

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 vходу, temveč preko vhodnega upora in ustrezne negativne povratne vezave, ki omogoča izenačitev potenciala s potencialom na referenčnem vходу. Enosmerna napetost na invertirajočem vходу 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:

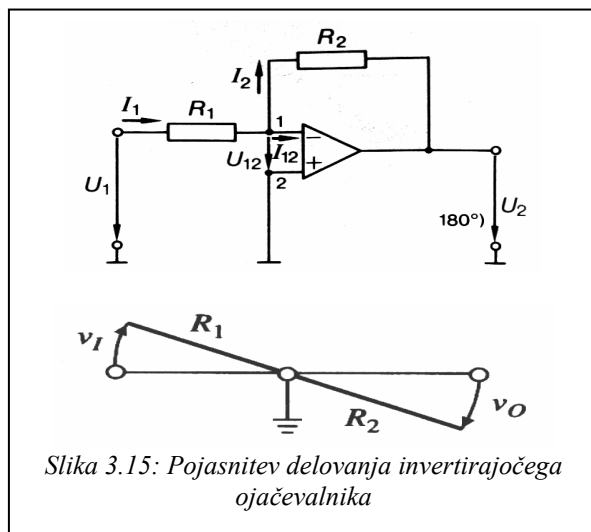
$$U_{12} = -U_2 / A_0 = 10V / 10^6 = 10\mu V$$

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

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

$$\left. \begin{matrix} I_1 = U_1 / R \\ I_2 = U_2 / R \end{matrix} \right\} \text{ zaključimo: } U_2 = -U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1} = -U_1 \cdot A$$

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



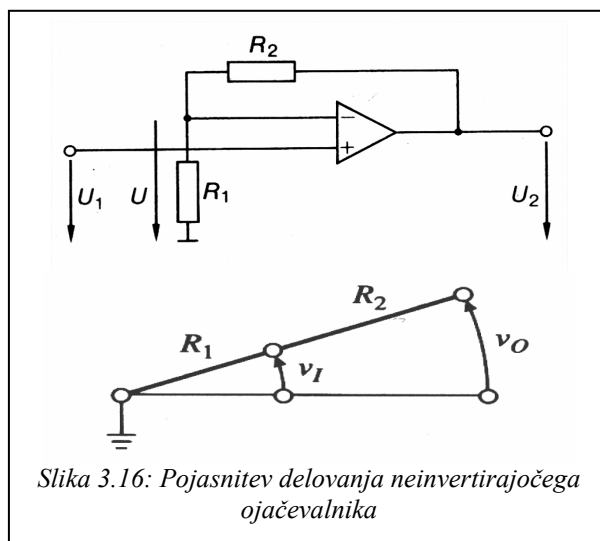
Slika 3.15: Pojasnitev delovanja invertirajočega ojačevalnika

3.3.2. NEINVERTIRAJOČI OJAČEVALNIK

V primeru, da vhodni signal krmili neinvertirani vohod 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.

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

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



Slika 3.16: Pojasnitev delovanja neinvertirajočega ojačevalnika

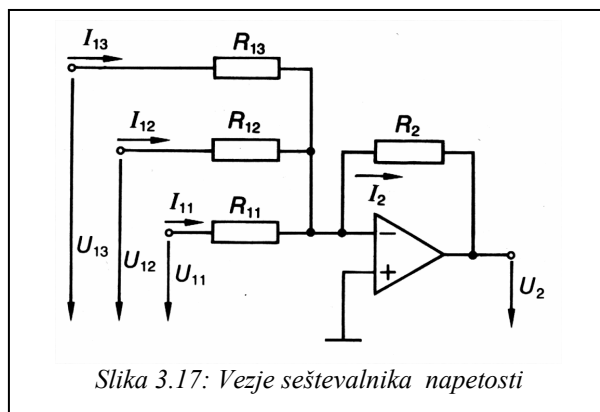
3.3.3. SEŠTEVALNIK NAPETOSTI

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 vohod) lahko zapišemo sledeče:

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

in za U_2 :

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



Slika 3.17: Vezje seštevalnika napetosti

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 odstopok. 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:

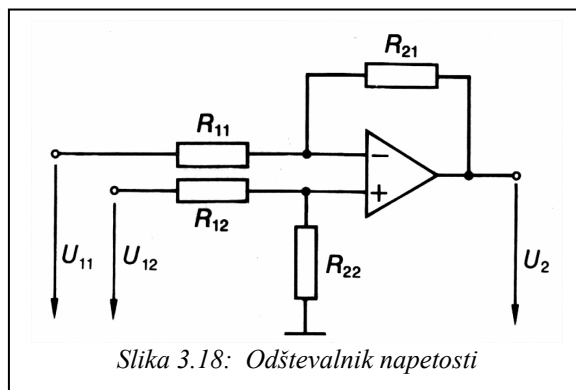
$$A_{inv.} = -\frac{R_{21}}{R_{11}}$$

neinvertirajoči del:

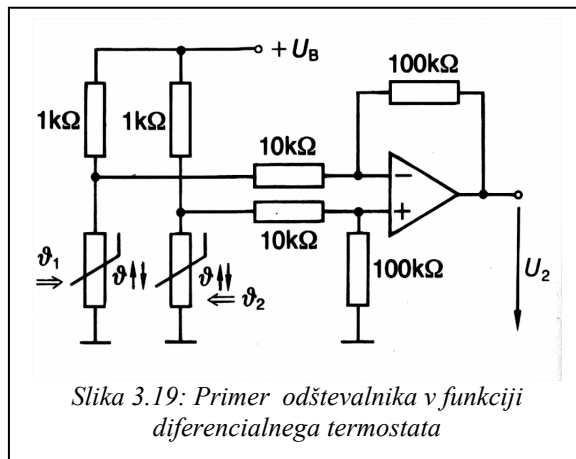
$$A_{neinv.} = \frac{R_{11} + R_{21}}{R_{11}} \cdot \frac{R_{22}}{R_{12} + R_{22}}$$

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:

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



Slika 3.18: Odštevalnik napetosti



Slika 3.19: Primer odštevalnika v funkciji diferencialnega termostata

3.3.5. INSTRUMENTACIJSKI OJAČEVALNIK

V zahtevnejših primerih uporabe kot so npr.: natančni merilni pretvorniki, zajem električnih signalov pri meritvah najrazličnejših fizikalnih veličin, medicinskih napravah,..., za ojačanje potrebujemo *instrumentacijski ojačevalnik*. Ta omogoča visoko vhodno upornost, bistveno manjši vpliv ničelne napetosti tudi pri velikem ojačanju, kar je zelo pomembno pri šibkih enosmernih signalih. Sestavimo ga lahko iz treh operacijskih ojačevalnikov (npr. TL serija, LM358,...), vendar se v praksi raje poslužujemo profesionalnih izvedb, ki so nekoliko dražje ampak imajo zagotovljene deklarirane lastnosti (npr. AD524).

Ob upoštevanju pravil za operacijski ojačevalnik, lahko napišemo izraz za tok skozi R_1 , R_G in R_2 :

$$I = U_{RG} / R_2 = (U_2 - U_1) / R_2$$

Za izhodni potencial prvih dveh operacijskih ojačevalnikov lahko zapišemo:

$$U_{izh2} = U_2 + I \cdot R_1; \quad U_{izh1} = U_1 - I \cdot R_1$$

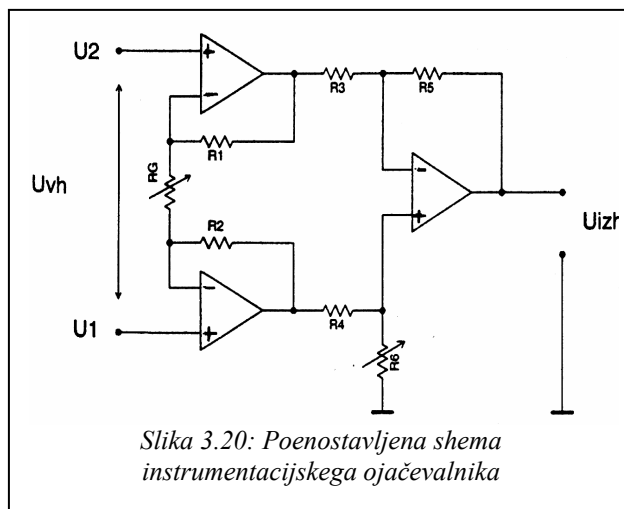
Pri odštevalniku zaradi enakovrednosti signalov izenačimo upore: $R_3=R_4$; $R_5=R_6$ in zapišemo izraz:

$$U_{izh} = (U_{izh1} - U_{izh2}) \cdot R_5 / R_3$$

$$U_{izh} = R_5 / R_3 \cdot [U_1 - U_2 - 2(U_2 - U_1) \cdot R_1 / R_G]$$

PRI IZBIRI: $R_G = 2R_1 = 2R_2$ dobimo končni izraz za izhodno napetost :

$$U_{izh} = \frac{2 \cdot R_5}{R_3} \cdot (U_1 - U_2)$$



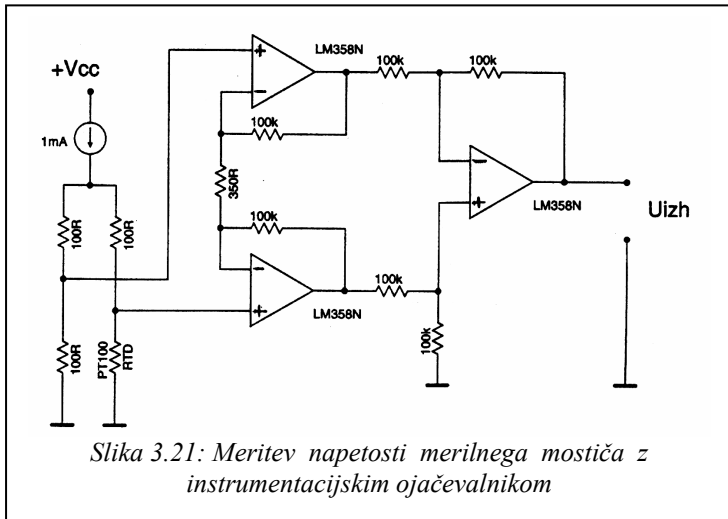
Slika 3.20: Poenostavljena shema instrumentacijskega ojačevalnika

Napajanje je večinoma simetrično, v posebnih primerih pa lahko deluje instrumentacijski ojačevalnik tudi z enojnim napajanjem, vendar je potrebno biti pozoren na nastavitve izhodiščnega potenciala.

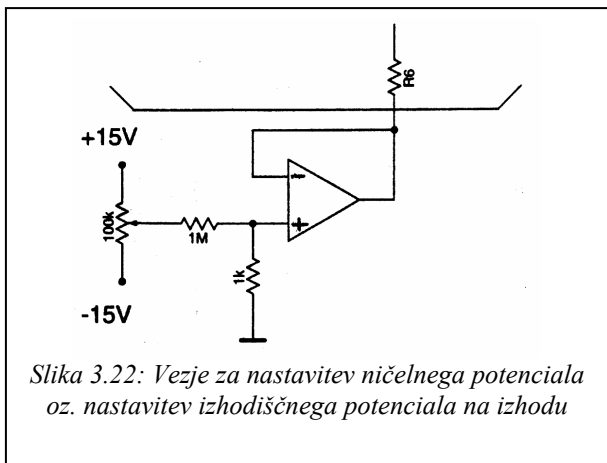
Ničelni potencial na izhodu je možno nastaviti s pomočjo upora R_6 , kateri je večinoma kombinacija fiksnega in spremenljivega upora. Za nastavitve drugačne izhodiščne napetosti na izhodu, je potrebno upor R_6 namesto na ničelni potencial, vezati na ustrezno vezje, ki omogoča drugačen referenčni pozitiven ali negativen potencial (slika 2.79).

Nasvet!

Za hitro analizo delovanja instrumentacijskega ojačevalnika, si lahko zamislite enostavne celoštevilčne vrednosti napetosti na obeh vlohodih (npr. 1V; 0,5V) in preko računanja vmesnih potencialov izračunate napetost na izhodu.



Slika 3.21: Meritev napetosti merilnega mostiča z instrumentacijskim ojačevalnikom



Slika 3.22: Vezje za nastavitve ničelnega potenciala oz. nastavitve izhodiščne napetosti na izhodu

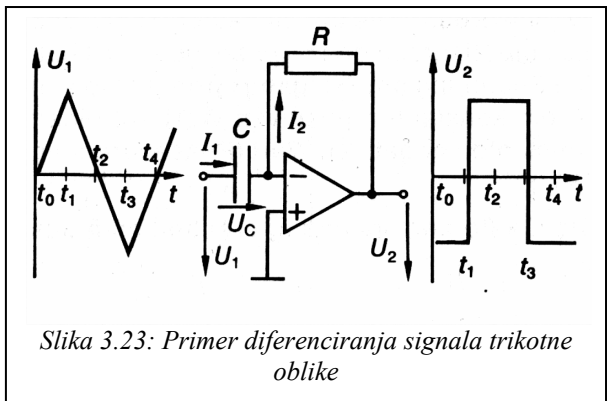
3.3.6. DIFERENCIATOR

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 navidezem 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:

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

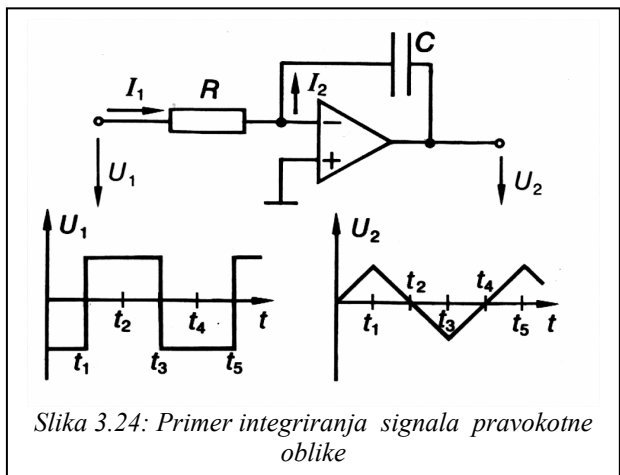


Slika 3.23: Primer diferenciranja signala trikotne oblike

3.3.7. 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.

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



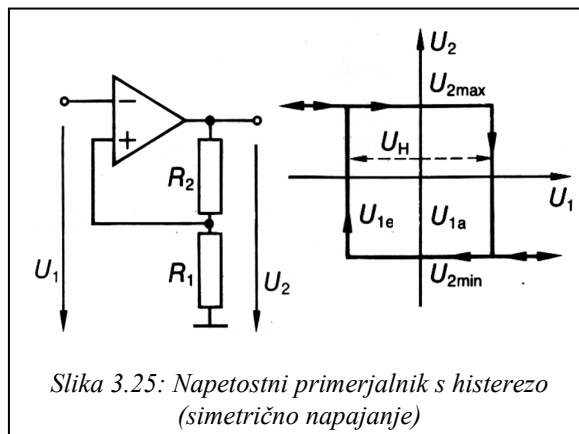
Slika 3.24: Primer integriranja signala pravokotne oblike

3.3.8. PRIMERJALNIK NAPETOSTI S HISTEREZO

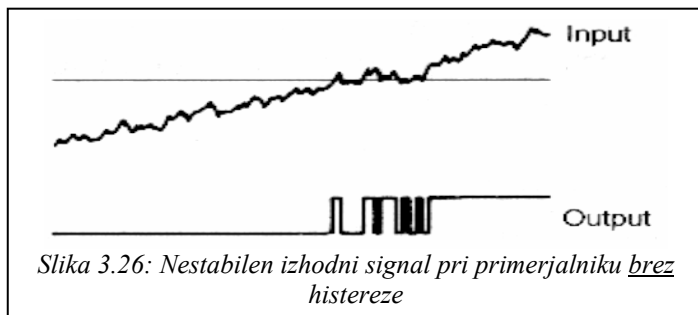
Kadar operacijski ojačevalnik nima zunanje negativne povratne vezave in je eden izmed vhodov na referenčnem potencialu deluje, kot analogni primerjalnik. Referenčna napetost je lahko na poljubnem napetostnem nivoju v okviru napajalne napetosti*.

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

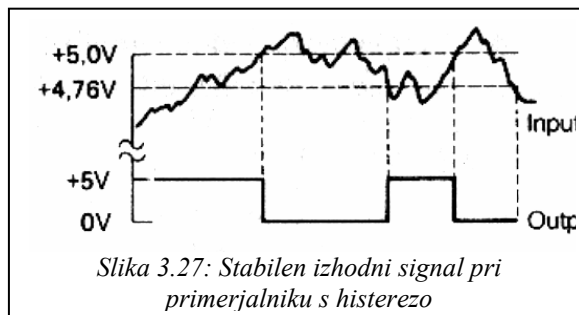
V nasprotnem slučaju zavzame izhod skrajni najnižji nivo (npr. $-U_{cc}+U_{sat}$, $0V+U_{sat}$,...).



Slika 3.25: Napetostni primerjalnik s histerezo (simetrično napajanje)



Slika 3.26: Nestabilen izhodni signal pri primerjalniku brez histereze



Slika 3.27: Stabilen izhodni signal pri primerjalniku s histerezo

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):

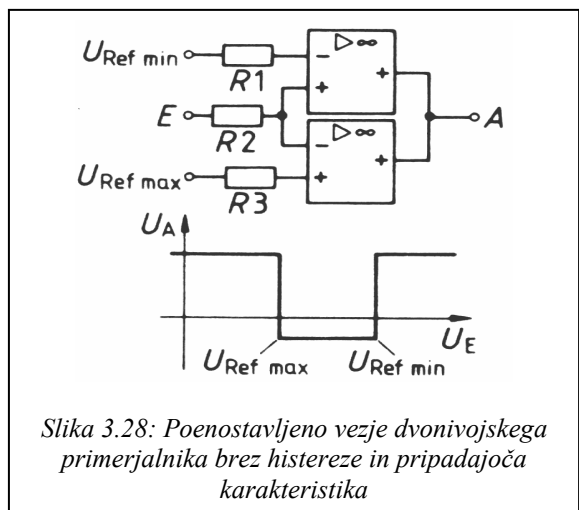
$$U_{1a} = + \frac{U_{cc} - U_{sat}}{R_1 + R_2} \cdot R_1$$

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

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.



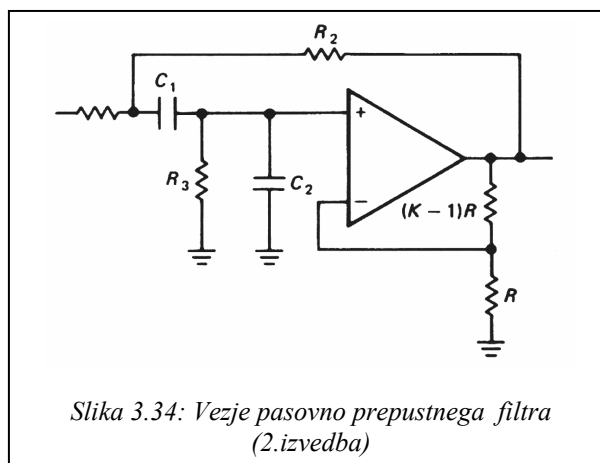
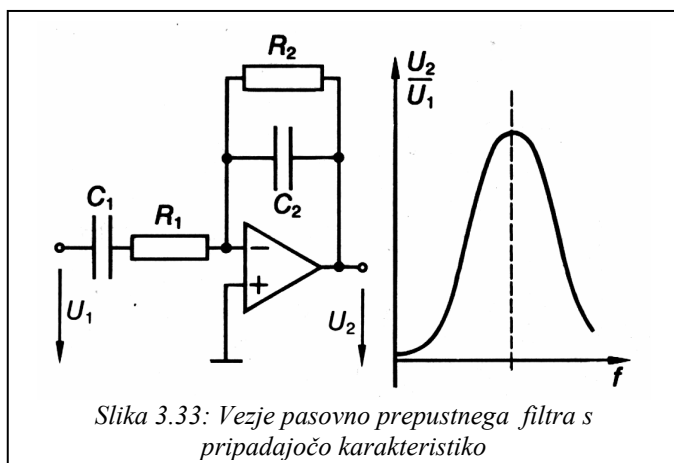
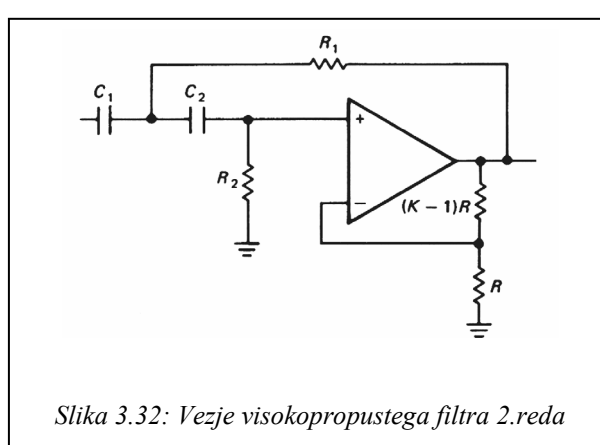
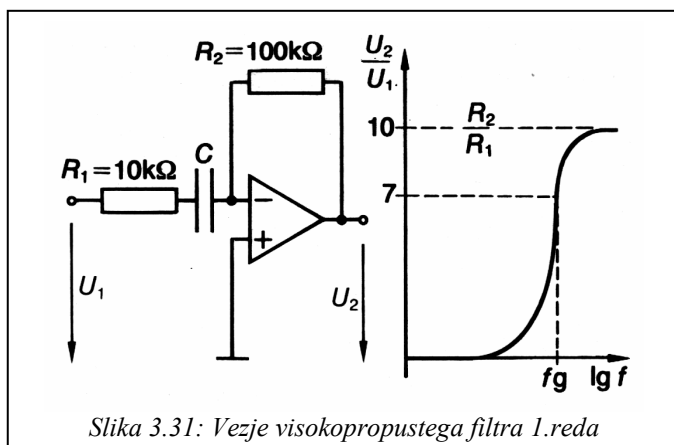
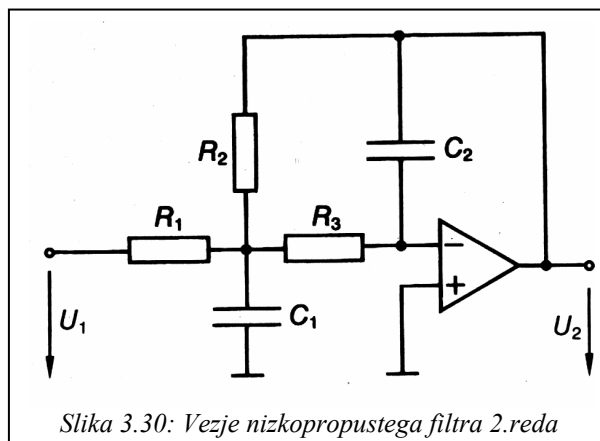
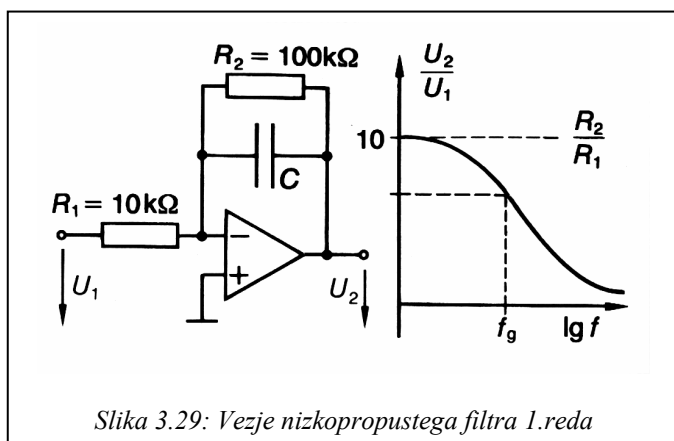
Slika 3.28: Poenostavljeno vezje dvonivojskega primerjalnika brez histereze in pripadajoča karakteristika

3.4. AKTIVNI FILTRI Z OPERACIJSKIMI OJAČEVALNIKI

3.4.1. SPLOŠNO O AKTIVNIH FILTRIH

S pomočjo frekvenčno odvisnih komponent na vhodu 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, Butterworth-ov, Chebyshev, eliptični, ...), stopnjo, ... itd.

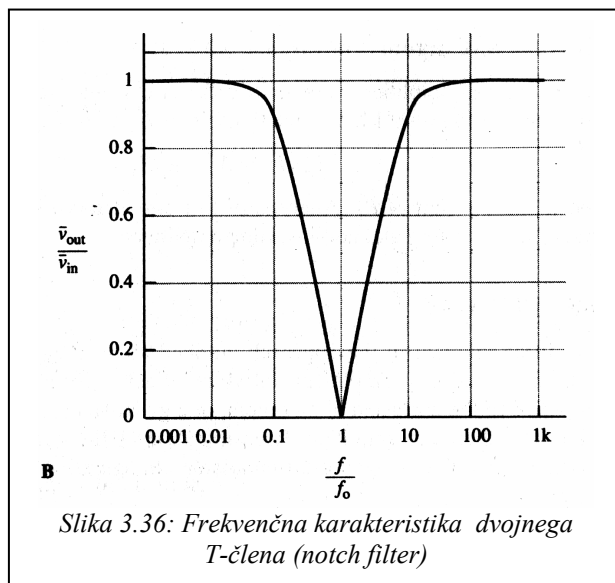
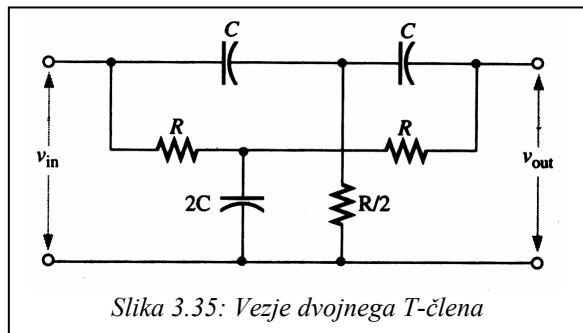
Nekaj značilnejših filtrov:



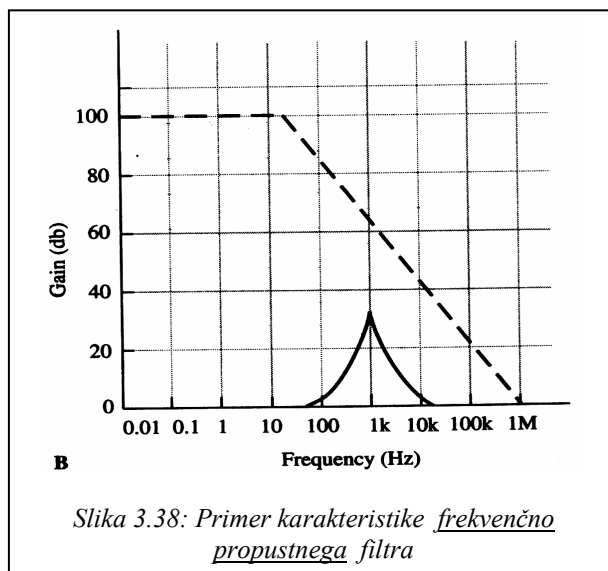
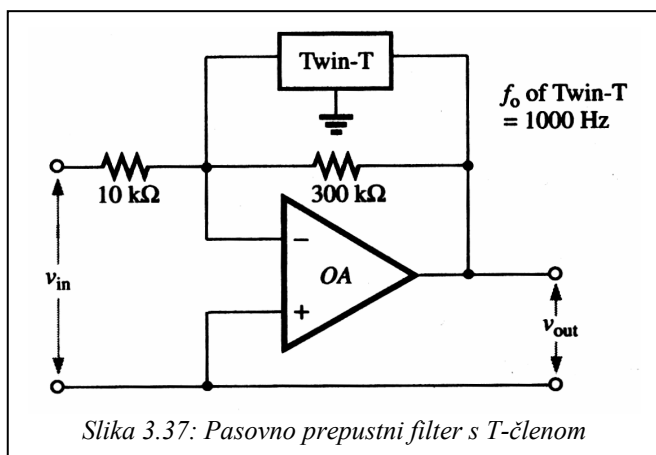
3.4.2. FILTER Z DVOJNIM T-ČLENOM

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

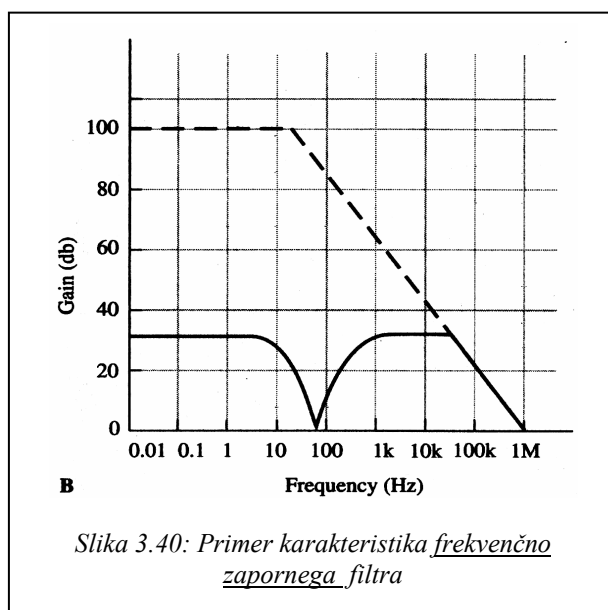
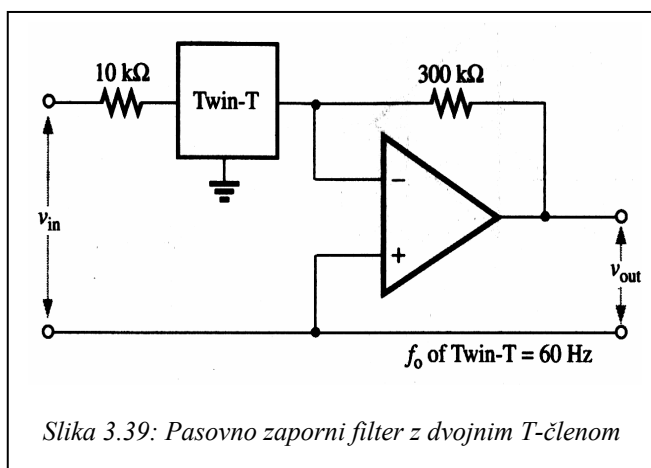
Za dvojni T-člen je značilna specifična frekvenčna karakteristika, katera omogoča izločitev izbrane frekvence, kar je pogosto potreba v elektronskih vezjih. V povezavi z operacijskim ojačevalnikom dobimo pasovno propustni oz. zaporni filter.



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



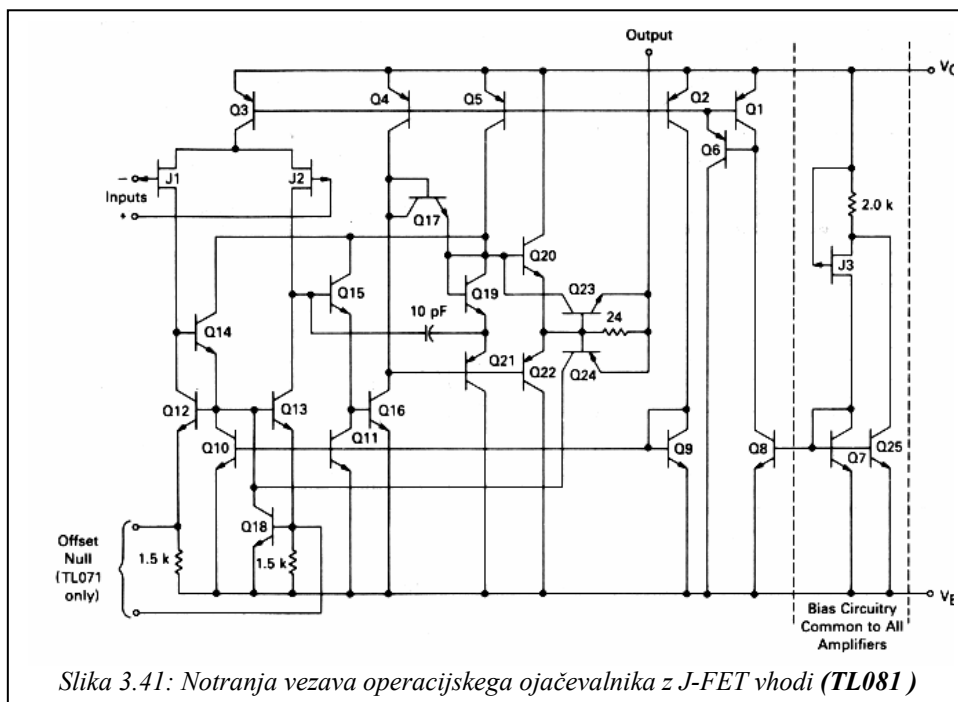
Operacijski ojačevalnik, ki ima na vходу dvojni T-člen predstavlja pasovno zaporni filter



3.5. ANALIZA LINEARNIH INTEGRIRANIH VEZIJ (primeri)

Operacijski ojačevalnik (poenostavljeno notranje vezje)

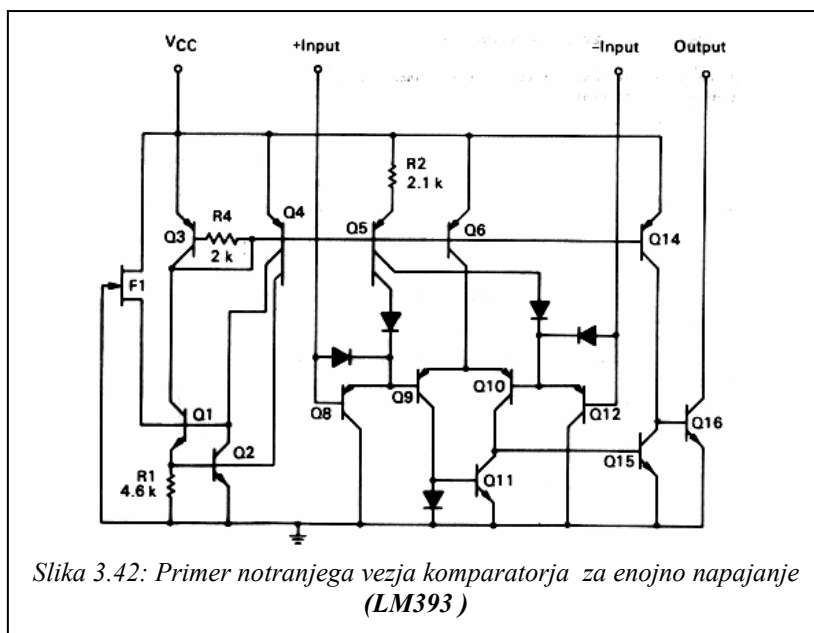
Opis vezja - študent!



Slika 3.41: Notranja vezava operacijskega ojačevalnika z J-FET vhodi (TL081)

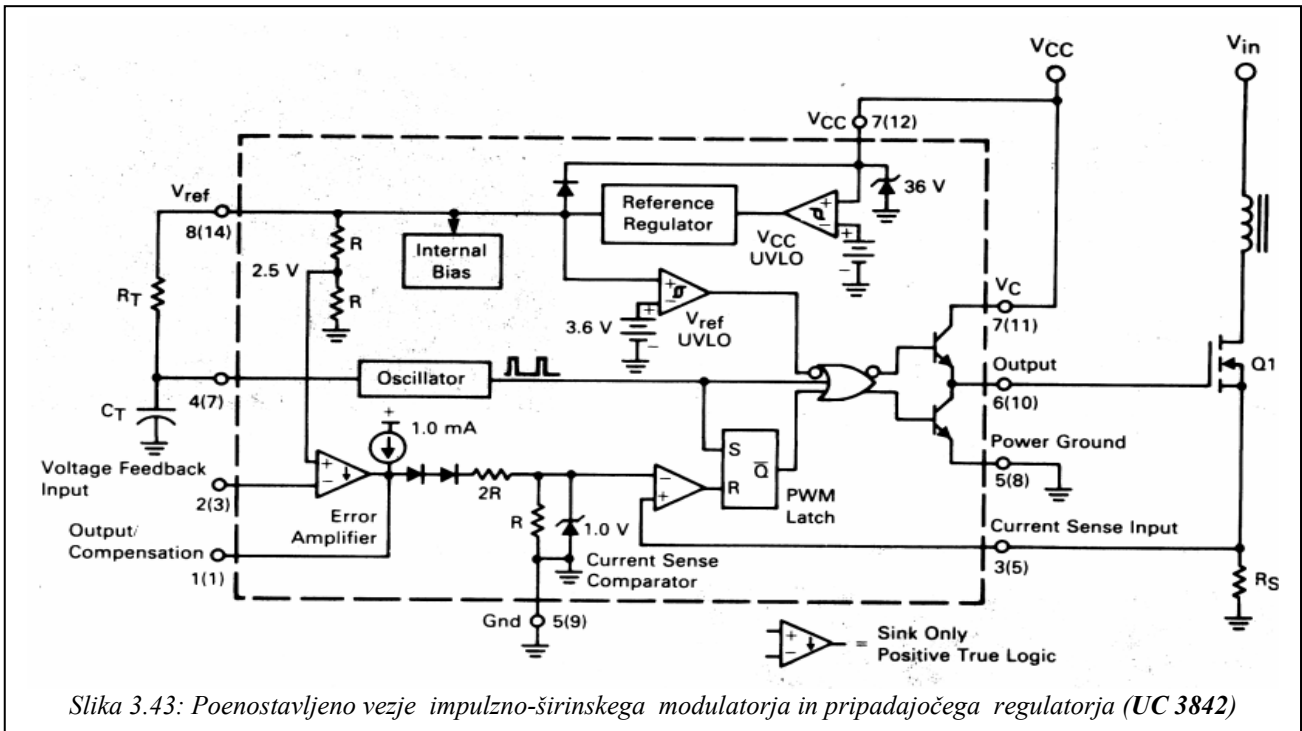
Notranje vezje operacijskega ojačevalnika - komparatorja

Opis vezja - študent!



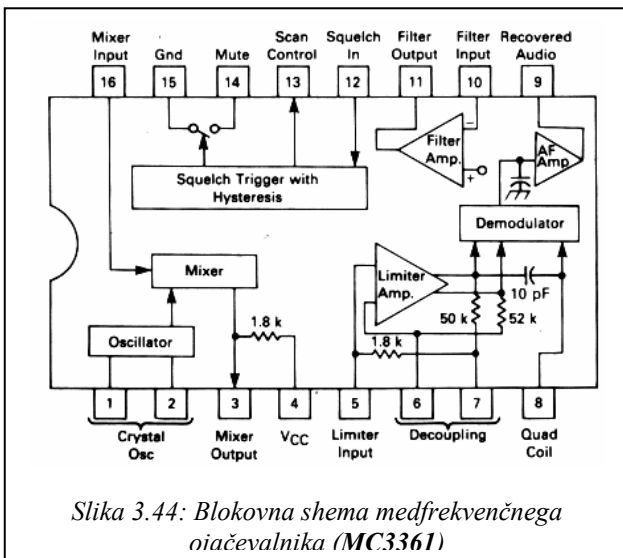
Slika 3.42: Primer notranjega vezja komparatorja za enojno napajanje (LM393)

PRILOGA 7: Vloga operacijskega ojačevalnika v kompleksnejših analognih integriranih vezjih



Opis vezja - študent!

Primer analize ozkopasovnega medfrekvenčnega ojačevalnika z demodulatorjem FM signala



Opis vezja - študent!

