

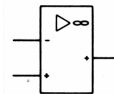
3 LINEARNA ELEKTRONSKA VEZJA

3.1 OSNOVNE ZNAČILNOSTI

Za linearna ali analogna vezja je značilno, da se izhodni signal spreminja po linearni ali katerikoli drugačni zvezni funkciji, sorazmerno glede na spremembo (napetosti, toka, frekvence, oblike,...) vhodnega signala. Pri linearnih vezjih se napetosti oz. signali povsod spreminjajo zvezno in lahko zavzamejo katerokoli vrednost v okviru pričakovanih omejitev (npr. glede na napajalno napetost od $+U_{cc}$ do $-U_{cc}$). Največkrat so osnovni gradniki linearnih vezij operacijski ojačevalniki, ki v najrazličnejših funkcijah in medsebojnih povezavah omogočajo željeno »obdelavo« vhodnih analognih signalov (ojačanje, primerjavo, seštevanje-odštevanje, frekvenčno omejitev,...). V sodobnih analognih integriranih vezjih je zaradi kompleksnosti funkcij, pogostokrat zaslediti tudi komponente digitalnih vezij (logična vrata, flip-flopi,...), vendar ostaja osnovna funkcija zvezna (linearna odvisnost izhodnega signala glede na vhodnega).

3.2 OPERACIJSKI OJAČEVALNIK

Operacijski ojačevalniki predstavljajo osnovno linearno vezje, ki je lahko izvedeno v obliki posameznega integriranega vezja ali pa je vključeno v kompleksnejše integrirano obliko, kjer opravlja v naprej določeno funkcijo.



Operacijski ojačevalniki se razlikujejo glede na namen uporabe, vendar pa je vsem skupno, da imajo invertirajoči in neinvertirajoči vhod, ter eden izhod. Napajalni pogoji, kontrolni in pomožni vhodi, frekvenčna kompenzacija, ojačevalni faktor, SR faktor, vhodna in izhodna impedanca in drugi parametri so specifični glede na izvedbo in predviden namen uporabe.

V splošnem pa za realni operacijski ojačevalnik veljajo sledeče zahteve:

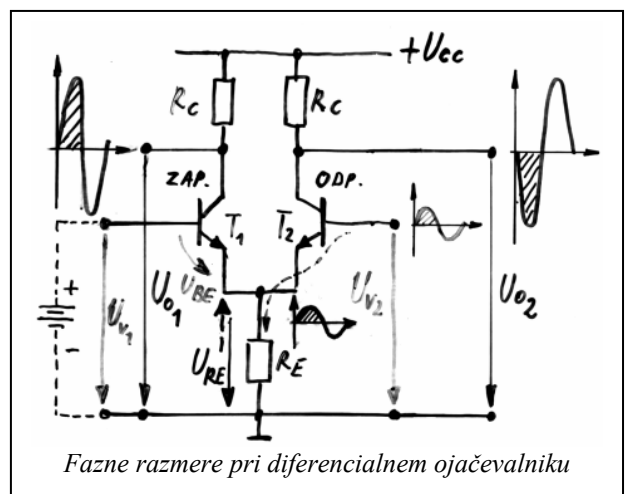
- ✓ Zelo veliko napetostno ojačanje diferencialnega signala ($A_0 > 100000$).
- ✓ Zelo malo ojačanje sofaznega signala (CMRR-Common Mode Rejection Ratio)
- ✓ Visoka vhodna upornost. (nekaj $M\Omega$)
- ✓ Nizka izhodna upornost. (nekaj Ω)
- ✓ Ojačanje enosmernih in izmeničnih signalov.
- ✓ Invertiranje ali neinvertiranje vhodnega signala.
- ✓ Visok faktor sledenja izhodne napetosti SR (*Slew Rate*)

$$CMRR = 20 \cdot \log \frac{A_D}{A_S}$$

Za doseganje teh zahtev ima bistveno vlogo na vhodu nameščen diferencialni ojačevalnik, kateri pa določa tudi vrsto vhodov. Glede na vrsto vhodnih tranzistorjev razlikujemo operacijske ojačevalnike z bipolarnimi, J-FET in MOSFET vhodi, kar posledično pomeni različne lastnosti vhodov. Izhodi so lahko v obliki Push-Pull vezja, z odprtim kolektorjem (OC), z vgrajeno pretokovno oz. kratkostično zaščito ali brez nje, lahko delujejo v impulznem režimu (npr. frekvenčni izhod, PWM izhod,...).

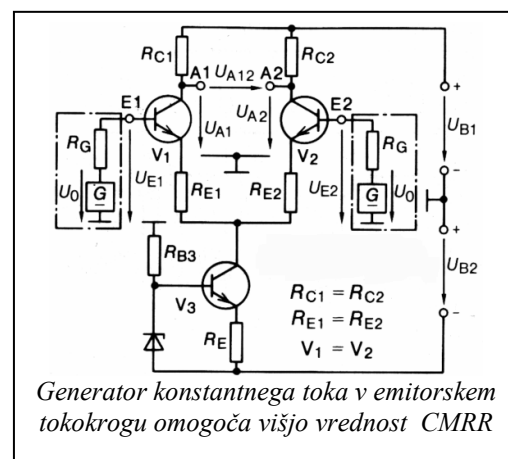
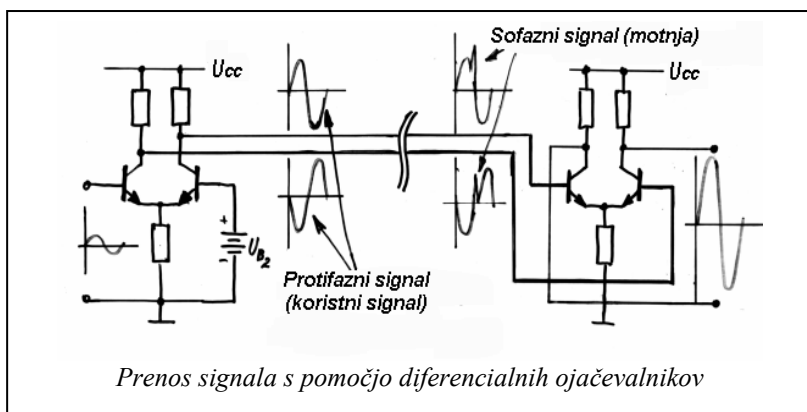
Diferencialni ojačevalnik

Diferencialni ojačevalnik sestavljata dva vzporedna NPN ali PNP tranzistorska tokokroga, ki sta v emitorskem delu povezana. Na ta način je doseženo, da povečanje toka (odpiranje tranzistorja) v eni veji, povzroči zmanjšanje toka (zapiranje nasprotnega tranzistorja) v nasprotni veji ob pogoju, da ima tranzistor v tej veji naspremenjen bazni tok- ojačanje diferencialnega signala je zelo veliko. V primeru sočasne in enake spremembe baznega toka tranzistorjev v obeh vejah, se za faktor β vendar enako v obeh vejah, spremenita tudi kolektorska tokova. Posledica je, da v tem primeru ni spremembe (realno je minimalna) potencialne razlike med kolektorjema obeh tranzistorjev- ojačanje sofaznega signala je torej minimalno.



V praksi lahko rečemo, da predstavljajo temperaturne spremembe napetosti U_{BE} , nihanje napajalne napetosti (brum,..) ali enake motnje na obeh vloh sofazni signal, ki ga diferencialni ojačevalnik skoraj ne ojačuje, medtem ko močno ojačuje koristni (diferenčni) signal. Zaradi potrebe po enakem iznosu sprememb v obeh vejah, morajo imeti tranzistorji v obeh vejah čimbolj izenačene karakteristike (uparjeni). Fino nastavitev pa je mogoče doseči tudi s pripadajočim trimmerjem v emitorskem tokokrogu. Še boljše učinke dosežemo, če v emitorskem tokokrogu nadomestimo upor R_E s tokovnim generatorjem. V tem primeru je ojačanje sofaznega signala odvisno le še od toleranc tranzistorjev, kar zviša razmerje med ojačanjem diferenčnega in sofaznega signala na 100dB.

Diferencialni ojačevalnik ima zaradi teh lastnosti veliko prednost, saj omogoča kljub prisotnosti motenj, ojačanje zelo šibkih signalov. V praksi je take vrste signal npr. signal iz dinamičnega mikrofona (nekaj mV), ki se mu v kablu pripojijo sofazne motnje, ki pa jih diferencialni ojačevalnik skorajda ne ojači. Pogostokrat je prenos signalov izveden po diferencialnem načinu tudi zaradi enostavnejših povezav (npr. parice).



Delovanje operacijskega ojačevalnika

Za operacijski ojačevalnik lahko zapišemo dve pravili, s pomočjo katerih lahko vedno presojava pravilnost delovanja. Pravili opisujeta osnovna dejstva, ki veljajo za katerikoli izmed številnih vezav, ki jih z operacijskimi ojačevalniki lahko realiziramo in sta pri analizi delovanja nujni. (<http://www.williamson-labs.com>)

Z E L O P O M E M B N O!

1.PRAVILO

Operacijski ojačevalnik bo **glede na razliko in polariteto** napetostnih potencialov na vloh, zavzel na izhodu tak napetostni potencial (pozitiven oz. negativen), da bo preko negativne povratne vezave vplival nazaj na invertirajoči (-) vhod, da se njegov potencial **izenači** s potencialom neinvertirajočega (+). To pomeni, da sta v »normalnih pogojih« delovanja oba vloh na izenačenih potencialih. Napetostna razlika med vlohoma je v tem primeru minimalna in jo v praksi lahko večinoma zanemarimo.

V primeru, da doseženi potencial na izhodu (npr. omejitev zaradi prenizke napajalne napetosti) ne zadostuje za izenačitev obeh vhodnih potencialov, ostane med vlohoma sorazmerna (večja ali manjša) napetostna razlika. V takem slučaju zavzame izhod napetostni potencial, ki je v danih pogojih maksimalno mogoč. To je lahko katerikoli potencial med $-U_{nap} + U_{sat}$ do $+U_{nap} - U_{sat}$ (*rail to rail*), kar je odvisno od vrste operacijskega ojačevalnika. Vhodni tok je izjemno mali (npr. za LF411 je 0,2 nA) in ga pri izračunu vezja lahko večinoma zanemarimo.

2.PRAVILO

Prvo pravilo ne velja, če sta vloh zamenjana. To pomeni, da je povratna vezava pozitivna in bi lahko rekli, da operacijski ojačevalnik »izenačuje« vhodni potencial v »napačno smer«. V tem primeru **deluje operacijski ojačevalnik kot primerjalnik vhodnih potencialov** in na izhodu zavzame skrajni možen potencial, odvisen od polariteto napetostne razlike med vlohoma. Izhod torej zavzame eno od obeh skrajnih vrednosti (pozitivno: $+U_{nap} - U_{sat}$ oz. negativno: $-U_{nap} + U_{sat}$).

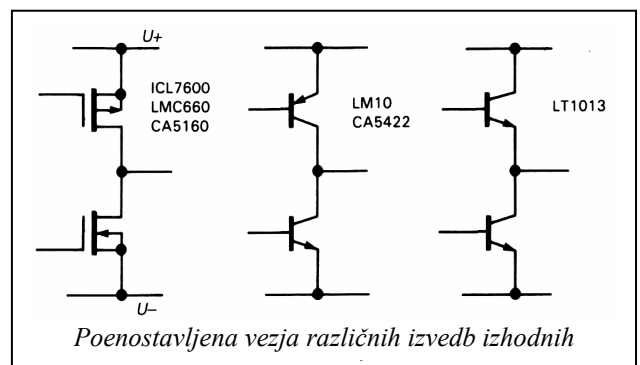
3.2.1 NAPAJANJE OPERACIJSKEGA OJAČEVALNIKA

Simetrično napajanje (*offset napajanje*) s pozitivno in negativno napetostjo enake velikosti, zahteva velika večina standardnih operacijskih ojačevalnikov, kar pomeni, da je optimalna nastavitvev delovne točke pri 0V (*referenčni potencial-masa*). Seveda je možna nastavitvev delovne točke tudi pri katerem drugem referenčnem potencialu (odmik od referenčnega potenciala 0V), vendar je to odvisno od posameznega tipa operacijskega ojačevalnika. Za nekatere tipe (npr. LM741) to pomeni le nekaj voltov, za druge (npr. TLxxx serija) pa je nastavitvev možna skoraj v celotnem obsegu napajalne napetosti. Večino teh operacijskih ojačevalnikov je možno priključiti tudi na enojno napajanje, pri čemer je potrebno poudariti, da je potem potencial delovne točke (referenčni potencial) običajno pri polovični vrednosti napajalne napetosti. To je potrebno dodatno zagotoviti, npr. z napetostnim delilnikom. Tega načina se zaradi dodatnih problemov in omejitev v praksi izogibamo, oz. v tem primeru je bolje izbrati operacijski ojačevalnik, ki je predviden za asimetrično napajanje.

Asimetrično napajanje (*single supply*) omogočajo le nekatere izvedbe operacijskih ojačevalnikov, ki so namenjene za razmere brez negativne napajalne napetosti (npr. baterijsko napajanje, napajanje elektronskega vezja v senzorjih, daljinsko napajanje,...). Tovrstni operacijski ojačevalniki imajo pogosto minimalno porabo energije, na izhodu pa tranzistor z odprtim kolektorjem.

Izhodnja stopnja operacijskega ojačevalnika

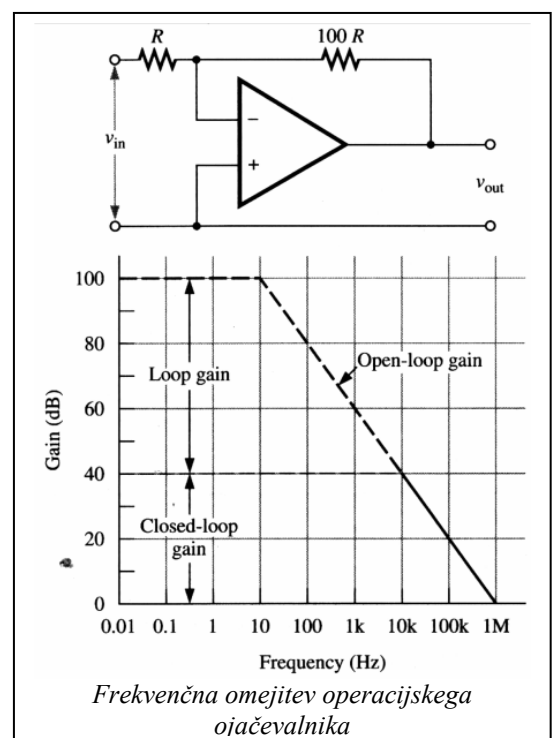
Glede na lastnosti (hitrost, obremenitev,..) imajo operacijski ojačevalniki različne izvedbe izhodne stopenj. Nekatere izhodne stopnje imajo vgrajeno tudi kratkostično zaščito, ki omejuje izhodni tok na še dovoljen nivo (npr. LM 741). V nekaterih primerih je na izhodu samo tranzistor z odprtim kolektorjem, ki omogoča različno napajanje operacijskega ojačevalnika in bremena.



3.2.2 ZNAČILNI PARAMETRI IN KARAKTERISTIKE

Ojačanje realnega operacijskega ojačevalnika A_0 (brez povratne vezave) je zelo veliko (100 000 in več) vendar se pri ojačevalniških vezjih v praksi uporablja dosti manjše ojačanje, ker je s tem zagotovljena dosti višja frekvenčna meja. Za večino operacijskih ojačevalnikov velja, da je produkt ojačanja in pasovne širine (zgornja frekvenčna meja) konstantna vrednost ($gain \cdot bandwidth = GBW = konst.$).

Sorazmerno upadanju ojačanja se spreminjajo tudi fazne razmere med vhodno in izhodno napetostjo. Praviloma velja, da je pri mejni frekvenci (-3dB) tudi faza že spremenjena za 45° (glede na fazne razmere v izhodišču - najnižja frekvenca). Pri primerjalniku in podobnih vezjih, kjer je zahtevano zelo velik ojačevalni faktor, ojačanje ostane na nivoju A_0 ali pa ga s pozitivno povratno zvezo še povečamo, da je prehod izhodnega signala iz enega v drugo stabilno stanje čim hitrejši.

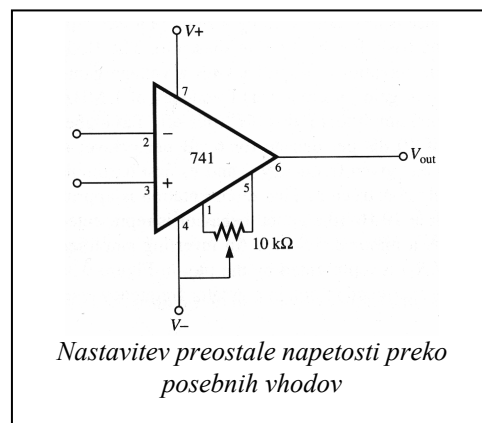


Vhodni tokovi (Input Bias, Offset current)

Kljub velikim vhodnim upornostim pa moramo v zahtevnejših primerih posvetiti tudi pozornost vhodnim tokovom I_b (*bias*) in toku med obema vhomoma I_{offset} . Tok I_b je definiran kot maksimalni tok, ki je potreben na vsakem od vходов, da zavzame izhod v tem primeru napetostni potencial 0V. Pogosto se ta tokova podajata kot povprečni tok za invertirani in neinvertirani vhod. Tipične vrednosti so od nekaj nA do nekaj pA, vendar jih moramo upoštevati le v primeru nizkih tokovnih oz. napetostnih signalov na vhodu. Pri novejših operacijskih ojačevalnikih jih lahko večinoma zanemarimo (npr. serija TLxxx).

Preostala napetost vhoda (Input Offset voltage)

Preostala napetost V_{OS} je definirana kot tista napetost, ki je dotatno potrebna med obema vhomoma, da potencial na izhodu izenačimo s potencialom na »referenčnem« vhomu (npr. 0V) seveda ob pogoju, da ni nobenega zunanega signala. To pomeni »fino nastavitev« izhodiščnega potenciala na izhodu. Nekateri operacijski ojačevalniki imajo predvidene posebne vhode za zunanjo kompenzacijo preostale napetosti kar je potrebno npr. pri ojačevalnikih enosmerne napetosti. Pri operacijskih ojačevalnikih, ki pa teh vходов nimajo, pa je možna tudi kompenzacija s pomočjo dodatne enosmerne napetosti preko invertiranega oz. neinvertiranega vhoda.



CMRR (Common Mode Rejection ratio)

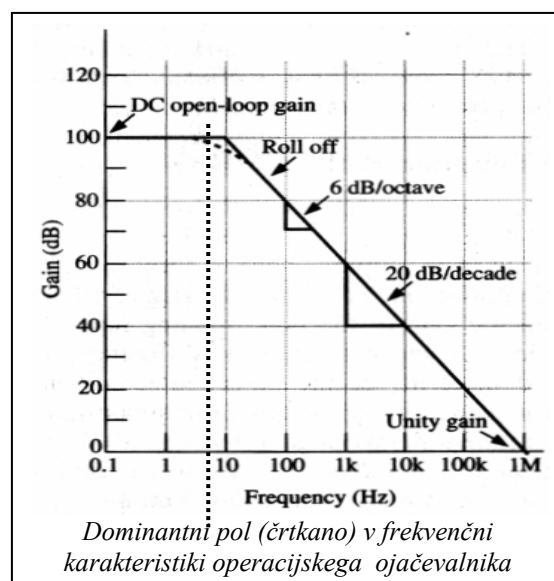
Razmerje med ojačanjem diferenčnega in ojačanjem sofaznega signala podaja faktor CMRR v dB. V idealnem slučaju želimo, da se napetost na izhodu ne bo spremenila (npr. 0V), če se bo potencial na obeh vhomih spremenjal enako in istočasno. Vendar se pri realnih operacijskih ojačevalnikih sofazno ojačanje lahko spreminja glede na nivo vhodne napetosti, kar moramo v nekaterih primerih upoštevati (npr. merilni ojačevalniki za enosmerne napetosti, regulatorji,...). Običajno je sofazno ojačanje 1, kar pomeni, da izhod zavzame isti potencial kot je trenutno na obeh vhomih (brez diferenčnega signala).

Hitrost sledenja izhodne napetosti (Slew Rate)

Parameter *Slew Rate* (v nadaljevanju *SR*) je merilo za hitrost sledenja izhodne napetosti spremembam napetosti na vhodu in se podaja v $V/\mu s$. V vezjih, kjer so zahteve po veliki hitrosti (pravokotni impulzi, digitalni signali,..) je potrebno uporabiti operacijske ojačevalnike z dovolj visoko vrednostjo *SR*. Za navadne operacijske ojačevalnike je *SR* med $5 V/\mu s$ (LM741) in $20 V/\mu s$ (TL 081), pri hitrejših znaša $100 V/\mu s$, specialne izvedbe pa dosežejo tudi $6000 V/\mu s$ (LH0063C).

Frekvenčna karakteristika

Višji *SR* omogoča praviloma tudi večji frekvenčni razpon operacijskega ojačevalnika. Frekvenčni razpon je definiran kot območje konstantnega ojačanja pri čemer smatramo, da je frekvenčna meja tam, kjer pade ojačanje za $-3dB$ ($0.707 \cdot A_U \rightarrow$ takrat pade moč na polovično vrednost). Zaradi enosmernih povezav omejitve spodnje frekvenčne meje seveda ni, zgornja frekvenčna meja je odvisna od velikosti ojačanja in vrste operacijskega ojačevalnika. Razlikujemo nekompenzirane operacijske ojačevalnike in tiste z vgrajeno frekvenčno kompenzacijo (npr. LM 741). Nekompenzirani imajo praviloma višji frekvenčni razpon, katerega pa lahko znižamo z zunanjo negativno frekvenčno odvisno povratno vezavo (npr. LF355).



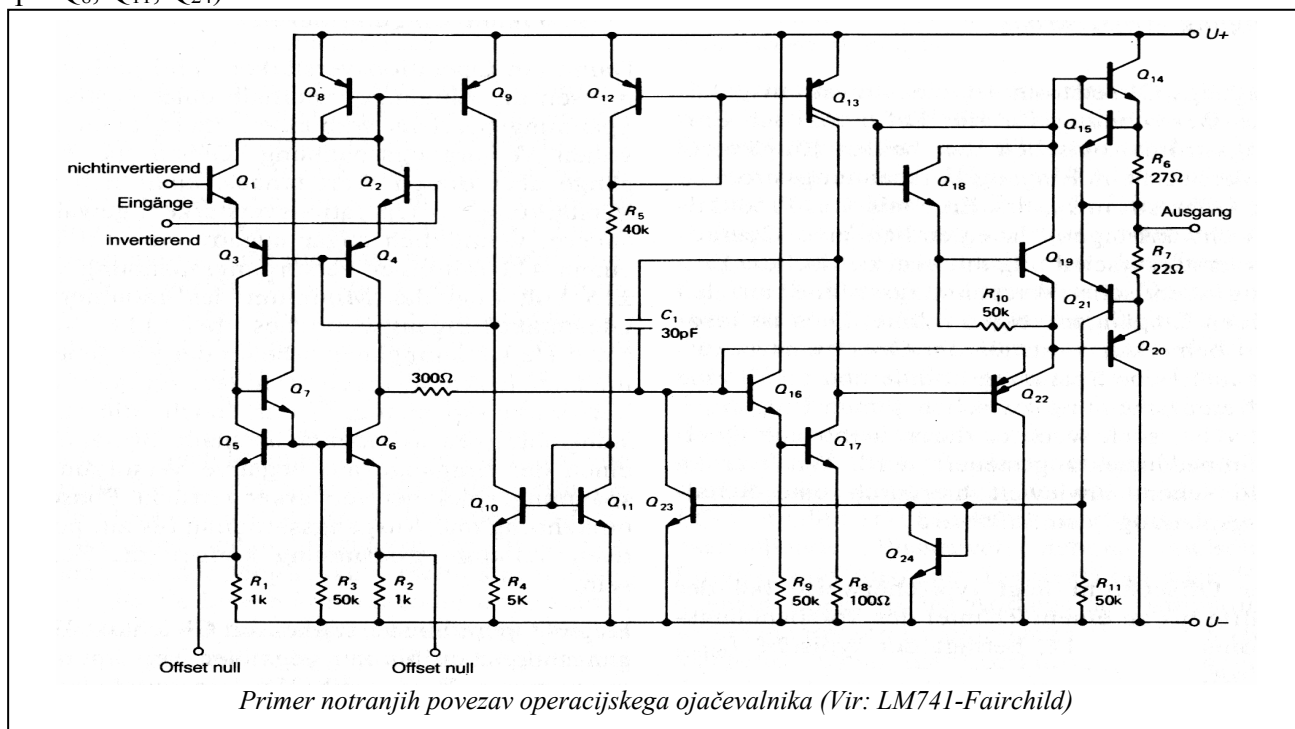
Najnižjo frekvenco, pri kateri **ojačanje A_0** že upade za -3dB, imenujemo **dominantni pol** (prekinjena črta na levi sliki). Višje od frekvence dominantnega pola ojačanje upada njevečkrat s tipično vrednostjo **20dB/dekado**, kar pomeni isto strmino kot **6 dB/oktavo**. Iz frekvenčnega diagrama lahko enostavno razberemo frekvenčno mejo ob izbranem ojačanju, vendar je karakteristika zanimiva samo do točke, kjer je **tranzitna frekvenca – unity gain** ($A_U = 0\text{dB}$), kajti višje je samo še slabljenje vhodnega signala.

Drift

Drift pomeni spreminjanje napetosti in tokov na izhodu zaradi temperaturnih sprememb. Pri operacijskih ojačevalnikih znaša $1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ oz. $1\text{nA}/^\circ\text{C}$ ali manj, kar je potrebno upoštevati pri ojačevalnikih za enosmerne napetosti oz. izbrati primerne operacijske ojačevalnike z minimalnim driftom. Pojav je npr. pogostokrat opažen pri vhodnih ojačevalnikih osciloskopov, kjer se nivo žarka odmika od nastavljenega dokler ni doseženo temperaturno ravnovesje

3.2.3 NOTRANJA ZGRADBA

Iz sheme notranjih povezav operacijskega ojačevalnika, ki je vzeta za primer je razviden diferencialni ojačevalnik (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) z vhodi za kompenzacijo preostale napetosti (offset null). Kondenzator C_1 je namenjen frekvenčni omejitvi, ker je ta tip ojačevalnika že kompenziran. Izhodna stopnja je opremljena s kratkostično zaščito, ki jo predstavljata Q_{15}, Q_{21} , katera zasledujeta padec napetosti na uporih R_6 in R_7 . Potrebne diode so izvedene kot tranzistorji, ki imajo bazo in kolektor kratko sklenjena (npr. Q_8, Q_{11}, Q_{24}).



3.3 ZNAČILNEJŠA VEZJA Z OPERACIJSKIMI OJAČEVALNIKI

3.3.1 INVERTIRAJOČI OJAČEVALNIK

Operacijskega ojačevalnika zaradi ekstremno visokega ojačevalnega faktorja (npr. $10\mu V$ povzroči na izhodu spremembo $10V$) ne moremo krmiliti neposredno na vhodu, temveč preko vhodnega upora in ustrezne negativne povratne vezave, ki omogoča izenačitev potenciala s potencialom na referenčnem vhodu. Enosmerna napetost na invertirajočem vhodu povzroči zasuk faze na izhodu za 180° . Sorazmerno z višanjem frekvence pa se spreminja tudi faza, ki pri mejni frekvenci doseže že $180^\circ + 45^\circ = 225^\circ$.

Na primeru izračunajmo izraz za nap. ojačanje:

$$U_{12} = -U_2 / A_0 = 10V / 10^6 = 10\mu V$$

$$I_{12} = U_{12} / R_E = 10\mu V / 200k\Omega = 50 \cdot 10^{-12} A$$

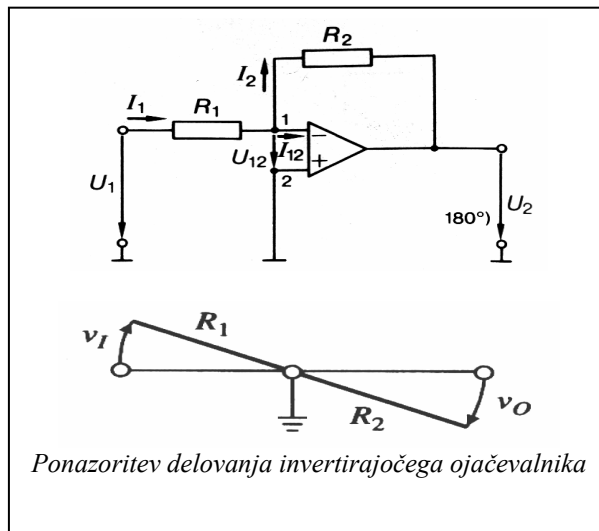
Na podlagi tega lahko rečemo, da je vhod »1« na potencialu $0V$ in jo smatramo kot virtualno maso in iz česar sledi: $I_1 - I_{12} = I_2$; $I_{12} \rightarrow 0 \Rightarrow I_1 = I_2$

$$I_1 = U_1 / R$$

$$I_2 = U_2 / R \quad \left. \vphantom{I_2 = U_2 / R} \right\} \text{zaključimo:}$$

$$A_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$U_2 = -U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1} = -U_1 \cdot A$$

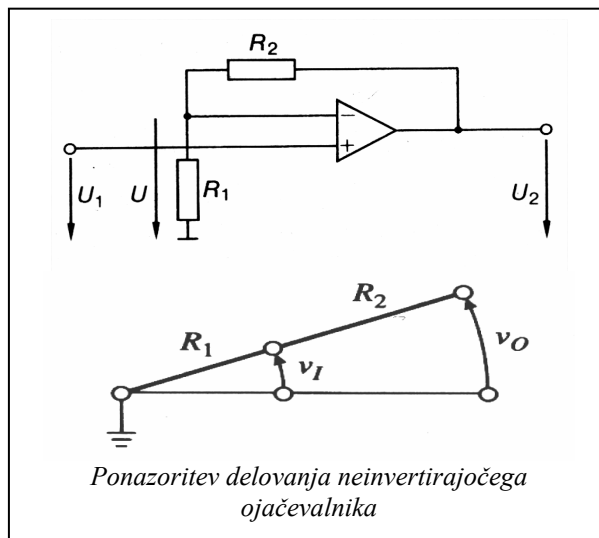


3.3.2 NEINVERTIRAJOČI OJAČEVALNIK

V primeru, da vhodni signal krmili neinvertirani vhod in je upor R_1 vezan na referenčni potencial je izhodni signal v sofazi z vhodnim. Z višanjem frekvence vhodnega signala se faza podobno kot pri invertirajočem spreminja in doseže pri mejni frekvenci 45° (izhodišče je 0°). Napetostno ojačanje lahko v tem primeru izračunamo na podoben način:

$$\frac{U}{U_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}; \Rightarrow A_0 = \frac{U_2}{U_1 - U} \quad \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



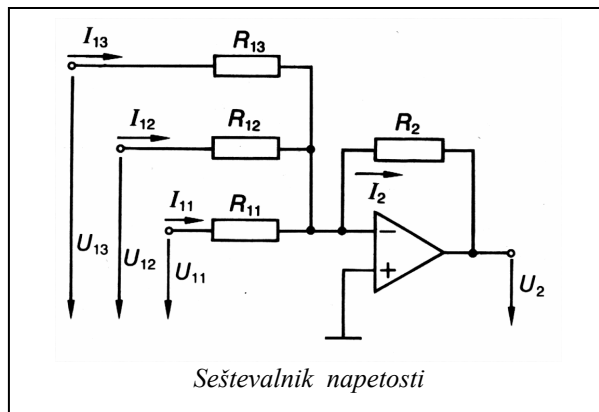
3.3.3 SEŠTEVALNIK NAPETOSTI

V merilni tehniki, in na področju NF- signalov je pogostokrat potreba po seštevanju več napetosti. Pri seštevalniku posamezne vhodne napetosti preko pripadajočih uporov, prispevajo sorazmerne tokovne deleže, katerih vsota teče skozi R_2 na izhod. Glede na navidezno ničelno točko (invertiran vhod) lahko zapišemo sledeče:

$$I_{11} + I_{12} + I_{13} = I_2; \quad I_2 = -U_2 / R_2$$

in za U_2 :

$$-U_2 = U_{11} \frac{R_2}{R_{11}} + U_{12} \frac{R_2}{R_{12}} + U_{13} \frac{R_2}{R_{13}}$$



3.3.4 ODŠTEVALNIK NAPETOSTI

Pri regulacijah, kjer se dejanska vrednost regulirane veličine primerja z želeno vrednostjo, je potreben odštevalnik napetosti, da ustvari razliko-regulacijski odstopek. Operacijski ojačevalnik, ki ima na oba vhoda priključeni zunanji napetosti, ob ustreznih pogojih ustvarja na izhodu razliko obeh vhodnih napetosti. Na podlagi vezave lahko zapišemo izraz za izračun izhodne napetosti:

$$-U_2 = A_{inv.} \cdot U_{11} - A_{neinv.} \cdot U_{12}$$

pri čemer je ojačanje za :

invertirajoči del:

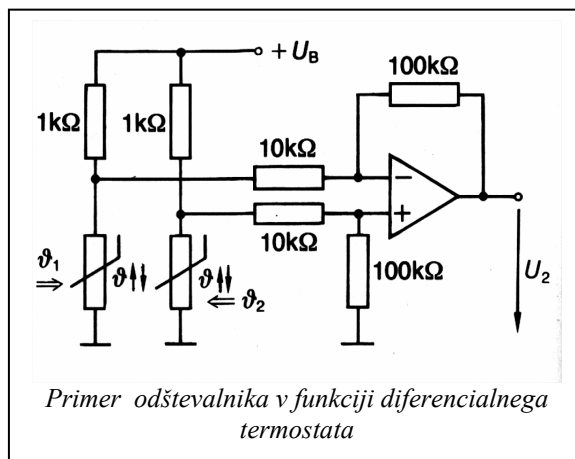
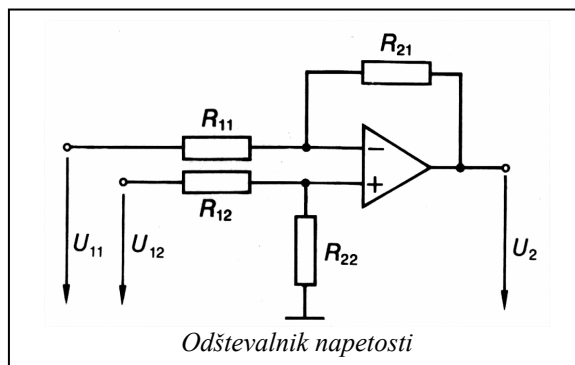
$$A_{inv.} = \frac{R_2}{R_1}$$

neinvertirajoči del:

$$A_{neinv.} = \frac{R_{11} + R_{21}}{R_{11}} \cdot \frac{R_{22}}{R_{12} + R_{22}}$$

Če izenačimo upore: $R_{11}=R_{12} = R_1$ in $R_{21}=R_{22} = R_2$ lahko zapišemo končni izraz za ojačanje obeh vhodnih napetosti:

$$-U_2 = (U_{11} - U_{12}) \frac{R_2}{R_1}$$



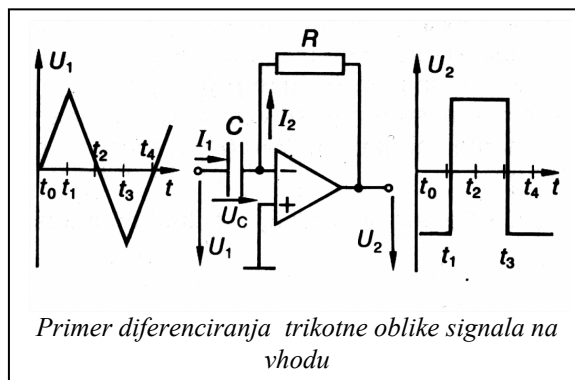
3.3.5 DIFERENCIATOR

Napetost na izhodu se spreminja glede na hitrost in smer spremembe vhodne napetosti. Pri spreminjanju napetosti na vhodu, operacijski ojačevalnik spreminja napetost na izhodu tako, da ostane potencial invertirajočega vhoda na navideznem potencialu 0V.

Za tok kondenzatorja velja izraz: $I_c = C \frac{\Delta U_c}{\Delta t}$

napetost na izhodu je: $U_2 = I_2 \cdot R$; lahko zapišemo končni izraz:

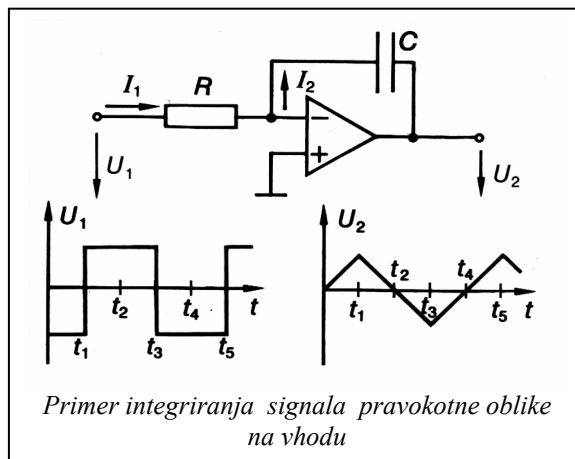
$$-U_2 = \frac{R \cdot C \cdot \Delta U_1}{\Delta t}$$



3.3.6 INTEGRATOR

Pri integratorju je hitrost in smer spremembe izhodne napetosti odvisna od velikosti in polaritete vhodne napetosti. Pri konstantni vhodni napetosti se kondenzator polni s konstantnim tokom, ker »vzdržuje« operacijski ojačevalnik na invertirajočem vhodu potencial navidezne mase. Izhodna napetost se zato linearno spreminja glede na polnjenje oz. praznjenje kondenzatorja.

$$I_C = I_2 = I_1 ; \quad I_1 = \frac{U_1}{R} \quad \frac{\Delta U_2}{\Delta t} = \frac{U_1}{R \cdot C}$$

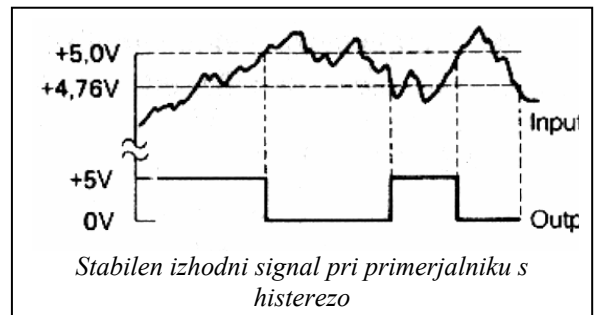
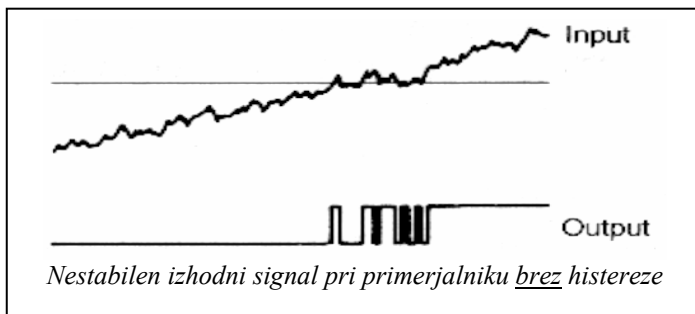
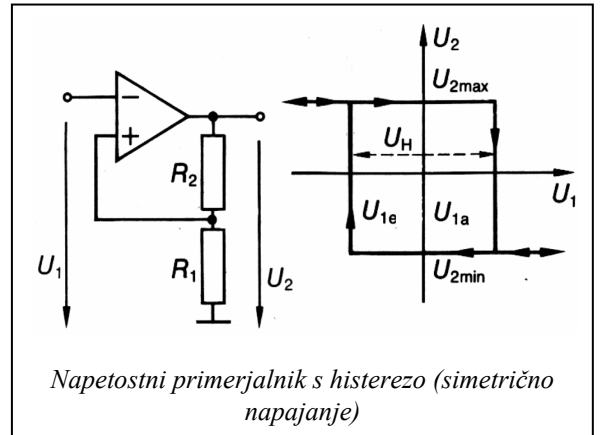


3.3.7 PRIMERJALNIK NAPETOSTI S HISTEREZO

Kadar operacijski ojačevalnik nima zunanje negativne povratne vezave in je eden izmed vhodov na referenčnem potencialu deluje, kot analogni primerjalnik. Referenčna napetost je lahko na poljubnem napetostnem nivoju v okviru napajalne napetosti*.

V primeru, da je potencial neinvertirajočega (+) vhoda višji od potenciala invertirajočega (-), zavzame izhod skrajni možni pozitivni napetostni nivo (+U_{cc}-U_{sat}).

V nasprotnem slučaju zavzame izhod skrajni najnižji nivo (npr. -U_{cc}+ U_{sat}, 0V+ U_{sat},...).



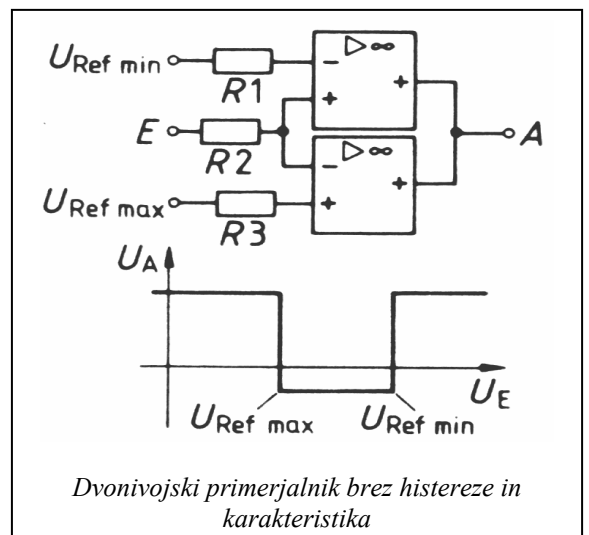
Kadar komparator nima zunanje pozitivne povratne vezave, odziv izhoda skoraj nima histereze. Vendar je ta v praksi zaradi motenj v signalu in stabilnega prehoda izhodnega signala večinoma potrebna. Ustrezno velikost histereze dosežemo s primerno pozitivno povratno vezavo. Čim nižja je vrednost upora, tem večja je histereza.

Referenčne nivoje s vplivom upora za histerezo lahko izračunamo (primer za simetrično napajanje):

$$U_{1a} = + \frac{U_{cc} - U_{sat}}{R_1 + R_2} \cdot R_1$$

$$U_{1e} = - \frac{U_{cc} - U_{sat}}{R_1 + R_2} \cdot R_1$$

Dvonivojski primerjalnik (window comparator) omogoča nadzor vhodne napetosti (signal) med dvema mejnima nivojema (npr. minimalna in maksimalna napetost). Glede na to, da je sestavljen iz dveh operacijskih ojačevalnikov, je mogoče za vsak nivo z upori v povratni zvezi zagotoviti ustrezno histerezo. Seveda lahko na podoben način sestavimo večnivojski primerjalnik z ustreznim številom izhodov (npr. za »bar graph« LED prikazovalnik, hitri A/D pretvornik- flash,...).



Nekateri standardni operacijski ojačevalniki so posebej namenjeni in izdelani za primerjalnike in jih imenujemo *komparatorji* (npr. LM393, LM339, LM311,...). Medtem ko so klasični operacijski ojačevalniki prirejani za zvezno spreminjanje izhodne napetosti, je za komparatorje značilna odločitvena funkcija, diskretni izhodni signal in večinoma izhod z odprtim kolektorjem.

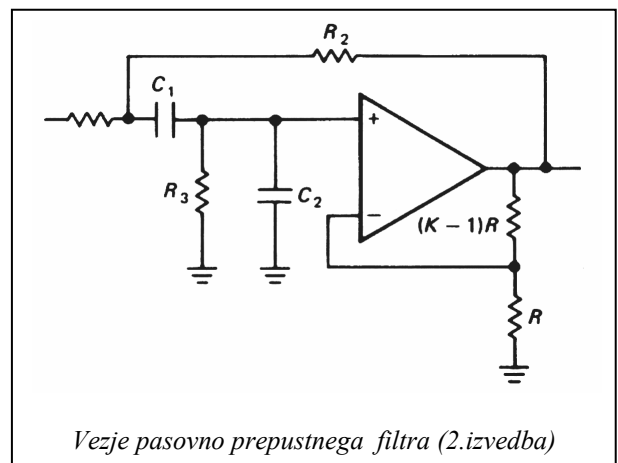
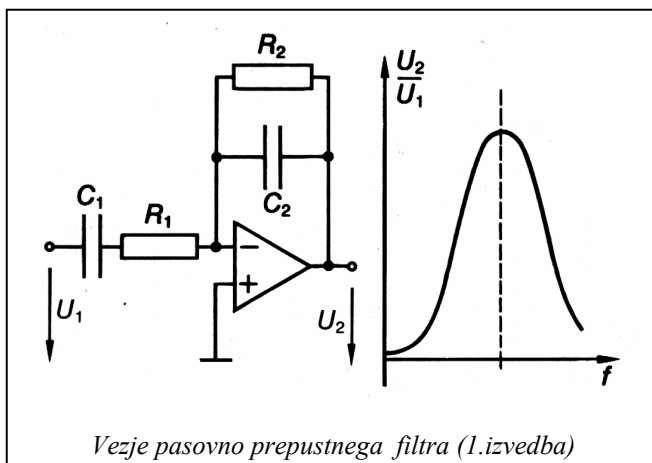
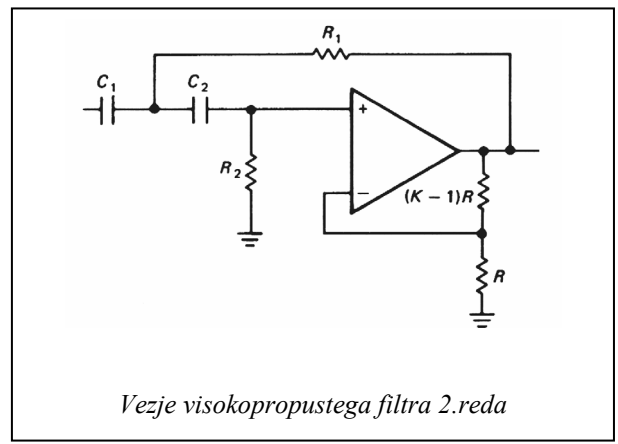
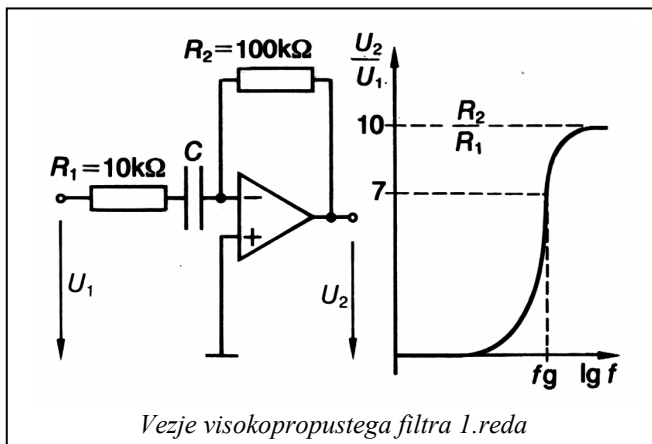
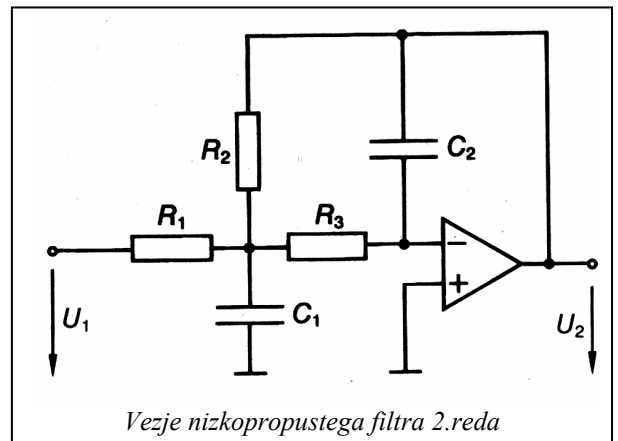
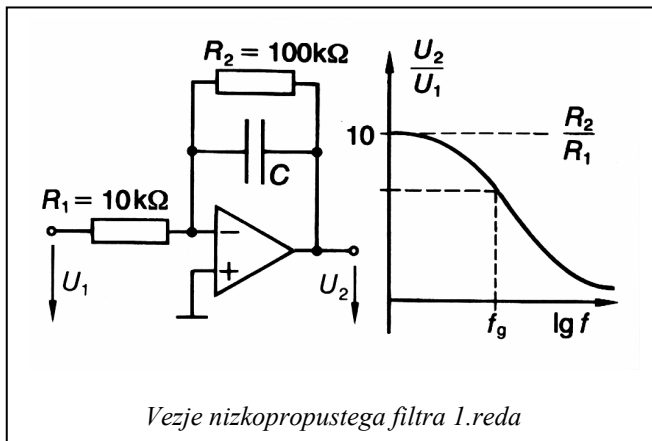
* Pri enojnem napajanju se referenčna napetost lahko nahaja v območju med minimalnim in maksimalnim pozitivnim nivojem. Ta nivoja sta odvisna od tipa operacijskega ojačevalnika oz. komparatorja in seveda od velikosti napetosti napajanja. Pri dvojnem napajanju se območje referenčne napetosti zrcalno razširi tudi v področje negativne napajalne napetosti.

3.4 AKTIVNI FILTRI Z OPERACIJSKIMI OJAČEVALNIKI

3.4.1 SPLOŠNO O AKTIVNIH FILTRIH

S pomočjo frekvenčno odvisnih komponent na vходу in v povratni vezavi, lahko bistveno vplivamo na frekvenčni potek ojačanja vhodnega signala. Zaradi relativno velikih dimenzij in izgub se tuljav v teh filtrih če se le da izogibamo. Enak učinek lahko dosežemo z ustreznimi RC vezavami. Glede na frekvenčno področje lahko v grobem ločimo nizkopasovne, pasovno prepustne, pasovno zaporne (*notch filter*) in visokoprepustne filtre. Seveda pa se frekvenčni filtri nadalje razlikujejo glede na strmino pri frekvenčni meji, glede na specifično karakteristiko (npr. RIAA), tipizirano obliko (Bessel-ov, Buttherword-ov, Chebish-ev, eliptični,...), stopnjo,...itd.

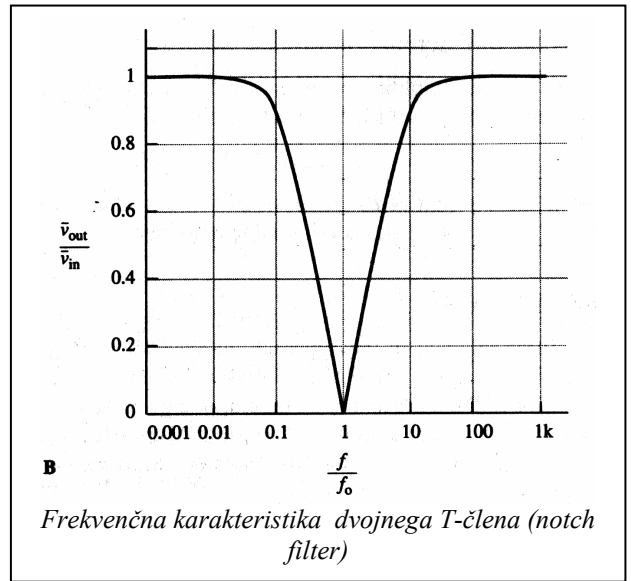
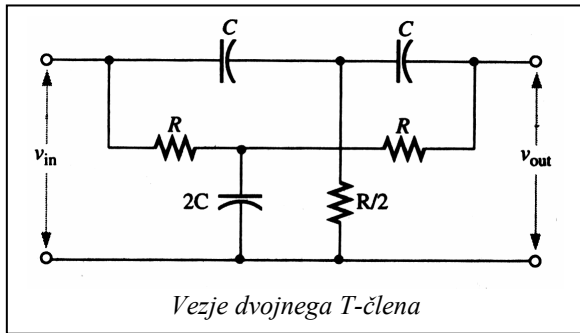
Nekaj značilnejših filtrov:



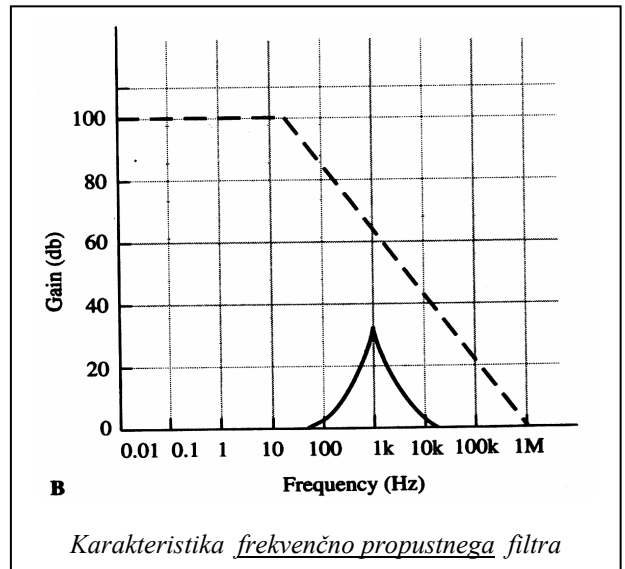
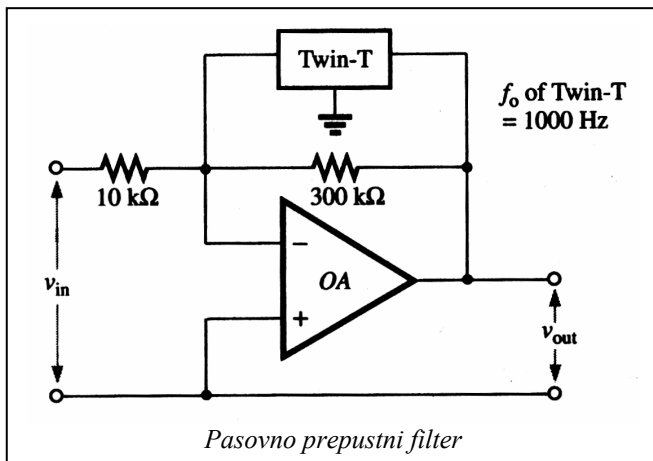
3.4.2 FILTER Z DVOJNIM T-ČLENOM

Kot pasovno propustni ali pasovno zaporni filter je v elektronskih vezjih pogosto v uporabi aktivni filter z dvojnimi T-členom.

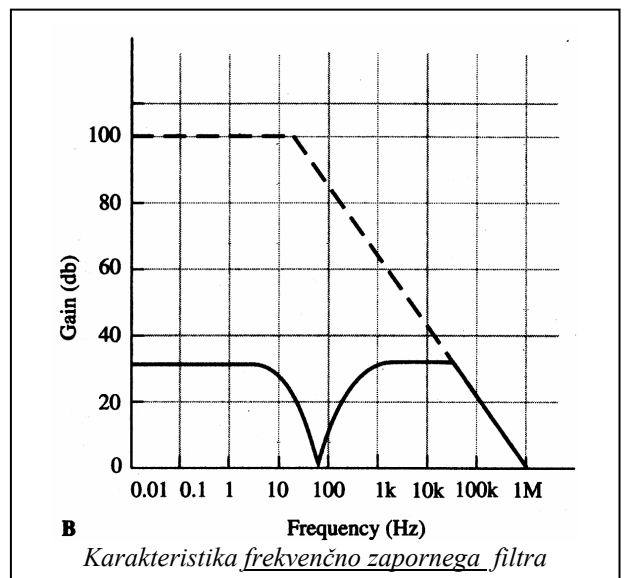
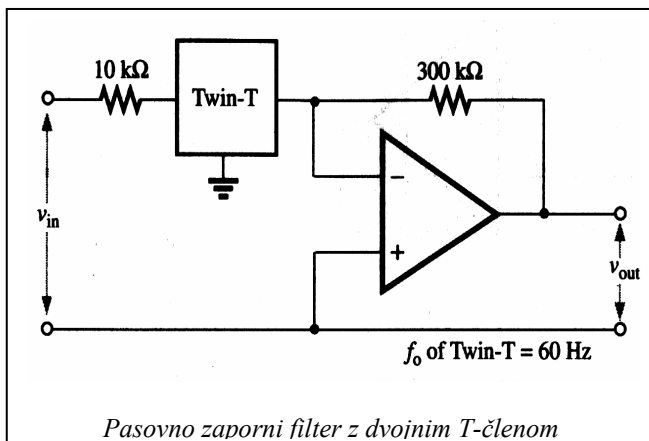
Za dvojni T-člen je značilna specifična frekvenčna karakteristika, katera omogoča izločitev izbrane frekvence, kar je pogosto potreba v elektronskih vezjih. V povezavi z operacijskim ojačevalnikom dobimo pasovno propustni oz. zaporni filter.



Operacijski ojačevalnik, ki ima v povratni vezavi dvojni T-člen predstavlja pasovno prepustni filter

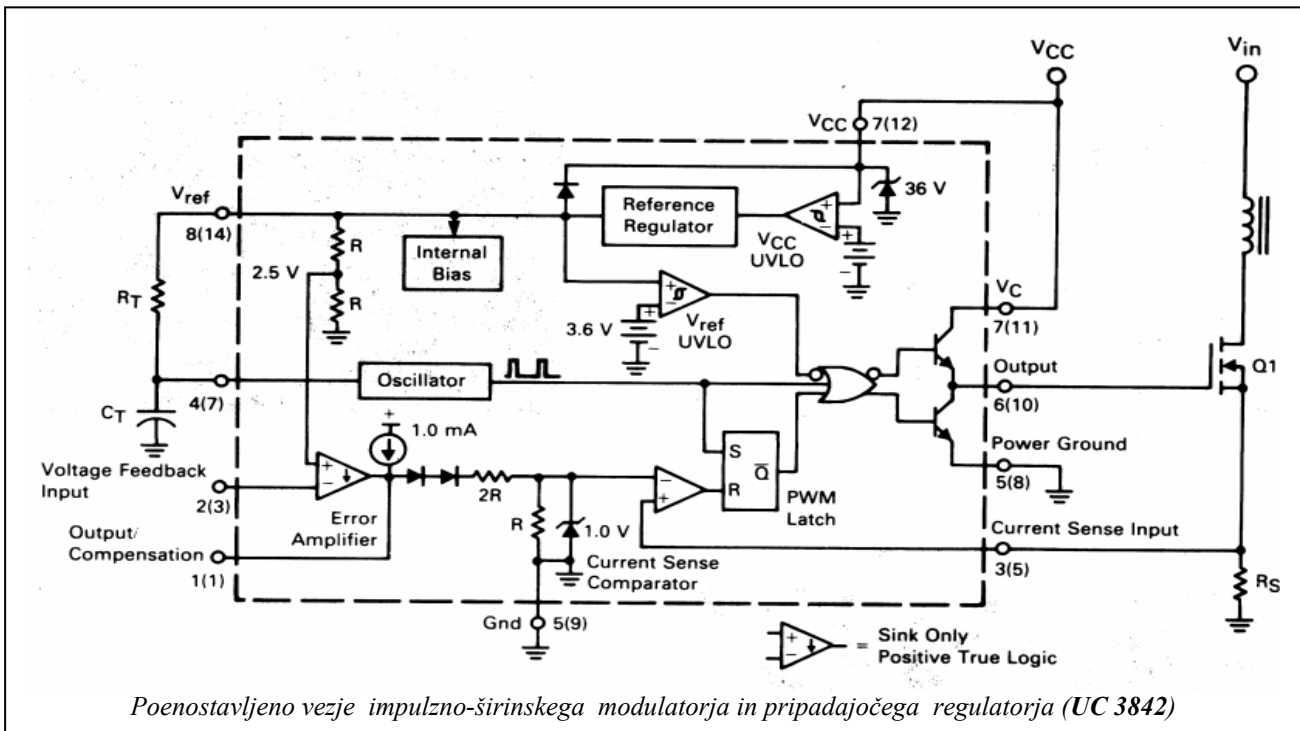


Operacijski ojačevalnik, ki ima na vходу dvojni T-člen predstavlja pasovno zaporni filter



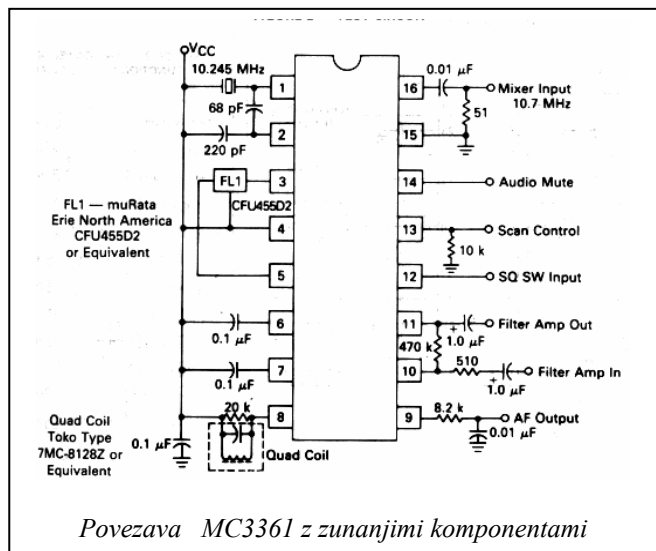
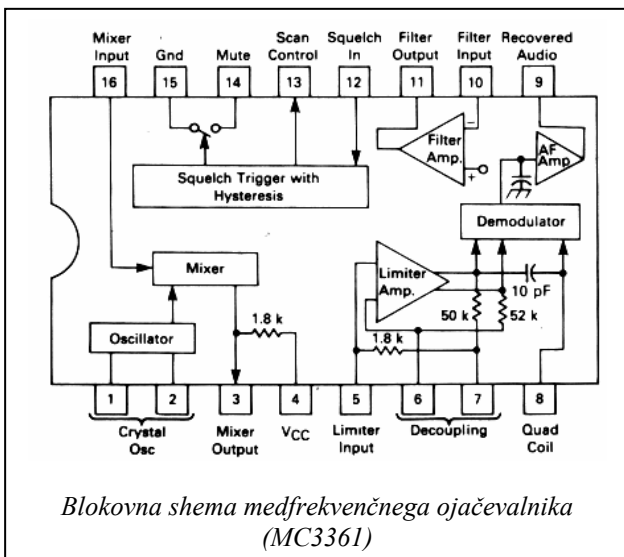
3.5 ANALIZA LINEARNIH INTEGRIRANIH VEZIJ

Primer vloge operacijskega ojačevalnika v kompleksnejšem analognem integriranem vezju



Opis vezja (študent):

Primer analize ozkopasovnega medfrekvenčnega ojačevalnika z demodulatorjem FM signala



Opis vezja (študent):