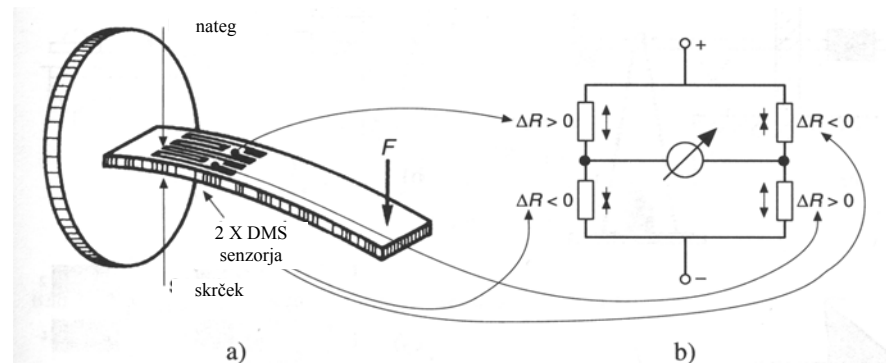


4. Operacijski ojačevalnik v vezjih merilne tehnike

4.1 Instrumentacijski ojačevalnik

V merilni tehniki uporabljamo številne senzorje, ki so namenjeni pretvorbi neelektričnih veličin v električne. Njihova splošna slabost je relativno majhna izhodna napetost (tok) in relativno velika notranja upornost, ki se poleg tega še spreminja s temperaturo.

Kot zgled si vzemimo t.i. uporovne lističe za merjenje tlaka in sile. Da zmanjšamo velik temperaturni koeficient, ki ga ima posamezen merilni listič, jih proizvajalci spojijo v vezavo uporovnega merilnega mostiča.



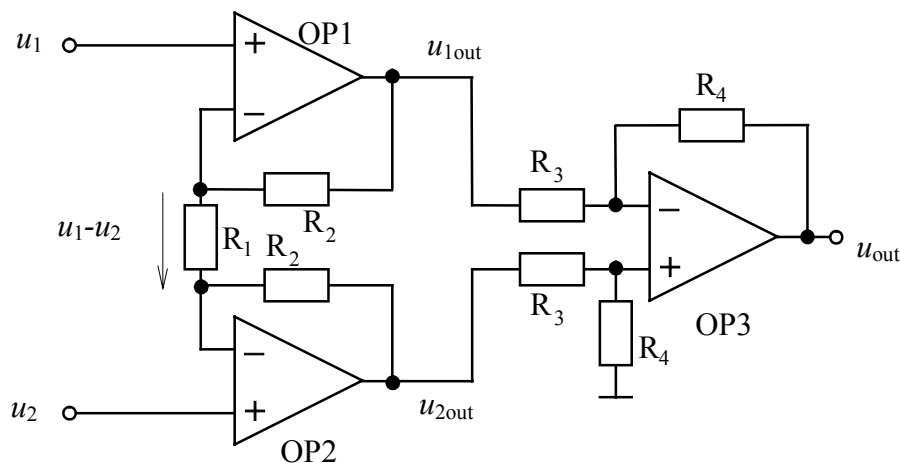
Slika:

Diagonalna napetost mostiča predstavlja izhodno napetost, ki jo moramo naknadno ojačati. Slednje lahko storimo z odštevalnim vezjem, ki pa ima tri slabosti:

- vhodni upori znižujejo vhodno upornost ojačevalnega vezja, s čimer povečamo obremenitev senzorja,
- ojačenje vezja zaradi sprememb notranje upornosti senzorja ni stabilno t.j. konstantno,
- ker je diagonalna napetost senzorja relativno majhna, moramo paziti, da sofazna napetost ($\frac{U_A + U_B}{2}$) ne povzroči prevelike napake.

Slednje slabosti so toliko izrazitejše pri visokih ojačenjih, kjer je upornost vhodnih uporov majhna. Omenimo še dejstvo, da moramo pri spremembi želenega ojačenja spremeniti upornost dveh uporov (točnost!!).

Problemu se izognemo z uporabo instrumentacijskega ojačevalnika, ki ga sestavljata dva elektrometerska ojačevalnika (OP1 in OP2) in izhodni ojačevalnik razlike (OP3).



Slika: Instrumentacijski ojačevalnik

Pri analizi vezja predpostavimo, da so vsi operacijski ojačevalniki idealni. Diferenčna napetost posameznega OP je enaka nič, zaradi česar je razlika vhodnih napetosti ($u_1 - u_2$) enaka napetosti na upor R_1 . Tok, ki teče skozi upor R_1 , teče sočasno tudi skozi oba upora R_2 tako, da je razlika izhodnih napetosti elektrometrskih ojačevalnikov

$$u_{1out} - u_{2out} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(u_1 - u_2).$$

Ta napetostna razlika se v odštevalnem vezju ojači

$$u_{out} = \frac{R_4}{R_3}(u_{1out} - u_{2out}).$$

Z združitvijo zgornjih izrazov znaša ojačenje vezja

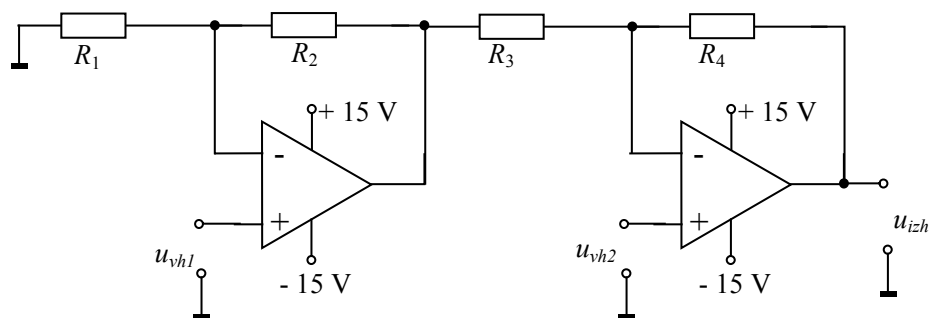
$$A = \left(1 + \frac{2 \cdot R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3}.$$

Z enostavnim miselnim eksperimentom lahko hitro ugotovimo, da se vhodna sofazna napetost v elektrometrskih ojačevalnikih ojači enako. Vendar pa kljub temu, da je sofazna napetost na obeh vhodih odštevalnega vezja enaka, je le-ta na izhodu odpravljena.

Da ohranimo odlično slabljenje sofazne napetosti, se ojačenje vezja nastavlja le z uporom R_1 . Proizvajalci ponujajo instrumentacijske ojačevalnike v obliki integriranih vezij, ki vsebujejo vse prikazane elemente vključno z uporom R_1 . Uporabniku je dopuščena možnost priključitve zunanega upora s katerim lahko spreminja tovarniško podano ojačenje.

Bistvena prednost instrumentacijskega ojačevalnika je njegovo veliko slabljenje sofazne napetosti in velika vhodna upornost. Kljub temu pa moramo paziti, da med izvorom vhodnih napetosti in maso obstoji galvanska povezava, preko katere se zaključujeta mirovna tokova (I_{b-} , I_{b+}) elektrometrskih ojačevalnikov. V nasprotnem primeru pride do nasičenja ojačevalnika.

Podobne zakonitosti dosežemo tudi z vezjem, ki ga kaže spodnja slika.

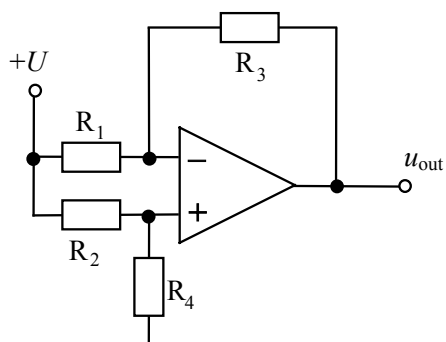


Slika: Instrumentacijski ojačevalnik z dvema operacijskima ojačevalnikoma

4.2 Merilni mostiči

Operacijski ojačevalnik je zaradi svojega diferenčnega vhoda še posebej primeren za ojačevanje diagonalne napetosti v raznih mostičnih vezjih. Dodaten razlog je tudi njegova velika vhodna upornost.

Še pogosteje srečamo mostična vezja z operacijskim ojačevalnikom, kjer upori v vezju tvorijo pravzaprav mostično vezje kot tudi povratno vez operacijskega ojačevalnika. Primer takšnega vezja kaže spodnja slika.



Slika: Merilni mostič z OP

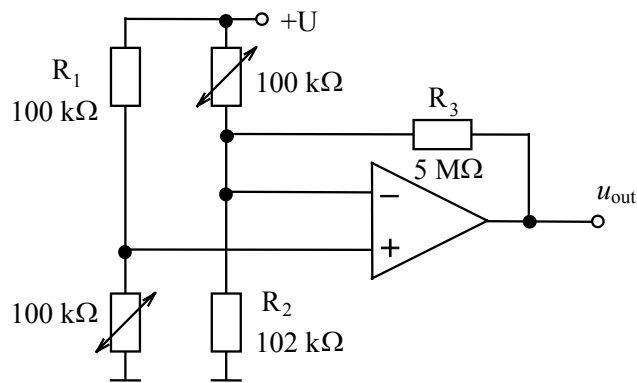
Izhodna napetost mostičnega vezja je

$$u_{out} = U \frac{R_2}{R_2 + R_4} \left(\frac{R_4}{R_2} - \frac{R_3}{R_1} \right).$$

Izraz se v primeru $R_2 = R_4$ poenostavi v

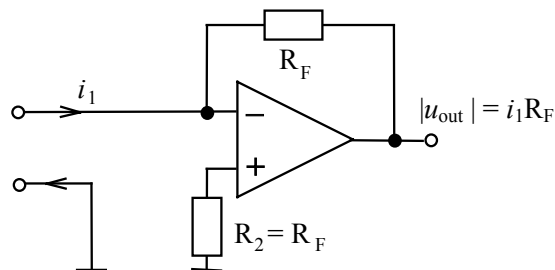
$$u_{out} = \frac{U}{2} \left(1 - \frac{R_3}{R_1} \right).$$

Vidimo, da je lahko izhodna napetost pozitivna ali negativna, pač glede na to ali je $R_1 > R_3$ ali $R_1 < R_3$. Če je $R_1 = R_3$, je izhodna napetost enaka 0 V. Če upor R_1 s konstantno upornostjo nadomestimo s temperaturno odvisnim, npr. NTK uporom, dobimo enostavno vezje merilnika temperature, kot ga kaže spodnja slika.



Slika: Enostaven merilnik temperature (pazi: $R_1 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$)

4.3 Tokovno/napetostni in napetostno/tokovni pretvorniki

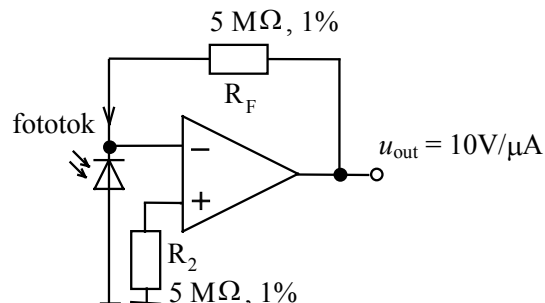


Slika: Tokovno/napetostni pretvornik
(prednost: idealni kratki stik;
uporaba: idealni ampermeter)

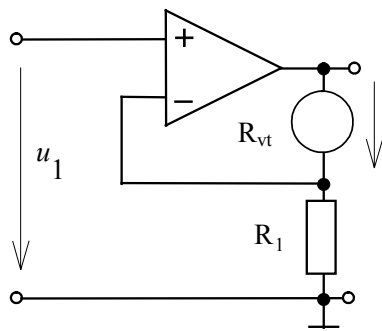
Zgornje vezje je primerno zlasti za merjenje majhnih vrednosti tokov. Temu je često primer pri različnih senzorjih fizikalnih in biokemičnih veličin, kjer je izhodni tok pogosto v območju nekaj nA do nekaj μA . Ker ležijo ti tokovi blizu območja mirovnih tokov, je uporaba operacijskih ojačevalnikov s FET vhodno stopnjo obvezna.

Praktični primer takšnega pretvornika kaže spodnja slika, ki uporablja reverzno polarizirano fotodiodo kot merilnik jakosti svetlobnega toka. Izkorišča se dejstvo, da je reverzni tok fotodiode v širokem območju proporcionalen jakosti svetlobnega toka.

Slika: Merilnik jakosti svetlobnega toka



Vezje napetostno/tokovnega pretvornika kaže spodnja slika.

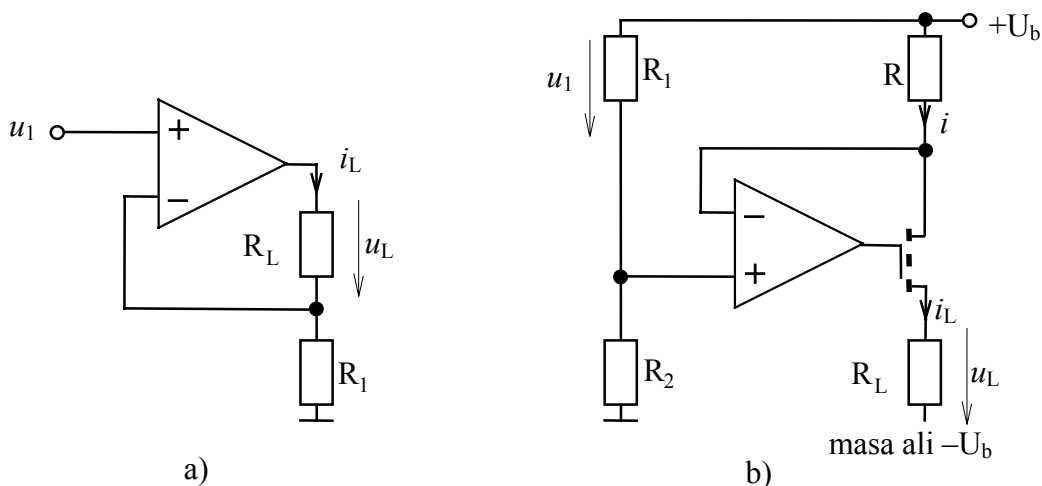


Slika: Napetostno/tokovni pretvornik (*uporaba: idealni voltmeter*)

Cilj vezja je pretvoriti vhodno napetost v proporcionalni iznos toka skozi poljubno breme. Če si za breme izberemo inštrument z vrtiljivo tuljavico (katerega odklon je prenosorazmeren srednji vrednosti toka), potem bo v konkretnem primeru odklon inštrumenta neodvisen od njegove upornosti.

4.4 Izvori konstantnega toka

Izvori konstantnega toka so pomembna vezja, ki jih najbolj pogosto najdemo npr. v merilnikih ohmske upornosti in napetostno-tokovnih pretvornikih (pretvorba merilnih signalov na izhodu raznih senzorjev). Vir konstantnega toka zgrajen s pomočjo OP temelji ne glede na izvedbo na istem principu: izhodni tok teče sočasno skozi breme in precizni merilni upor na katerem povzroči padec napetosti, ki se nato v OP primerja z neko referenčno vrednostjo. V primeru napetostnega odstopanja je OP krmiljen tako, da spremeni napetostno tokovne razmere v vezju v smeri zmanjšanja napetostnega odstopanja. Operacijski ojačevalnik uporabljamo pravzaprav v funkciji napetostno reguliranega tokovnega vira. Dve osnovni vezji tokovnega vira kaže spodnja slika.



Slika: a) Izvor konstantnega toka z OP kot napetostno krmiljenim tokovnim virom
b) izboljšana vezija z ozemljenim bremenom

Pri tokovnem izvoru s slike a sledi neposredno

$$i_L = \frac{u_1}{R_1},$$

saj velja enakost $u_1 = u_+ = u_-$ in $u_1 = i_L R_1$.

Prednost omenjene vezave je, da krmilni napetostni vir ni obremenjen, saj smo predpostavili, da je tok neinvertirajočega vhoda enak nič. Kljub temu pa ne smemo prezreti glavne pomanjkljivosti t.j. omejitve generiranega toka, ki je posledica omejene tokovne sposobnosti izhodne ojačevalne stopnje OP-ja. Dodatna pomanjkljivost je zahteva po t.i. lebdečem bremu, kajti nobena priključna sponka brema ne sme biti vezana na maso.

Zgoraj omenjene pomanjkljivosti so uspešno odpravljene v tokovnem izvoru, ki ga kaže slika b. Razvidno je, da sta breme in precizijski merilni upor tu ločena (se ne nahajata v skupnem tokokrogu), opazimo tudi da je breme ozemljeno ali pa ga lahko celo vežemo na poljubno negativno napetost. Majhni tokovni obremenitvi OP-ja se izognemo z uporabo napetostno krmiljenega MOSFET tranzistorja, skozi katerega teče bistveno večji tok, poleg tega pa je lahko slednji priključen tudi na večjo napajalno napetost (večja napetost na bremenu).

Namesto MOSFET tranzistorja lahko uporabimo seveda tudi PNP tranzistor vendar pa se tedaj tokova i in i_L razlikujeta. Če predpostavimo uporabo MOSFET tranzistorja, tedaj velja

$$U_b \frac{R_2}{R_1 + R_2} = U_b - i \cdot R$$

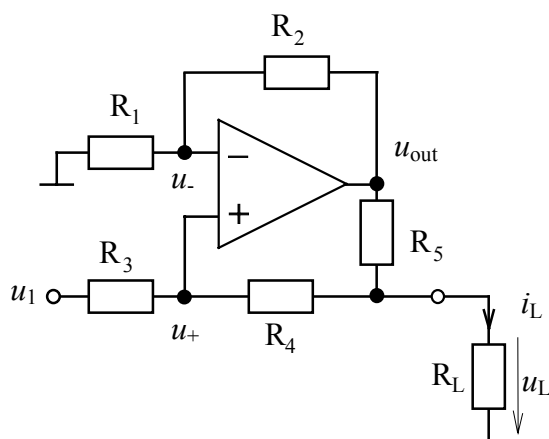
oziroma

$$i = \frac{U_b}{R} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{u_1}{R},$$

ki je enak bremenskemu toku i_L . Iz zgornje enačbe je razvidno, da lahko vrednost toka spreminjamo enostavno s spreminjanjem upornosti R_1 in R_2 . Razvidna je tudi občutljivost generiranega toka v odvisnosti od napajalne napetosti U_b , ki pa jo lahko enostavno zmanjšamo, če namesto upora R_1 vgradimo primerno Zener diodo.

Omenimo še dejstvo, da parametri tranzistorja (tokovno ojačenje, napetost vrat..) nimajo bistvenega vpliva na delovanje vezja, zaradi česar je generirani tok tudi temperaturno izredno stabilen.

Bipolarni tokovni izvor



Slika: Bipolarni tokovni izvor z ozemljenim bremenom

Vrednost generiranega toka določimo iz tokovnih ravnotežnih enačb za invertirajoč in neinvertirajoč vhod

$$\frac{u_1 - u_+}{R_3} + \frac{u_L - u_+}{R_4} = 0 \quad \text{in} \quad \frac{u_{out} - U_L}{R_5} + \frac{u_1 - u_L}{R_3 + R_4} = i_L.$$

Velja tudi enakost

$$u_{out} = u_+ \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right).$$

Če v zgornjih enačbah eliminiramo u_+ in u_{out} , dobimo

$$i_L = u_1 \frac{R_1 R_4 + R_1 R_5 + R_2 R_4}{R_1 R_5 (R_3 + R_4)} - u_L \frac{R_1 R_4 + R_1 R_5 - R_2 R_3}{R_1 R_5 (R_3 + R_4)}.$$

Iz enačbe je razvidno, da bo generirani tok konstanten in neodvisen od bremenske napetosti u_L le ob vrednosti nič imenovalca v drugem členu enačbe.

Slednje zagotovimo s primerno izbranimi upornostmi $R_3 = R_1$ in $R_2 = R_4 + R_5$, tako da je bremenski tok enak

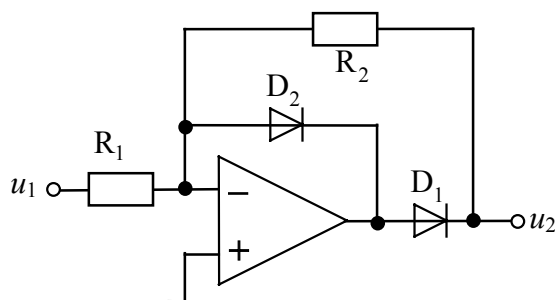
$$i_L = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{u_1}{R_5}.$$

Kot je razvidno, je polariteta bremenskega toka enaka polariteti krmilnega vira u_1 , ki pa je za razliko od vira na sliki a (zgoraj) tokovno obremenjen. Njegovo obremenitev zmanjšamo s primerno velikim uporom R_3 .

4.5. Precizijski usmernik in merilnik efektivne vrednosti

Usmerjanje napetostnih signalov majhnih vrednosti je neločljivo povezano z znatnim popačenjem, ki je posledica končno velikega padca napetosti v prevodnem stanju diode ter njene nelinearnosti, ki je toliko bolj izrazita čim manjši je diodni tok. Z usmerniki, ki so zgrajeni s pomočjo operacijskih ojačevalnikov, se zgornjim pomanjkljivostim skoraj v popolnosti izognemo. Izognemu pa se tudi izrazitim spremembam diodnih lastnosti v odvisnosti od temperature.

Najosnovnejše vezje enopolznega precizijskega usmernika z OP kaže slika 1.



Slika 1: Idealni enopolzni precizijski usmernik

Pri pozitivni vhodni napetosti u_1 je dioda D_2 prevodno polarizirana zaradi česar je izhod OP-ja kratko vezan z invertirajočim vhodom. Ker je vhodni tok invertirajočega vhoda enak nič in ker se invertirajoč vhod nahaja na potencialu virtualne mase, je izhodna napetost operacijskega ojačevalnika negativna in enaka padcu napetosti na diodi D_2 . Ta negativna

napetost polarizira diodo D_1 v reverzni smeri zaradi česar lahko trdimo, da skozi upor R_2 tok ne teče, oziroma da je izhodna napetost u_2 enaka nič (kljub končno velikemu padcu napetosti na diodi!).

Če je vhodna napetost negativna, bo izhod operacijskega ojačevalnika težil k neki pozitivni napetosti, zaradi česar je dioda D_2 reverzno polarizirana. Medtem je dioda D_1 prevodno polarizirana, zato skozi in upor R_2 teče tok proti virtualni masi (invertirajočem vhodu), ki je enak toku skozi upor R_1 . V tem primeru torej velja

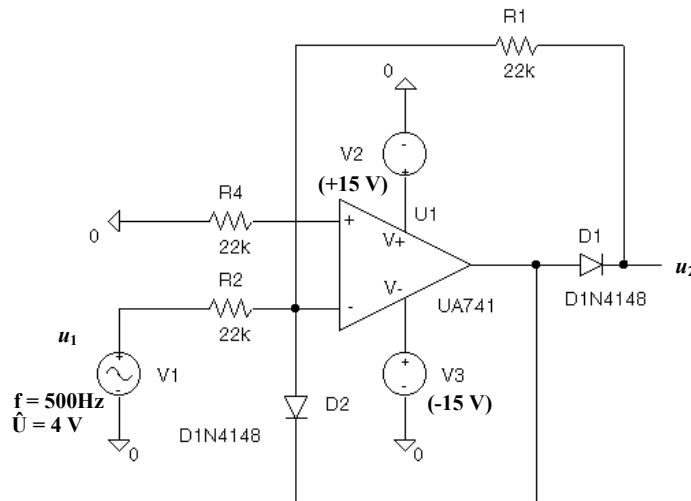
$$u_2 = -\frac{R_2}{R_1} u_1$$

oziroma, če je $R_1 = R_2$,

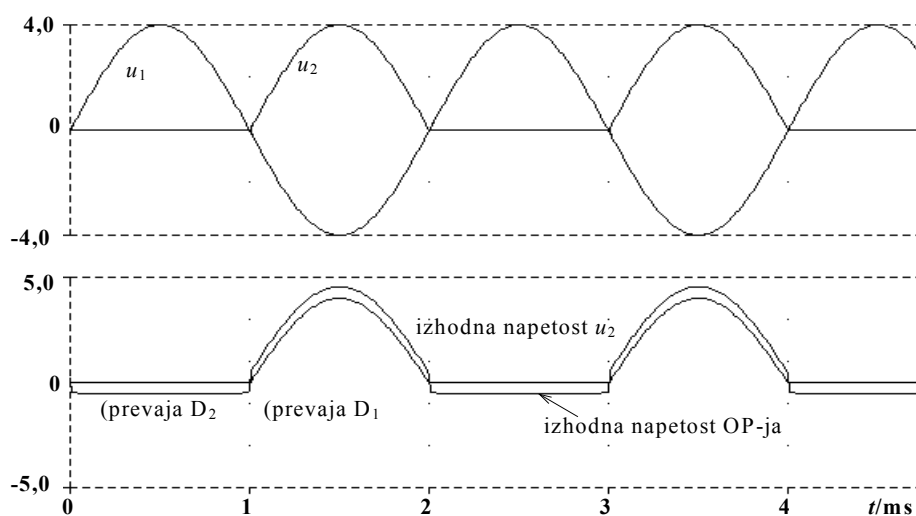
$$u_2 = -u_1.$$

Zopet vidimo, da je izhodna napetost u_2 neodvisna od končno velikega padca napetosti na diodi D_1 . Vidimo tudi, da se polariteta izhodne napetosti razlikuje od vhodne, kar pa lahko hitro spremenimo, če priključni sponki obeh diod zamenjamo.

Oglejmo si delovanje vezja še s pomočjo simulacijskih rezultatov dobljenih s programskim paketom PSPICE.

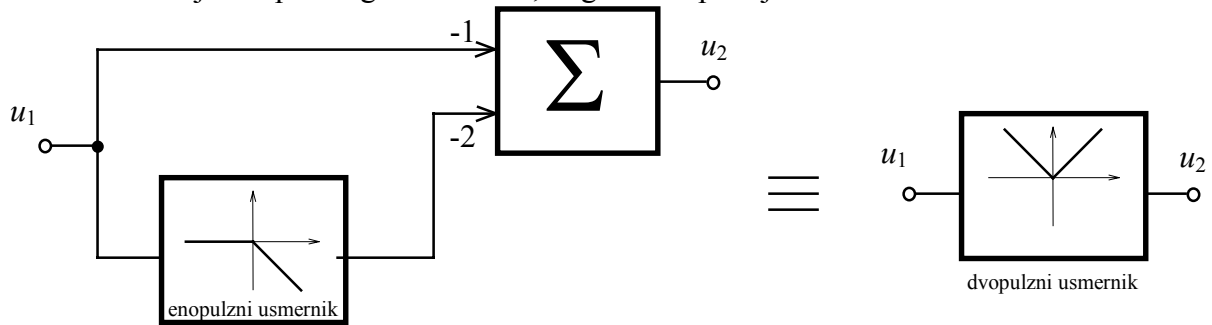


Slika 2: Simulacijski model enopolznega usmernika z μA 741 v PSPICE programu

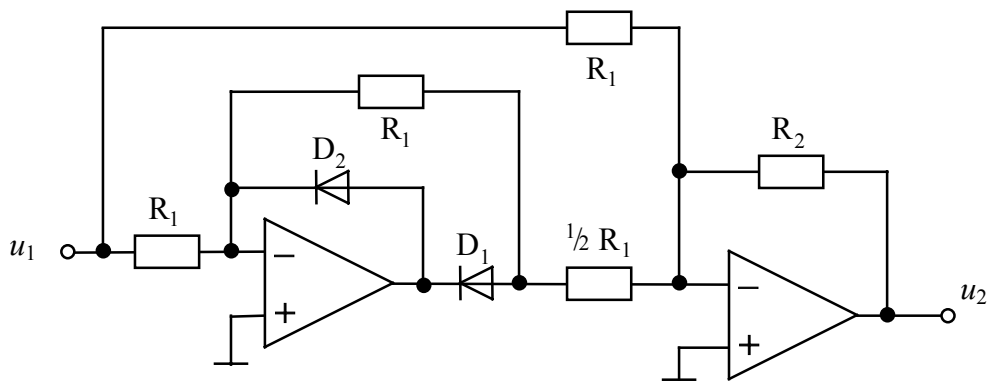


Slika 3: Simulacijski poteki

Dvopolzni precizijski usmernik lahko sestavimo iz dveh enopolznih s pozitivno in negativno izhodno napetostjo, ki ju nato seštejemo s seštevalnim vezjem. Obstaja pa tudi enostavnejši način realizacije dvopolznega usmernika, ki ga kaže spodnja blokovna shema.



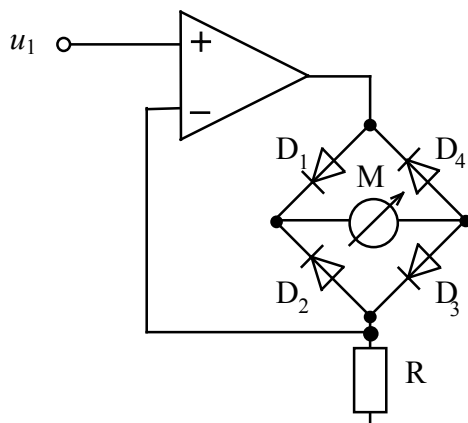
Slika 4: Princip dvopolznega precizijskega usmernika



Slika 5: Električna shema dvopolznega usmernika

Iz slika 5 je razvidno, da je izhodni signal iz enopolznega usmernika upoštevan z dvakrat večjo utežjo kot vhodni signal u_1 . Upornost R_2 je lahko enaka upornosti R_1 ali pač večja, če želimo večje ojačevalno razmerje med usmerjeno izhodno in vhodno napetostjo.

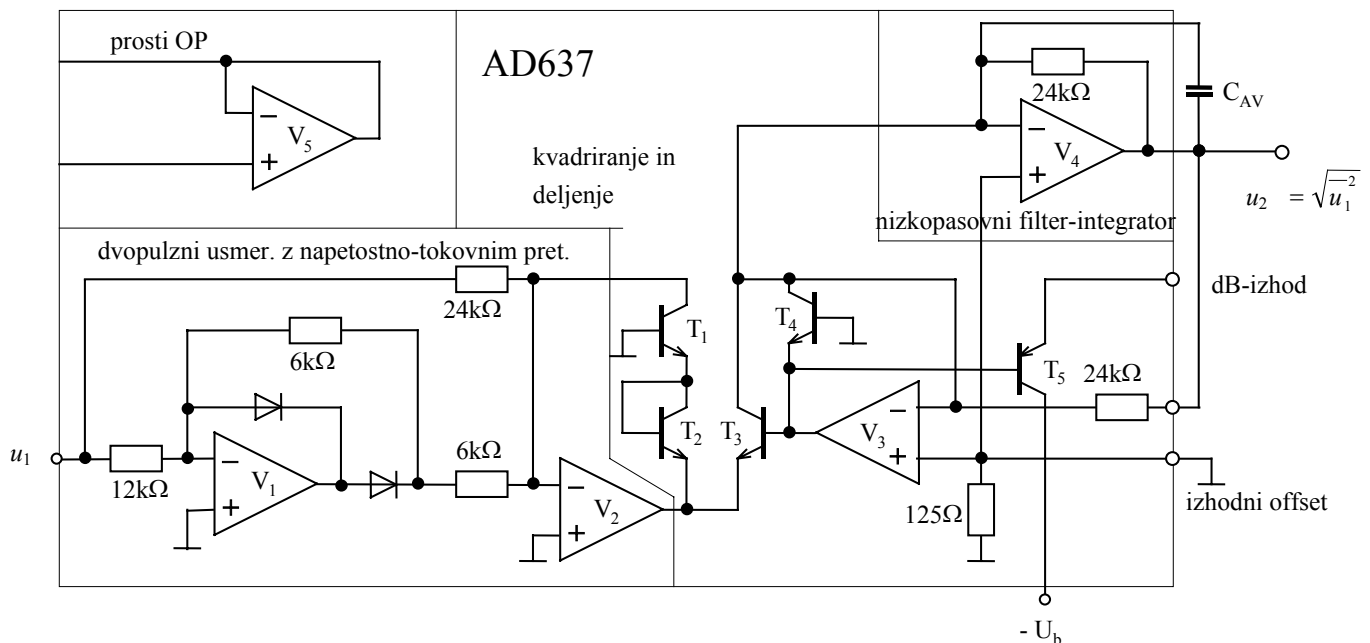
Dvopolzni usmernik pa lahko zgradimo tudi z Greatzovim diodnim stavkom, kot ga pogosto uporabljamo v močnostni elektroniki v raznih napajalnih enotah. Shemo takšnega precizijskega usmernika kaže spodnja slika 6, kjer je v vlogi bremena uporabljen instrument z vrtljivo tuljavico.



Slika 6: Merilnik usmerjene srednje vrednosti

Operacijski ojačevalnik vrine v zgornjem vezju skozi diodni mostič in upor R tok, ki teče skozi merilni instrument vedno v isti smeri in je proporcionalen $|u_1|/R$. Iz izraza zopet vidimo, da vsi vplivi zaradi nelinearnih lastnosti diode in merilnika ne vplivajo na tok skozi merilni instrument. Pri pozitivni vhodni napetosti teče tok skozi D_1 , M , D_3 in R , medtem ko v primeru negativne vhodne napetosti teče tok skozi R , D_2 , M in D_4 .

Zgornje vezje lahko služi tudi kot merilnik efektivne vrednosti vhodne napetosti, vendar iz osnov vemo, da lahko to storimo le za določeno obliko vhodnega signala, za katero poznamo razmerje med efektivno in usmerjeno srednjo vrednostjo. Naprednejšo različico merilnika efektivne napetosti kaže slika _, ki podaja shemo integriranega vezja AD 637, katerega osnovo tvori dvopolzni precizijski usmernik s slika 5.



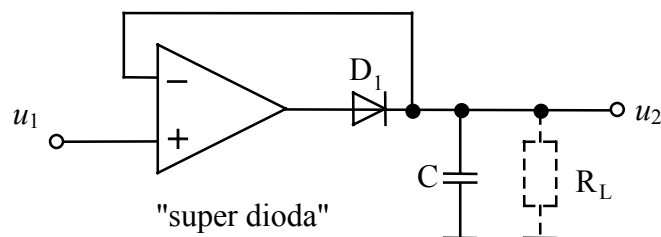
Slika 7: Širokopasovni merilnik efektivne napetosti

Pomembnejši podatki integriranega vezja:

- maksimalno 0,02 % nelinearnosti pri razponu vhodne napetosti od 0 do 2 V,
- maksimalni pogrešek 0,10 % pri faktorju oblike 3,
- pasovna širina 8 MHz pri 2 V vhodne napetosti, 600 kHz pri 100 mV.

4.6 Merilnik temenske vrednosti

Kot smo spoznali že pri analizi usmerniških vezij z operacijskim ojačevalnikom, zagotavlja kombinacija diode in operacijskega ojačevalnika realizacijo vezij, kjer se diode obnašajo kot da bi bile idealne. Omenjeno dejstvo s pridom izkoristimo tudi v merilniku temenske vrednosti, ki ga sestavlja idealna “super dioda” in kondenzator.

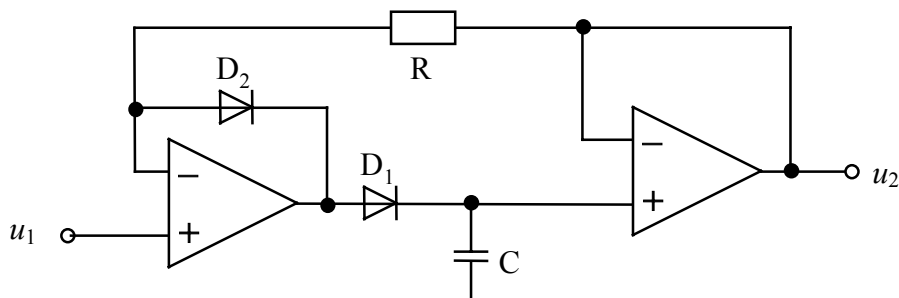


Slika 8: Merilnik temenske vrednosti

Prikazana vezava diode in operacijskega ojačevalnika se pri pozitivni vhodni napetosti, ko je dioda D_1 prevodno polarizirana, obnaša kot "super dioda" brez kolenske napetosti in z linearno napetostno-tokovno odvisnostjo.

Če je vhodna napetost večja od trenutne izhodne napetosti, tedaj je dioda D_1 prevodna in OP generira izhodni tok, ki polni kondenzator. Omenjeni postopek traja vse dokler se izhodna napetost ne izenači z vhodno. V primeru, ko se vhodna napetost zmanjša, tako da velja $u_1 < u_2$, tedaj izhodna napetost operacijskega ojačevalnika preide v negativno nasičenje, zaradi česar postane dioda D_1 reverzno polarizirana.

Kljub temu pa napetost na kondenzatorju ni konstantna, saj se vsak kondenzator zaradi prečnega toka počasi prazni. Praznjenje je toliko izraziteje, če je kondenzatorju paralelno priključeno breme (naprava - instrument za izmero temenske napetosti). Če želimo, da bo kondenzator zadržal informacijo o temenski vrednosti dlje časa uporabimo vezje na slika 9, kjer sta kondenzator in breme ločena z impedančnim prilagodilnikom.



Slika 9: Izboljšano vezje merilnika temenske vrednosti

Slednje je zagotovljeno z drugim operacijskim ojačevalnikom, ki dela kot napetostni sledilnik.

Dodana je tudi dioda D_2 , ki onemogoča, da bi izhod prvega OP-ja prešel v negativno nasičenje. Ta ukrep je pogosto nujen, saj bi bilo sicer zaradi končne dinamike prvega OP-ja polnjenje kondenzatorja zakasnjeno. Z diodo D_2 je negativna vrednost na izhodu prvega OP-ja omejena na $u_1 - 0,6V$.