskodnim push-pull izlaznim stepenom.



Komparatori

Komparatori za velika kapacitivna opterećenja

Na izlaz standardnog operacionog pojačavača (M1-M7) povezana su kasnadno dva invertora (M8-M9 i M10-M11). Kola invertora ne predstavljaju opterećenje za prethodni stepen jer nema ulazne struje. Oni istovremeno unose dodatno pojačanje, odnosno obezbeđuju povećanje maksimalne amplitude struje na izlazu. Da bi postigao efekat uvećanja amplitude struje u invertorima treba da budu dovoljno velikih dimenzija.

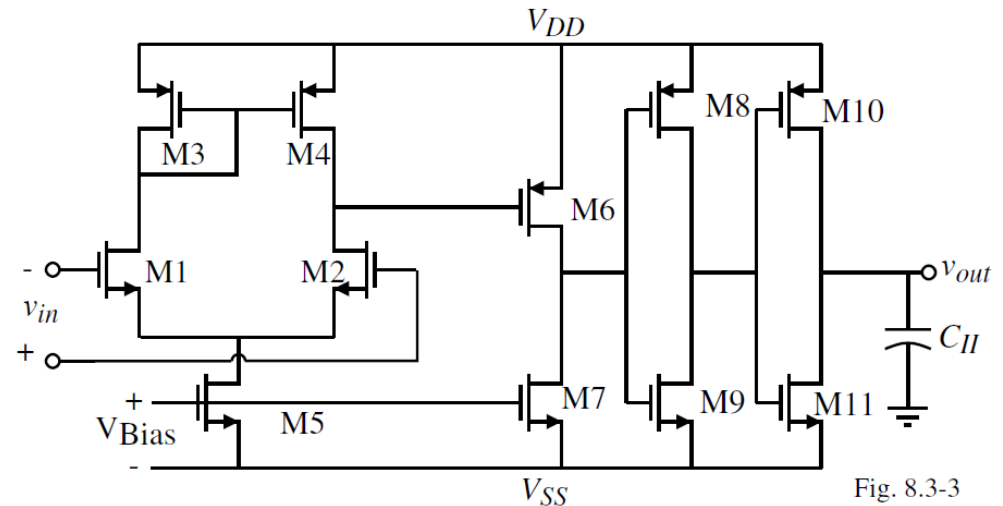


Fig. 8.3-3

Šmitov komparator

Regenerativna kola sadrže pozitivnu povratnu spregu sa kružnim pojačanjem većim od jedan. Osnovna karakteristika regenerativnih kola je da se proces promene stacionarnih stanja u mreži menja vrlo brzo jer je kumulativan.

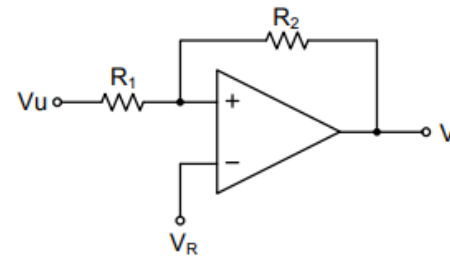
Kada se regenerativna kola realizuju opracionim pojačavačem pozitivna povratna sprega se ostvaruje povezivanjem izlaza sa neinvertujućim ulazom. U ovim kolima može da se koristi i referentni napon za podešavanje nivoa okidnih pragova. Da bi bio zadovoljen regenerativni princip da je kružno pojačanje veće od jedan neophodno je da bude ispunjeno:

$$\beta > \frac{1}{A}$$

gde je koeficijent povratne sprege najčešće

$$\beta = \frac{R_1}{R_2}$$

Vrednost napona pri kome dolazi do promene stanja komparatora nazivaju se **naponi pragova** (prag okidanja). Postoje dve vrednosti praga okidanja zavisno od toga da li se prelazi iz negativnog zasićenja u pozitivno ili obrnuto.



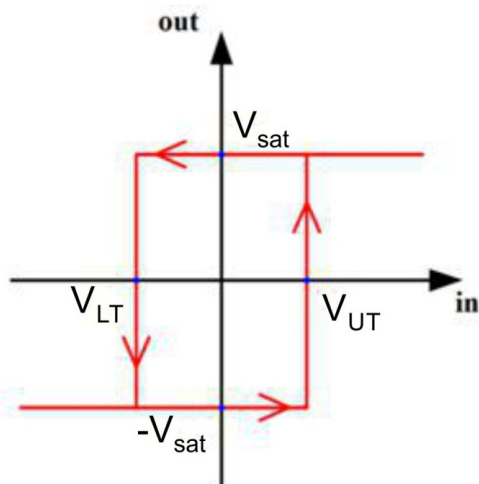
Primene OP u nelinearnim kolima

Neinvertujući Šmitov komparator

- Ovim kolom se konvertuje proizvoljni talasni oblik u pravougaoni. Ulazni napon menja stanje na izlazu OP svaki put kada njegoa vrednost prelazi prag okidanja.

$$V_+ = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{out} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_{diff_in} = 0 \Rightarrow V_{in} = -V_{out} \frac{R_1}{R_2} = \begin{cases} V_{sat} \frac{R_1}{R_2} & \text{za } V_{out} = -V_{sat} \\ -V_{sat} \frac{R_1}{R_2} & \text{za } V_{out} = V_{sat} \end{cases}$$



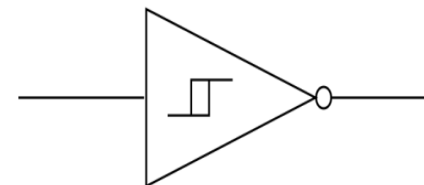
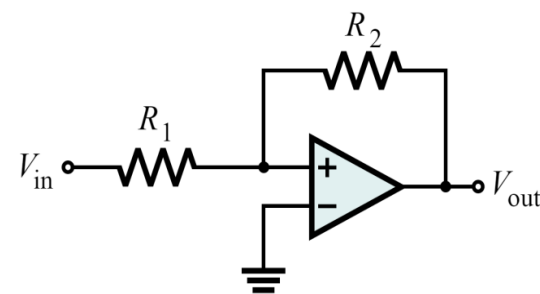
Naponi pragova su:

$$V_{UT} = V_{sat} \frac{R_1}{R_2}$$

$$V_{LT} = -V_{sat} \frac{R_1}{R_2}$$

Širina histerezisa:

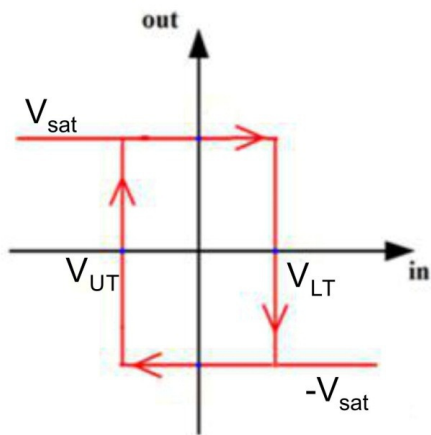
$$V_H = V_{UT} - V_{LT} = 2V_{sat} \frac{R_1}{R_2}$$



Invertujući Šmitov komparator

$$V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{out}$$

$$V_{diff_in} = 0 \Rightarrow V_{in} = V_{out} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \begin{cases} V_{sat} \frac{R_1}{R_1 + R_2} & \text{za } V_{out} = V_{sat} \\ -V_{sat} \frac{R_1}{R_1 + R_2} & \text{za } V_{out} = -V_{sat} \end{cases}$$



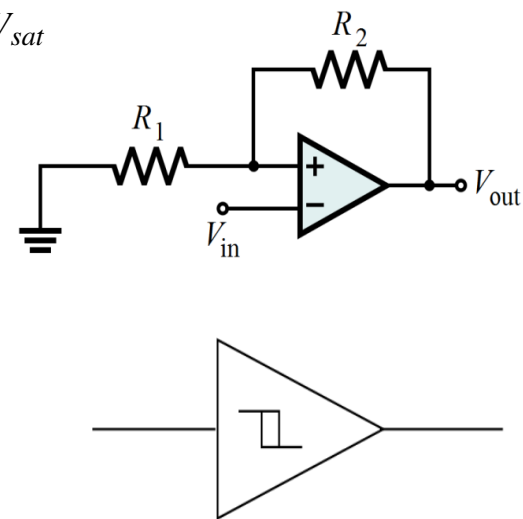
Naponi pragova su:

$$V_{UT} = -V_{sat} \frac{R_1}{R_2}$$

$$V_{LT} = V_{sat} \frac{R_1}{R_2}$$

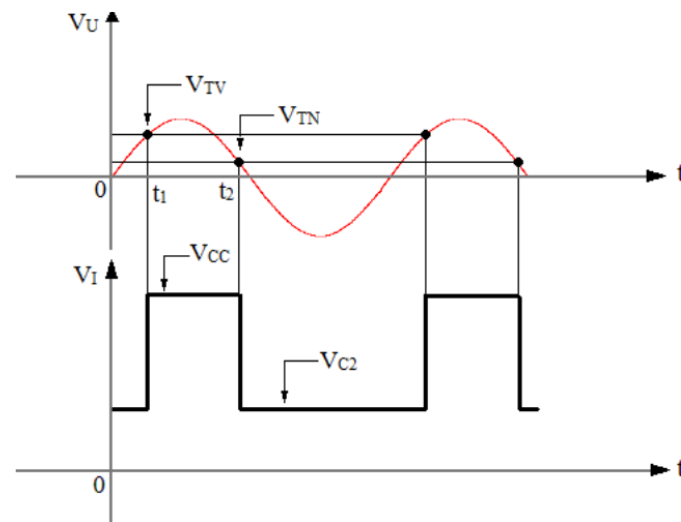
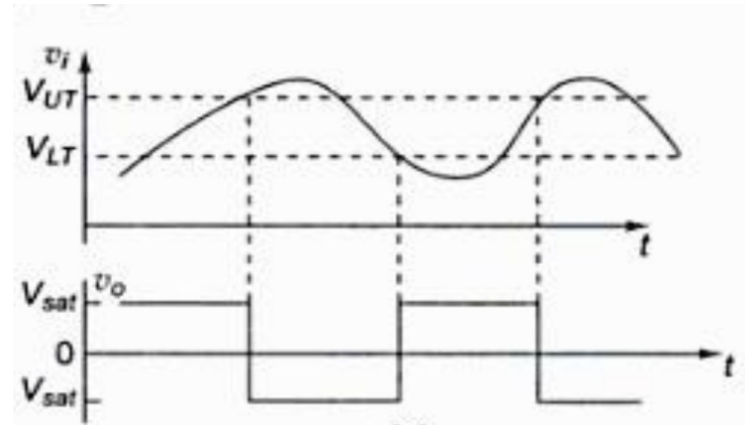
Širina histerezisa:

$$V_H = V_{LT} - V_{UT} = 2V_{sat} \frac{R_1}{R_2}$$



Op-amp komparator sa histerezisom (Šmitov triger)

Šmitov triger konvertuje proizvoljni analogni signal u diskretni signal. Tipična primena ovog kola je eliminisanje šuma iz signala koji se koristi u digitalnim kolima.



Komparatori sa internim histerezisom

Slika prikazuje situaciju kada je vrednost ulaznog napona v_{in} takva da transistor M1 vodi a M2 ne vodi. S obzirom da ne teče struja kroz M2 i M4 će biti u zakočenju, a samim tim i M7.

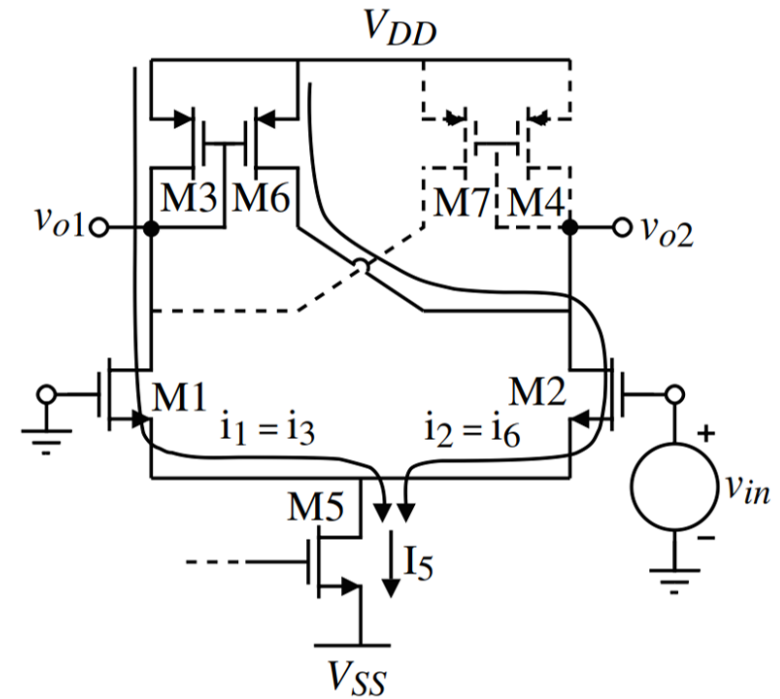
Ukoliko se napon v_{in} povećava u jednom trenutku M1 i M2 će promeniti režim rada. Tranzistor M2 i M6 su vezani na red tako da će provesti istovremeno. Iz uslova da su struje kroz M2 i M6 jednake odredićemo napon pri kome će M2 preći iz zakočenja u aktivnu oblast.

$$I'_{D1} + I'_{D2} = I_{D5}$$

$$I'_{D1} = I'_{D3}$$

$$I'_{D2} = I'_{D6} = \frac{(W/L)_6}{(W/L)_3} \cdot I'_{D3}$$

$$I'_{D1} = \frac{I_5}{1 + \frac{(W/L)_6}{(W/L)_3}} \quad I'_{D2} = \frac{I_5}{1 + \frac{(W/L)_3}{(W/L)_6}}$$



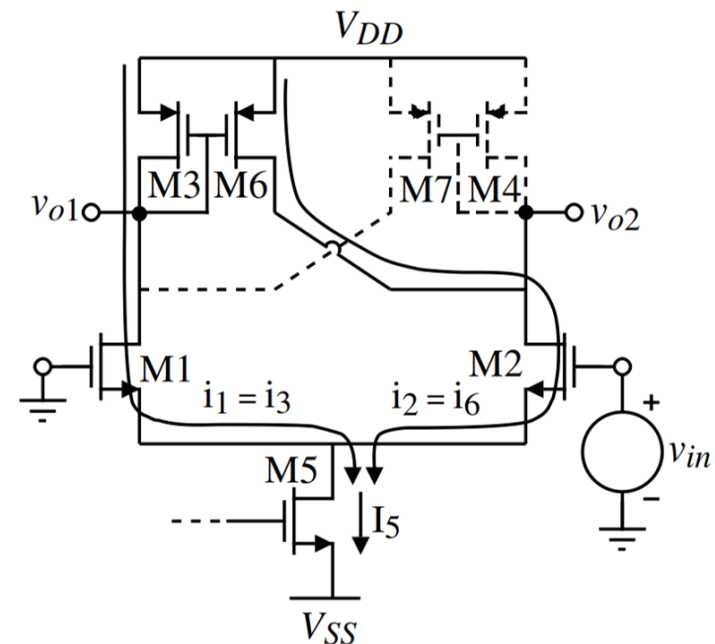
Komparatori sa internim histerezisom

Tranzistori M3 i M6 nisu istih dimenzija. M6 ima veći odnos širine i dužine kanala. Pošto su naponi VGS za ova dva tranzistora isti, to znači da će u situaciji kada vode oba tranzistora teći veća struja kroz M6 nego kroz M3. Odavde sledi da će u trenutku kada vode oba tranzistora u diferencijalnom paru (M1, M2) teći veća struja kroz M2 nego kroz M1. Zbog unesene neravnoteže prenosna karakteristika diferencijalnog pojačavača neće prolaziti kroz koordinatni početak već će biti pomerena u desno.

$$I'_{D1} = \frac{I_5}{1 + \frac{(W/L)_6}{(W/L)_3}} \quad I'_{D2} = \frac{I_5}{1 + \frac{(W/L)_3}{(W/L)_6}}$$

$$\frac{(W/L)_6}{(W/L)_3} > 1 \Rightarrow I'_{D2} > \frac{I_5}{2}, \quad I'_{D1} < \frac{I_5}{2}$$

$$V_T^+ = V'_{GS2} - V'_{GS1} = \sqrt{\frac{I'_{D2}}{A_2}} + V_{t2} - \left(\sqrt{\frac{I'_{D1}}{A_1}} + V_{t1} \right) > 0$$



Naponski komparatori

Osnovna pitanja

1. Klasifikacija komparatora, primena komparatora.
2. Komparatori realizovani operacionim pojačavačima.
3. Prenosna karakteristika idealnog i realnog komparatora.

Ostala pitanja

1. Statičke karakteristike komparatora.
2. Dinamičke karakteristike komparatora (vreme odziva).
3. Komparator sa otvorenim kolktorom (šema izlaznog stepena LM139 i objašnjenje rada)
4. Push-pull komparator.
5. Invertujući Šmitov komparator.
6. Neinvertujući Šmitov komparator.
7. Kompator sa internim histerzismom (električna šema i prenosna karakteristika).