

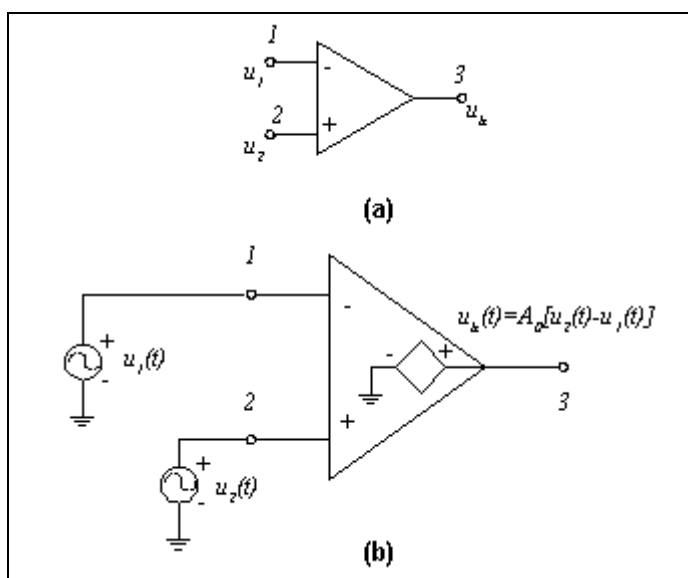
OPERACIJSKA POJAČALA

(materijali sa FPZ-a) *edited by Sruk*

3.0 Uvod

Primjena suvremene tehnologije izvedbe elektroničkih sklopova u vidu integriranih krugova, proizvodnja pojačala na čipu, konstruktorima pruža mogućnost projektiranja sklopova univerzalne primjene. Pojačala se nazivaju operacionim pojačalima. Povezivanjem operacionog pojačala s pasivnim komponentama (otpornicima i kondenzatorima) moguće je sastaviti sklopove za različite namjene. Prve primjene operacionih pojačala su se odnosile na izvođenje linearnih operacija kao što su integriranje, deriviranje, zbrajanje i oduzimanje veličina kod analognih računala. Uz navedene primjene, danas se operaciona pojačala koriste kao instrumentaciona pojačala, naponsko-strujni i strujno-naponski pretvarači, naponska sljedila, aktivni filteri i mnoge druge. Operaciona pojačala se koriste i u području nelinearnih sklopova, kao što su ograničivači, komparatori, naponski regulatori, ispravljači napona i detektori, logaritamska pojačala, umnoživači i raznovrsni digitalni sklopovi.

Operaciono pojačalo je širokopojasno, istosmjerno vezano pojačalo visokog pojačanja, visoke ulazne i niske izlazne impedancije s dvije ulazne i jednom izlaznom stezaljkom. Slika 3.0-1(a) prikazuje simbol operacionog pojačala.



Slika 3.0-1 (a) Simbol operacionog pojačala i (b) nadomjesni krug operacionog pojačala idealnih karakteristika s konačnim naponskim pojačanjem

Ulazni (u_1 i u_2) i izlazni (u_{iz}) naponi su utvrđeni u odnosu na zajedničku referentnu točku (nulu), koja se radi jednostavnosti prikaza često ne crta. Predznak komponente izlaznog napona u_{iz} proizvedene ulaznim naponom u_1 suprotan je od predznaka napona u_1 . Radi toga se stezaljka 1 naziva stezaljkom invertirajućeg ulaza (-). Budući komponenta izlaznog napona u_{iz} proizvedena ulaznim naponom u_2 ne mijenja predznak, stezaljka 2 se naziva stezaljkom neinvertirajućeg ulaza (+). Nadomjesni krug operacionog pojačala idealnih karakteristika s konačnim naponskim pojačanjem prikazuje slika 3.0-1(b).

3.1 Idealno operaciono pojačalo

Idealno operaciono pojačalo ima beskonačno veliko naponsko pojačanje, beskonačnu širinu frekvencijskog pojasa, beskonačno veliku vrijednost ulazne impedancije između pojedinih ulaznih stezaljki i zajedničke točke, kao i između stezaljki 1 i 2, vrijednost izlazne impedancije jednaku nuli i ne postavlja ograničenja na dozvoljene razine napona i snaga ulaznih ili izlaznih signala. Praktično izvedena operaciona pojačala se samo približavaju svojstima idealnih. Međutim, u području niskih frekvencija ponašanje realnih operacionih pojačala je vrlo blisko ponašanju idealnih pojačala. Tako operaciona pojačala opće namjene, manjih izlaznih snaga, imaju naponska povećanja veća od 10^5 , širinu pojasa veću od 1 MHz, ulaznu impedanciju preko 1 MW, a izlaznu impedanciju manju od 100 W.

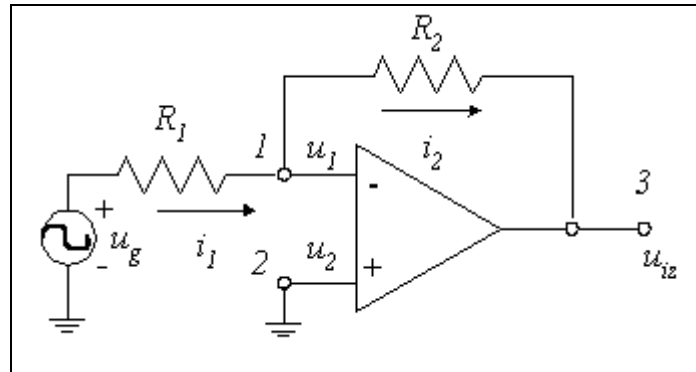
Premda se razmjerno lako shvaća postojanje velike vrijednosti širine pojasa i ulazne impedancije te male vrijednosti izlazne impedancije, teže se, čak i u slučaju idealnog pojačala shvaća pojava pojačanja beskonačno velike vrijednosti. U primjeni se operaciono pojačalo nikada ne koristi samo za sebe, već se proširuje komponentama koje se spajaju izvan pojačala od izlazne stezaljke prema ulaznim stezaljkama, tako da je ukupno pojačanje sklopa, barem dok ono ne postane beskonačno velikim stabilno, tj. nezavisno o pojačanju samog operacionog pojačala.

Kao primjer prethodno navedenog razmatraju se dva tipa operacionog pojačala, pri čemu se kod svakog tipa pretpostavljaju slučajevi konačnog i beskonačnog pojačanja, inače idealnog operacionog pojačala. Za slučaj konačnog naponskog pojačanja, označenog s A_0 , vrijedi nadomjesni krug prikazan na slici 3.0.-1(b). Izlazni napon je jednak

$$u_{\Sigma}(t) = A_0[u_2(t) - u_1(t)] \quad (3.1-1)$$

3.1.1 Invertirajuće pojačalo

Pojačalo na slici 3.1-1 mijenja (invertira) predznak ulaznog signala i naziva se invertirajuće pojačalo. Promatra se invertirajuće pojačalo s konačnim iznosom naponskog pojačanja A_0 .



Slika 3.1-1 Invertirajuće pojačalo

Kada je $A_0 < \infty$, radi uzemljenja stezaljke 2, $u_2 = 0$ i vrijedi

$$u_1 = -\frac{u_z}{A_0} \quad (3.1-2)$$

Dakle,

$$i_1 = \frac{u_g - u_1}{R_1} = \frac{u_g + (u_z / A_0)}{R_1} \quad (3.1-3)$$

$$i_2 = \frac{u_1 - u_z}{R_2} = \frac{-(u_z / A_0) - u_z}{R_2} \quad (3.1-4)$$

Budući stezaljka 1 idealnog pojačala radi beskonačno velikog iznosa ulaznog otpora ne vuče struju, slijedi $i_2 = i_1$. Dakle, izjednačavanjem izraza (3.1-3) i (3.1-4) slijedi izraz za pojačanje koji glasi

$$\frac{u_z}{u_g} = \frac{-R_2}{R_1} \frac{1}{1 + [(R_1 + R_2) / A_0 r_1]} \quad (3.1-5)$$

Ako se pak dozvoli $A_0 \rightarrow \infty$, slijedi izraz za idealno pojačanje

$$\frac{u_z}{u_g} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3.1-6)$$

što znači da se krug ponaša kao pojačalo s naponskim pojačanjem koje je nezavisno od naponskog pojačanja operacionog pojačala.

Primjer 3.1-1

Treba odrediti vrijednost pojačanja A_0 invertirajućeg operacionog pojačala za koju će pojačanje kruga zadano izrazom (3.1-5) biti unutar 1 % idealnog pojačanja zadanog izrazom (3.1-6).

Rješenje 3.1-1

Dakle, treba zadovoljiti nejednakost

$$\frac{u_x}{u_g} = \frac{1}{1 + [(1 + R_2 / R_1) / A_0]} \geq 0.99$$

Rješavajući po A_0 slijedi

$$A_0 \geq 99 \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

Kada je R_2/R_1 veće od 99, tražena vrijednost A_0 je samo 100 puta veća od R_2/R_1 . Ako je R_2/R_1 manje od 99, tražena vrijednost A_0 polagano raste. Čak i uz $R_2/R_1 = 0$, za održavanje uvjeta od 1 %, pojačanje mora biti samo 198 puta veće od R_2/R_1 . Budući je kod većine operacionih pojačala u primjeni $A_0 > 20000$, sigurno je pretpostaviti beskonačno pojačanje i kod pojačala s pojačanjem kruga jednakim 100.

Slijedi razmatranje slučaja operacionog pojačala s beskonačnim iznosom pojačanja.

Uz izlazni signal različit od nule i pojačanje $A_0 \rightarrow \infty$, vidljivo je iz slike 3.1-0(b) da napon između stezaljki 2 i 1, jednak razlici $u_2 - u_1$, mora biti jednak nuli. Dakle, općenito je $u_1 = u_2$. Za invertirajuće pojačalo na slici 3.1-1, $u_2 = 0$ pa je i $u_1 = 0$. Budući se stezaljka 1 nalazi na nultom potencijalu za nju se kaže, i premda stvarno nije uzemljena, da je prividno uzemljena. Na temelju toga izrazi za struje i_1 i i_2 glase

$$i_1 = \frac{u_g - u_1}{R_1} = \frac{u_g - 0}{R_1} = \frac{u_g}{R_1} \quad (3.1-7)$$

$$i_2 = \frac{u_1 - u_x}{R_2} = \frac{0 - u_0}{R_2} = -\frac{u_g}{R_2} \quad (3.1-8)$$

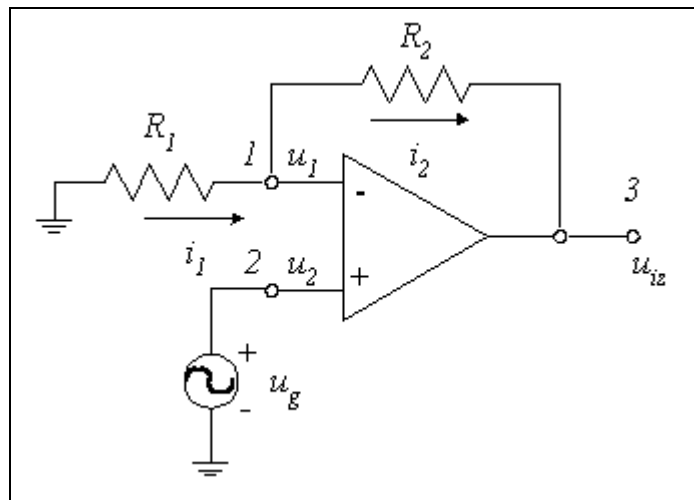
Ponovno vrijedi da operaciono pojačalo ne vuče struju, dakle $i_1 = i_2$. Izjednačavanjem dva posljednja izraza slijedi

$$\frac{u_z}{u_g} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3.1-9)$$

Zanimljivo je napomenuti da kada je $R_2 = R_1$, invertirajuće pojačalo prelazi u naponsko sljedilo s invertiranim predznakom i iznosom naponskog pojačanja jednakim jedan.

3.1.2 Neinvertirajuće pojačalo

Budući sklop pojačala na slici 3.1-2 ne mijenja (ne invertira) predznak ulaznog napona, naziva se neinvertirajuće pojačalo.



Slika 3.1-2 Neinvertirajuće pojačalo

Promatra se neinvertirajuće pojačalo s konačnim iznosom pojačanja operacionog pojačala A_0 . Napon između stezaljki 2 i 1 je jednak $u_2 - u_1 = u_{iz} / A_0$, odnosno vrijedi

$$u_1 = u_2 - \frac{u_z}{A_0} \quad (3.1-10)$$

Za iznose struja vrijede izrazi

$$i_1 = \frac{-u_1}{R_1} = \frac{-u_2}{R_1} + \frac{u_z}{A_0 R_1} \quad (3.1-11)$$

$$i_2 = \frac{u_1 - u_z}{R_2} = \frac{u_2}{R_2} - \frac{u_z}{R_2} \left(\frac{1}{A_0} + 1 \right) \quad (3.1-12)$$

Budući operaciono pojačalo ne vuče struju, $i_1 = i_2$ i izjednačavanjem izraza (3.1-11) i (3.1-12) slijedi

$$\frac{u_z}{u_g} = \frac{u_z}{u_2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 + [(R_1 + R_2) / A_0 R_1]} \quad (3.1-13)$$

Ako $A_0 \rightarrow \infty$, pojačanje je idealno

$$\frac{u_z}{u_g} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.1-14)$$

Oblici posljednja dva izraza su slični izrazima (3.1-5) i (3.1-6). Analiza koja slijedi postupak iz primjera 3.1-1 pokazuje da je vrijednost A_0 potrebna za održanje pojačanja sklopa neinvertirajućeg pojačala unutar 1 % idealnog pojačanja, 99 puta veća od vrijednosti idealnog pojačanja.

Za idealno operaciono pojačalo s beskonačnim pojačanjem, ulazni napon $u_2 - u_1$ je nula, te je $u_1 = u_2$. Analizom struja i_1 i i_2 slijedi $i_1 = i_2$. Rješavanjem izjednačenih izraza, slijedi izraz za idealno pojačanje neinvertirajućeg pojačala (3.1-14).

Ako je $R_2 = 0$ za bilo koju vrijednost R_1 različitu od nule, izraz (3.1-14) daje izraz

$$\frac{u_z}{u_g} = 1 \quad (3.1-15)$$

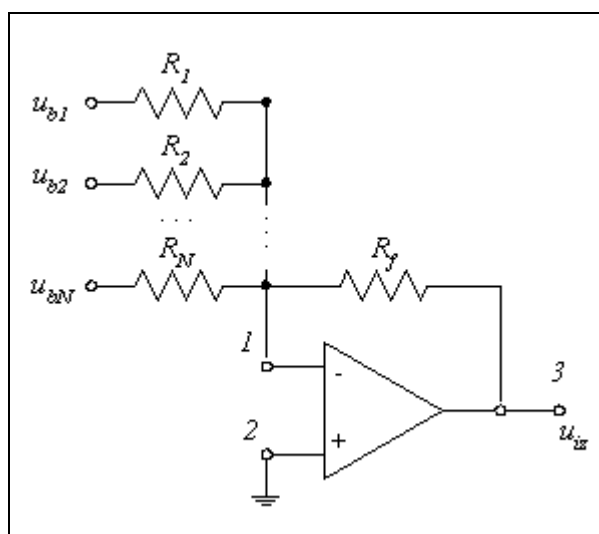
koji predstavlja pojačanje idealnog naponskog sljedila. Isti rezultat se postiže ako je $R_1 = \infty$ (prazni hod) za bilo koju konačnu vrijednost otpornika R_2 .

3.2 Primjene operacionog pojačala

Slijedi nekoliko primjera primjene operacionih pojačala. U svim primjerima se pretpostavlja idealno operaciono pojačalo.

3.2.1 Invertirajuće pojačalo sa svojstvom zbrajanja

Proširujući sklop invertirajućeg pojačala prikazanog na slici 3.1-1 dodatnim otpornim granama dobiva se sklop zbrajala slika 3.2-1.



Slika 3.2-1 Invertirajuće pojačalo sa svojstvom zbrajanja

Radi prividnog uzemljenja stezaljke 1, ukupni odziv kruga jednak je prostom zbroju pojedinih odziva, pri čemu oblik pojedinog odziva odgovara izrazu oblika (3.1-9), te ukupni odziv glasi

$$u_z = - \left(\frac{R_f}{R_1} u_{b1} + \frac{R_f}{R_2} u_{b2} + \dots + \frac{R_f}{R_N} u_{bN} \right) = - R_f \sum_{n=1}^N \frac{u_{bn}}{R_n} \quad (3.2-1)$$

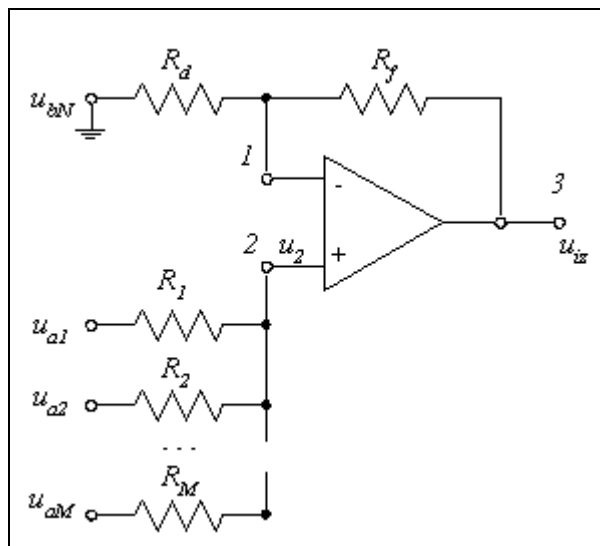
Jasno je da ako su vrijednosti svih otpornika jednake, $R_n = R_1$, za sve vrijednosti n , slijedi

$$u_z = - \frac{R_f}{R_1} \sum_{n=1}^N u_{bn} \quad (3.2-2)$$

što odgovara invertirajućem pojačalu sa svojstvom zbrajanja.

3.2.2 Neinvertirajuće zbrajalo

Poopćenjem kruga sa slike 3.1-2 prikazanim na slici 3.2-2, dobiva se neinvertirajuće pojačalo s M ulaza koje izvodi operaciju zbrajanja.



Slika 3.2-2 Neinvertirajuće pojačalo sa svojstvom zbrajanja

Može se pokazati da je izlazni napon u_z jednak

$$u_z = \left(1 + \frac{R_f}{R_d}\right) (R_1 \parallel R_2 \parallel \dots \parallel R_M) \sum_{m=1}^M \frac{u_{am}}{R_m} \quad (3.2-3)$$

pri čemu $(R_1 \parallel R_2 \parallel \dots \parallel R_M)$ predstavlja otpor svih paralelno spojenih otpornika R_1, \dots, R_M . U posebnom slučaju kada su svi otpori jednaki, tj. $R_m = R_M$, za svaki m , vrijedi

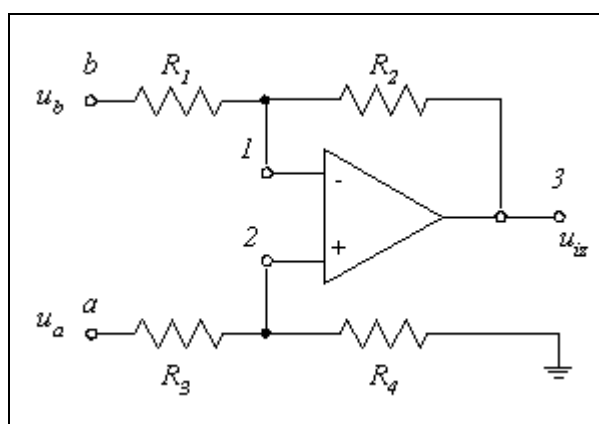
$$u_z = \left(1 + \frac{R_f}{R_d}\right) \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M u_{am} \quad (3.2-4)$$

Izraz (3.2-4) je moguće protumačiti na dva načina. Prvo, kao izraz za izlazni napon neinvertirajućeg pojačala s jednim ulazom, iznosa pojačanja $[1 + (R_f/R_d)]$, kojemu je ulazna vrijednost jednaka prosječnoj vrijednosti M ulaza. Drugo, kao izraz za izlazni

napon neinvertirajućeg pojačala s M ulaza sa svojstvom zbrajanja, pri čemu pojačanje gledano od strane svakog ulaza iznosi $[1 + (R_f/R_d)]/M$.

3.2.3 Diferencijalno pojačalo

Operaciono pojačalo povezano na način prikazan na slici 3.2-3 naziva se opterećenim pojačalom. Opterećenost pojačala se odnosi na činjenicu da izlazni napon ima oblik $u_{iz} = w_a u_a + w_b u_b$, pri čemu su težinski koeficijenti, w_a i w_b , naponska pojačanja gledana sa strane ulaza. Analiza sklopa je jednostavna. Budući se vrijednosti izlaznog i ulaznih napona nalaze u linearnom odnosu u analizi je dozvoljeno primijeniti princip superpozicije.



Slika 3.2-3 Osnovno diferencijalno pojačalo

U prvom slučaju, neka je $u_a = 0$. Uvjet se postiže uzemljenjem ulazne stezaljke grane otpora R_3 . U tom slučaju su između stezaljke 2 i zajedničke točke otpori R_3 i R_4 paralelno spojeni i potencijal stezaljke 2 je nula. Sklop promatran sa ulaza u_b , predstavlja invertirajuće pojačalo s pojačanjem $-R_2/R_1$. Budući struja ne teče u stezaljku 2, otpornici R_3 i R_4 ne djeluju na sklop, te je

$$w_b = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3.2-5)$$

U drugom slučaju, neka je $u_b = 0$, što odgovara uzemljenju ulazne stezaljke grane otpora R_1 . Sklop promatran s ulaza u_b predstavlja neinvertirajuće pojačalo pojačanja $[1 + (R_2/R_1)]$. Budući djelitelj napona sastavljen od otpornika R_3 i R_4 daje vrijednost $R_4/(R_3 + R_4)$ promatran sa stezaljke 2, izraz za w_a glasi

$$w_a = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad (3.2-6)$$

Konačno, ukupni odziv slijedi superpozicijom

$$\begin{aligned}
 u_z &= w_a u_a + w_b u_b = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_a - \frac{R_2}{R_1} u_b \\
 &= \frac{R_2}{R_1} \left[\left(\frac{1 + R_1 / R_2}{1 + R_3 / R_4} \right) u_a - u_b \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.2-7}$$

U posebnom slučaju kada je

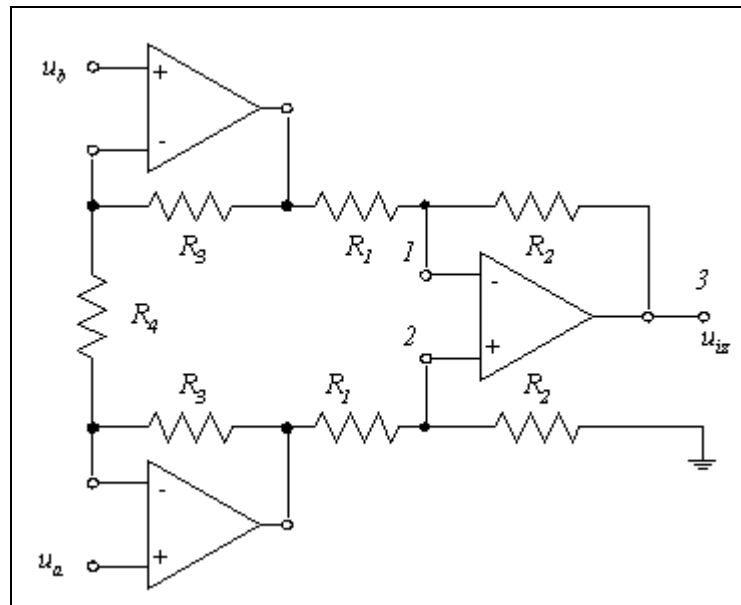
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}
 \tag{3.2-8}$$

odziv odgovara odzivu diferencijalnog pojačala

$$u_z = \frac{R_2}{R_1} (u_a - u_b)
 \tag{3.2-9}$$

Radi praktičnih razloga diferencijalno pojačalo se obično izvodi s $R_3 = R_1$ i $R_4 = R_2$.

U slučaju velikog iznosa pojačanja diferencijalnog pojačala ulazni otpor je mali, što dovodi do male vrijednosti R_1 . Nepovoljan utjecaj velikih i nejednakih iznosa unutarnjih otpora izvora u_a i u_b smanjuje se postavljanjem visokog ulaznog otpora neinvertirajućeg pojačala, slika 3.2-4.



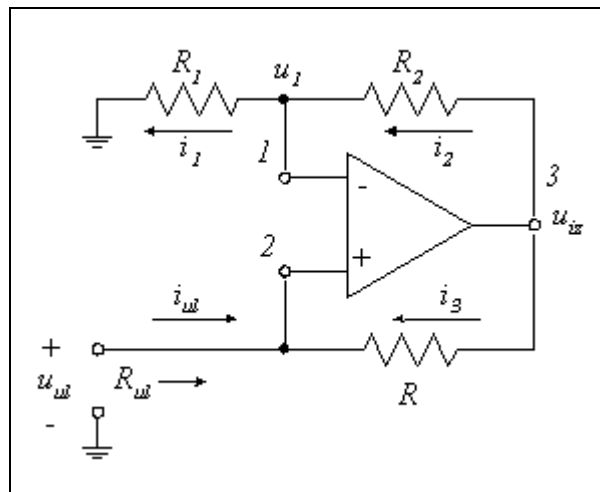
Slika 3.2-4 Diferencijalno pojačalo

U tom slučaju odziv glasi

$$u_z = \left(1 + \frac{2R_3}{R_4}\right) \frac{R_2}{R_1} (u_a - u_b) \quad (3.2-10)$$

3.2.4 Pretvarač negativne impedancije

Operaciono pojačalo prikazano na slici 3.2-5, ima negativan ulazni otpor R_{ul} . U općem slučaju ako je umjesto otpornika R spojena impedancija Z , sklop ima negativnu impedanciju, zbog koje se naziva pretvaračem negativne impedancije.



Slika 3.2-5 Pretvarač negativnog otpora

Budući između stezaljki 1 i 2 postoji prividni kratki spoj, vrijedi

$u_1 = u_{ul}$, $i_1 = u_1 / R_1 = u_{ul} / R_1$. Kako operaciono pojačalo ne vuče struju iz stezaljke 1, $i_2 = i_1 = u_{ul} / R_1$ i $u_z = i_2(R_1 + R_2) = u_{ul}[1 + (R_2/R_1)]$. Konačno,

$$i_3 = \frac{u_z - u_w}{R} = u_w \frac{R_2}{RR_1} \quad (3.2-11)$$

uz $i_{ul} = -i_3$, slijedi

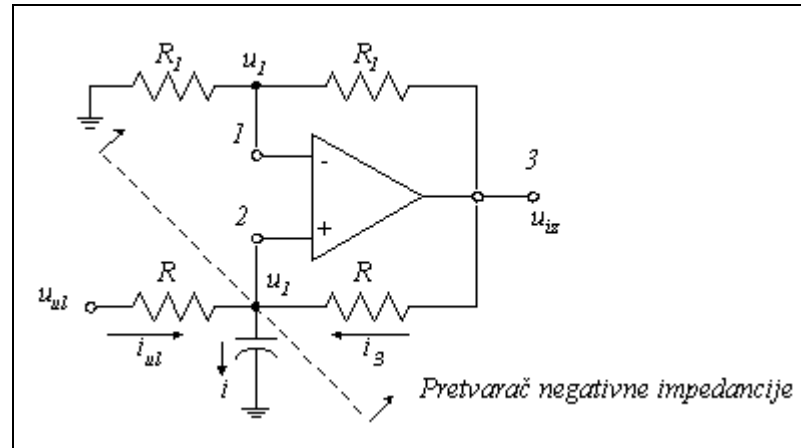
$$R_w = \frac{u_w}{i_w} = -R \frac{R_1}{R_2} \quad (3.2-12)$$

što predstavlja negativnu vrijednost otpora.

Pretvarač negativne impedancije se koristi kod pretvorbe naponskog izvora u strujni pomoću naponsko strujnog pretvarača.

3.2.5 Sklop integratora

Ako se pretvaraču negativnog otpora dodaju otpornik i kondenzator, kao na slici 3.2-6, nastaje sklop neinvertirajućeg integratora.



Slika 3.2-6 Neinvertirajući integrator

Analiza odgovara analizi izvedenoj za sklop pretvarača negativnog otpora, osim što je sada

$$u_z = 2u_1 \quad (3.2-13)$$

i

$$i_3 = \frac{u_1}{R} \quad (3.2-14)$$

Ukupna struja koja teče kroz granu kondenzatora C je dana izrazom

$$i = i_w + i_3 = \frac{u_w - u_1}{R} + \frac{u_1}{R} = \frac{u_w}{R} \quad (3.2-15)$$

Napon na kondenzatoru je

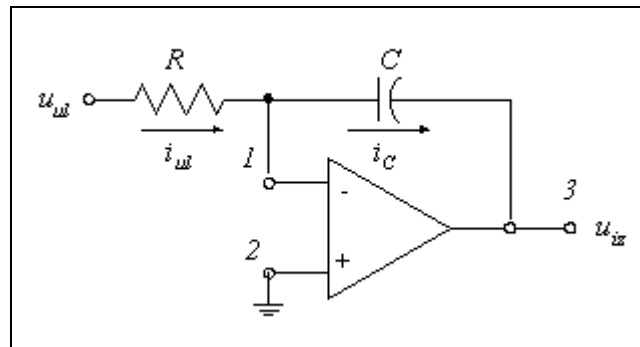
$$u_1(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \frac{1}{RC} \int_{-\infty}^t u_w(\xi) d\xi \quad (3.2-16)$$

Izraz za izlazni napon glasi

$$u_z(t) = \frac{2}{RC} \int_{-\infty}^t u_w(\xi) d\xi \quad (3.2-17)$$

što pokazuje da sklop djeluje kao integrator.

Jednostavniji sklop integratora se dobije zamjenom otpornika R_2 invertirajućeg pojačala sa slike 3.1-1 kondenzatorom C . Novonastali sklop, prikazan na slici 3.2-7, naziva se invertirajući integrator.



Slika 3.2-7 Invertirajući integrator

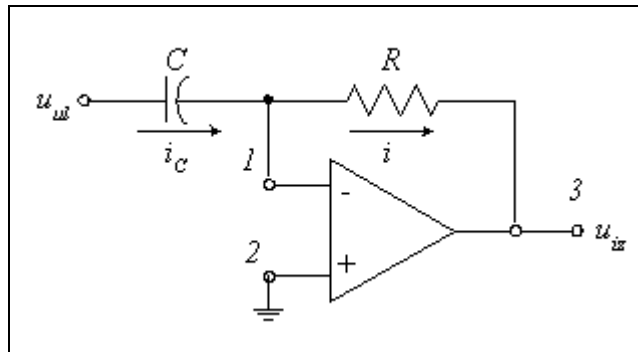
Budući stezaljka 1 predstavlja prividno uzemljenje i ne vuče struju u idealno operaciono pojačalo, $i_C = i_{u1} = u_{u1} / R$. Napon na kondenzatoru C je jednak u_{iz} , tako da je

$$u_z(t) = -\frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_C(\xi) d\xi = -\frac{1}{RC} \int_{-\infty}^t u_w(\xi) d\xi \quad (3.2-18)$$

te sklop djeluje kao integrator koji invertira predznak ulaznog napona.

3.2.6 Sklop derivatora

Zamjenom otpornika R_1 s kondenzatorom C kod invertirajućeg pojačala, slijedi sklop derivatora, prikazan na slici 3.2-8.



Slika 3.2-8 Derivator

I u ovom slučaju radi postojanja prividnog kratkog spoja, $i = i_C$ i

$$u_w = -Ri = -Ri_C \quad (3.2-19)$$

Ali budući je

$$i_C = C \frac{du_w(t)}{dt} \quad (3.2-20)$$

slijedi

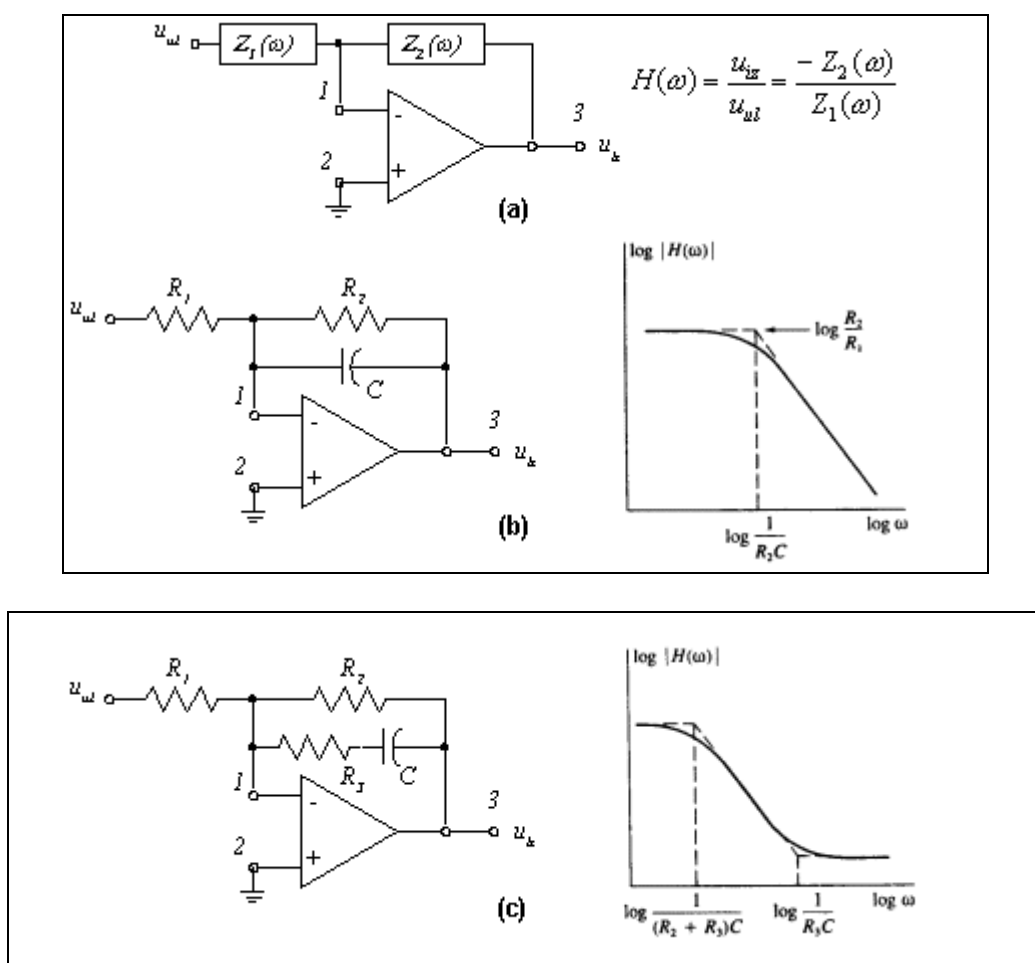
$$u_w = -RC \frac{du_w(t)}{dt} \quad (3.2-21)$$

što odgovara djelovanju derivatora s pojačanjem $-RC$.

U praksi se, kada je to god moguće, izbjegava primjena derivatora. Prijenosna funkcija derivatora pokazuje da s porastom frekvencije raste pojačanje, što dovodi do pojačanja šuma kod visokih frekvencija signala. Osim toga sklop derivatora lako zaoscilira.

3.2.7 Aktivni filteri

U spoju s drugim komponentama, operaciono pojačalo predstavlja osnovni element aktivnog filtera. Slijede primjeri primjene poopćenog invertirajućeg pojačala, prema slici 3.2-9(a), u svrhu izgradnje aktivnih filtera.



Slika 3.2-9 (a) Prikaz invertirajućeg pojačala i izvedenih filtera: (b) niskopropusni filter i (c) niskopropusni filter s ograničenim prigušenjem

Prvi primjer je sklop niskopropusnog filtera prikazan na slici 3.2-9(b). Izrazi za impedancije glase $Z_1(\omega) = R_1$ i $Z_2(\omega) = R_2 + 1/(j\omega C) = R_2/(1 + j\omega R_2 C)$. Prijenosna funkcija tako izvedenog filtera glasi

$$H(\omega) = \frac{u_{kz}}{u_{ul}} = -\frac{Z_2(\omega)}{Z_1(\omega)} = -\frac{(R_2 / R_1)}{1 + j\omega R_2 C} \quad (3.2-22)$$

Prijenosna funkcija opisuje niskopropusni filter s kutnom frekvencijom loma iznosa $1/R_2 C$, jednakom graničnoj frekvenciji. Ponašanje prijenosne funkcije 1 $H(\omega)$ 1

prikazuje krivulja na slici 3.2-9(b). Kada je $\omega \ll 1/R_2C$, pojačanje je približno stalnog iznosa $-R_2/R_1$. Kada vrijednost kutne frekvencije prijeđe vrijednost frekvencije loma $1/R_2C$, pojačanje se smanjuje. U logaritamskom mjerilu smanjenje pojačanja predstavlja približno linearnu funkciju. Frekvencija loma određuje točku odvajanja između dvije vrste ponašanja pojačala.

Drugi primjer niskopropusnog filtera slijedi odabirom impedancija

$$Z_1(\omega) = R_1 \quad (3.2-23)$$

$$Z_2(\omega) = R_2 \parallel \left(R_3 + \frac{1}{j\omega C} \right) = \frac{R_2(1 + j\omega R_3 C)}{1 + j\omega(R_2 + R_3)C} \quad (3.2-24)$$

Dakle,

$$H(\omega) = \frac{u_z}{u_w} = \frac{-(R_2 / R_1)(1 + j\omega R_3 C)}{1 + j\omega(R_2 + R_3)C} \quad (3.2-25)$$

Prikaz kruga niskofrekventnog filtera i krivulje apsolutne vrijednosti odgovarajuće prijenosne funkcije prikazuje slika 3.2-9(c). Vidljive su dvije frekvencije loma. Na nižoj, koja iznosi $1/(R_2 + R_3)C$, opaža se tipično niskopropusno ponašanje. Na višoj, zadanoj izrazom $1/R_3C$, prestaje opadati pojačanje i za $\omega > 1/R_3C$, ostaje stalno na iznosu $-R_2R_3/R_1(R_2 + R_3) = -(R_{21} R_3)/R_1$.

Operaciona pojačala se koriste kod izvedbi svih oblika niskopropusnih, visokopropusnih i pojasnih filtera.

3.3 Parametri operacionog pojačala

Premda realna operaciona pojačala u mnogim primjenama pokazuju gotovo idealne karakteristike, pri upotrebi treba obratiti pažnju na razumijevanje značenja njihovih parametara.

3.3.1 Najveće dozvoljene vrijednosti

Za napajanje operaciona pojačala koriste dva naponska izvora istog iznosa, ali suprotnog polariteta. Iznosi napona napajanja se kreću od nekoliko volti do nekoliko desetaka volti, uz najčešće područje od 5 do 25 V. Operaciono pojačalo pravilno radi unutar područja napona napajanja koje ne prelazi najveće vrijednosti zapisane u dokumentaciji pojačala. Tako je npr., za široko primjenjivano operaciono pojačalo 741, najviša dozvoljena vrijednost napona napajanja ± 22 V, a pravilno radi u području napona od ± 5 do ± 22 V, uz najčešću vrijednost od ± 15 V.

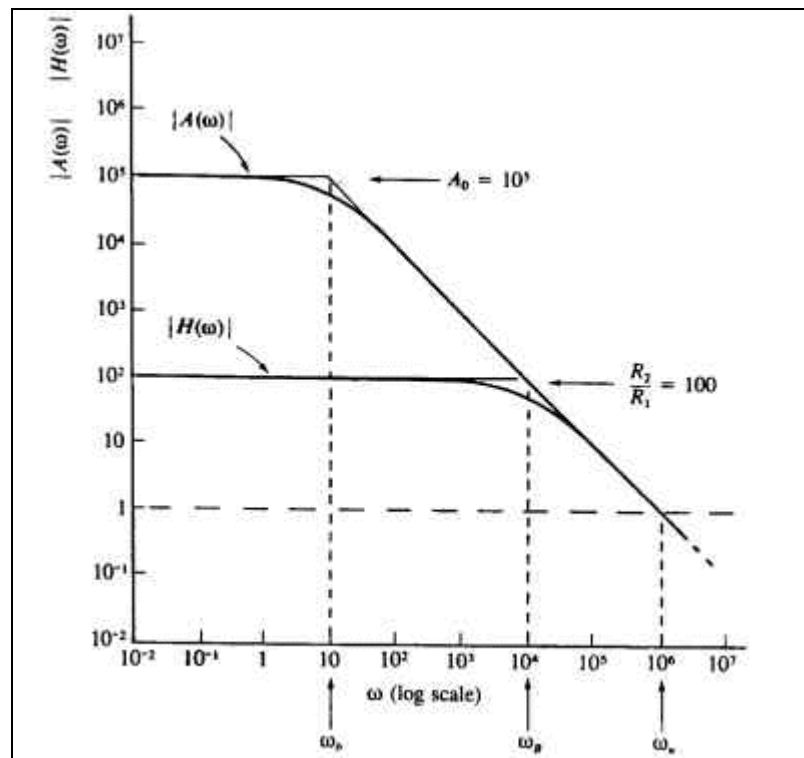
Najveće dozvoljene vrijednosti ostalih veličina zapisane u dokumentaciji treba pažljivo slijediti. Najviša prosječna snaga koja se troši unutar operacionog pojačala vrijedi za određene radne temperature. Dozvoljeno vrijeme trajanja kratkog spoja na izlazu pojačala se izražava mjestom nastanka kratkog spoja (najčešće prema zajedničkoj točki ili izvoru napajanja) i radnom temperaturom. Najviši dozvoljeni naponi na ulaznim stezaljkama i najviši dozvoljeni ulazni diferencijalni napon se često navode preko napona napajanja. Na vrijednosti navedenih veličina treba posebno obratiti pažnju u slučaju pojačala snage niskog pojačanja ako se na izlazu ne želi postići zasićenje. Najveće vrijednosti su zapisane i za izlazni napon, struju opterećenja ili najmanje impedancije, temperaturu uskladištenja, područje radne temperature i slično.

3.3.2 Konačno pojačanje i širina pojasa

Niskofrekventna operaciona pojačala imaju konačnu vrijednost umnoška pojačanja i širine pojasa. Frekvencijsku zavisnost naponskog pojačanja (prijenosnu funkciju) realnog operacionog pojačala daje izraz

$$A(\omega) = \frac{A_0}{1 + j(\omega / \omega_b)} \quad (3.3-1)$$

pri čemu je ω_b gornja granična frekvencija, izražena radijanima u sekundi, kada se ne koriste vanjske komponente. Pojačanje osnovnog pojačala $A(\omega)$ se naziva pojačanjem otvorene petlje, za razliku od pojačanja zatvorene petlje koje odgovara pojačanju sklopa kod kojeg se pri tvorbi povratne veze na operaciono pojačalo povezuju vanjski elementi između izlaza i jedne ili obje ulazne stezaljke. Grafički prikaz izraza (3.3.-1) je vidljiv na slici 3.3-1. Koordinatna mjerila su nacrtana uz pretpostavku pojačanja operacionog pojačala $A_0 = 10^5$ i $\omega_b = 10$ rad/s.



Slika 3.3-1 Dijagram prijenosnih karakteristika operacionog pojačala uz $A_0 = 10^5$ i $\omega_b = 10$ rad/s

Frekvencija ω_u je kutna frekvencija kod koje je iznos pojačanja jednak jedan. Odnos između ω_b i ω_u glasi

$$\omega_u = \omega_b \sqrt{A_0^2 - 1} \quad (3.3-2)$$

ili u slučaju kada je $A_0 \gg 1$

$$\omega_u \approx A_0 \omega_b \quad (3.3-3)$$

Ograničeno pojačanje i širina pojasa utječu na rad operacionih pojačala u praktičnim krugovima, što pokazuje sljedeći primjer.

Promatra se invertirajuće pojačalo sa slike (3.1-5) na kojega se primjenjuje izraz (3.3-1). Prijenosna funkcija $H(\omega)$ glasi

$$H(\omega) = \frac{u_{\text{iz}}}{u_{\text{in}}} = -\frac{R_2}{R_1} \left\{ \frac{1}{1 + [(R_1 + R_2) / A_0 R_1]} \right\} \left[\frac{1}{1 + j(\omega / \omega_b) / \left\{ 1 + [A_0 R_1 / (R_1 + R_2)] \right\}} \right] \quad (3.3-4)$$

i predstavlja funkciju niskog propusta s različitim iznosima pojačanja i širine pojasa. Ako je $A_0 > 200R_2/R_1$, kao što je pokazano u primjeru 3.1-1, iz (3.1-5) i (3.3-4) približno vrijedi

$$H(\omega) \approx \frac{-R_2 / R_1}{1 + j(\omega / \omega_b A_0)(1 + R_2 / R_1)} \quad (3.3-5)$$

što odgovara funkciji niskog propusta s pojačanjem $-R_2/R_1$ na niskim frekvencijama, traženog pojačanja kruga, i širine pojasa do gornje granične frekvencije, ω_B , čija vrijednost slijedi iz

$$\omega_B = \omega_b \frac{A_0}{1 + R_2 / R_1} \approx \omega_b \frac{A_0}{R_2 / R_1} \quad (3.3-6)$$

Izraz (3.3-5) je nacrtan na slici 3.3-1, uz pretpostavku $A_0 = 10^5$ i $\omega_b = 10$ rad/s i $R_2/R_1 = 100$. Širina pojasa kruga otvorene petlje je veća od otvorene petlje samog operacionog pojačala, ali krivulja njegovog pojačanja je ipak ograničena pojačanjem otvorene petlje operacionog pojačala u području visokih frekvencija. Kod izbora odnosa iznosa pojačanja i širine pojasa prisutna je nagodba što potvrđuje i izraz (3.3-6) ako se zapiše u obliku

$$A_0 \omega_b = \frac{R_2}{R_1} \omega_B \quad (3.3-7)$$

Lijeva strana izraza (3.3-7) predstavlja umnožak pojačanja i širine pojasa operacionog pojačala, dok desna strana predstavlja umnožak pojačanja i širine pojasa sklopa pojačala. Dakle, umnožak pojačanje-širina pojasa operacionog pojačala predstavlja mjeru kakvoće rada pojačala koje za svoj rad koristi operaciono pojačalo.



Primjer 3.3-1

Operaciono pojačalo 741 ima $A_0 = 2 \cdot 10^5$, i $\omega_b = 16\pi$ rad/s. Napon napajanja iznosi ± 15 V. Treba odrediti vrijednost ω_u i pojačanje invertirajućeg pojačala uz $R_2 = 47$ k Ω i $R_1 = 1$ k Ω .

Rješenje 3.3-1

Iz izraza (3.2-2) slijedi

$$\omega_g = 16\pi \sqrt{4 \times 10^{10} - 1} \approx 32\pi \times 10^5 \text{ rad/s}$$

ili $\omega_u/2\pi = 1.6$ MHz. Iz izraza (3.3-5) slijedi

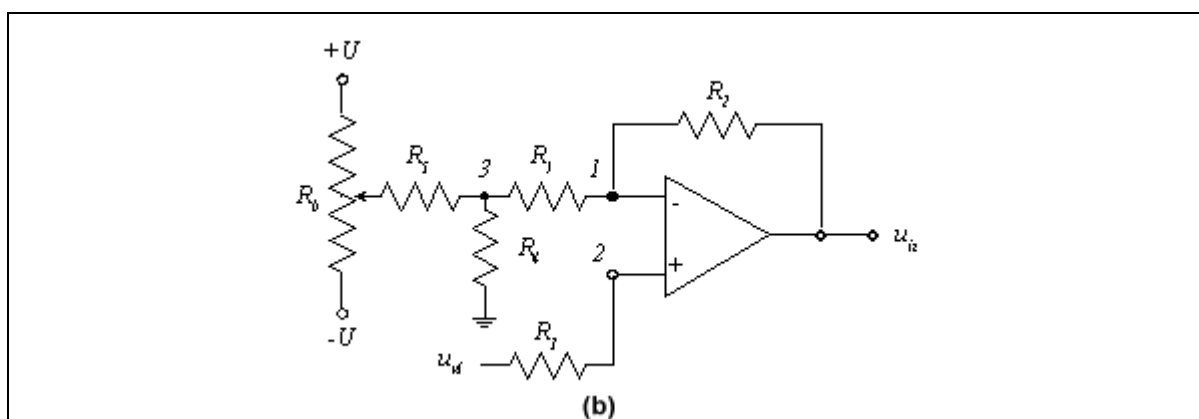
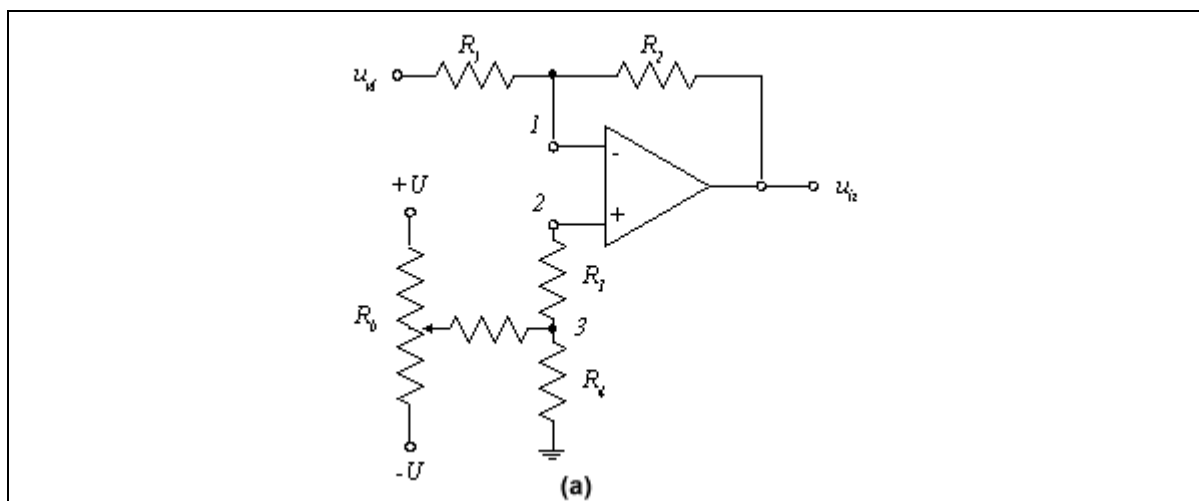
$$H(\omega) \approx \frac{-47000/1000}{1 + j(\omega/32\pi \times 10^5)(1 + 47000/1000)} = \frac{-47}{1 + j(3\omega/2\pi)(10^{-5})}$$

Širina pojasa sklopa pojačala do gornje granične frekvencije je $2\pi \cdot 10^5/3$ rad/s.

3.3.3 Napon namještanja

Kada su vrijednosti ulaznih napona idealnog operacionog pojačala jednake nuli, vrijednost izlaznog napona je nula. Kod realnog operacionog pojačala izlazni napon je različit od nule čak i kada su ulazni naponi jednaki nuli, tj. uzemljeni. Napon namještanja ulaznog napona, U_{uln} , je napon koji je potrebno dovesti na ulazne stezaljke da bi napon na izlazu bio jednak nuli. Najčešće vrijednosti napona namještanja ulaznog napona su u području od 0.2 do 5 mV. Napon namještanja se ostvaruje krugovima prikazanim na slici 3.3-2.

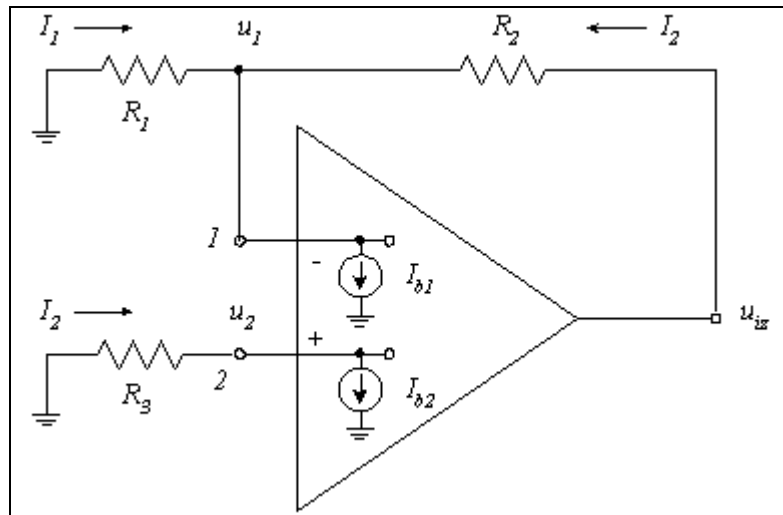
Pravilnim izborom vrijednosti otpornika R_4 i R_3 na ulaznoj stezaljci se dobiva mali napon u području $\pm UR_4/(R_4 + R_5)$ koji služi kao napon namještanja. Naponi $\pm U$ mogu služiti kao naponi napajanja operacionog pojačala. U oba kruga na slici 3.3-2, otpor od stezaljke 3 do zemlje mora biti manjeg iznosa od otpora R_3 na slici 3.3-2(a) odnosno R_1 na slici 3.3-2(b). U oba kruga R_3 mora biti jednak R_1 i R_2 .



Slika 3.3-2 Krugovi napona namještanja za (a) invertirajuće i (b) neinvertirajuće pojačalo

3.3.4 Struja namještanja

Idealno operaciono pojačalo ne vuče struju sa svojih ulaznih stezaljki te se izlazni napon radi njihovog utjecaja ne mijenja. Kod realnog operacionog pojačala prisutna je struja malog iznosa. Ako su ulazni stupnjevi unutar operacionog pojačala sastavljeni od bipolarnih tranzistora, ta struja je struja baze malog iznosa. Kod ulaza s FET tranzistorima postoji konačna struja još manjeg iznosa. Struja namještanja se uvodi preko dva istosmjerna strujna izvora, I_{b1} i I_{b2} , povezana između ulaznih stezaljki 1 i 2 i zajedničke točke, slika 3.3-3. Kada se na ulazne stezaljke izvana priključe otpornici, polarizacijske struje dovode do napona koji se pojačavaju i nepoželjno utječu na izlazni napon koji je tada različit od nule.



Slika 3.3-3 Model invertirajućeg pojačala sa krugovima za struju namještanja

Ako su struje I_{b1} i I_{b2} jednake, a vanjski otpori pravilno odabrani, moguće je postaviti vrijednost izlaznog napona u nulu. Ako se I_{b1} razlikuje od I_{b2} u postupku postavljanja izlaznog napona na nulu struje I_{b1} i I_{b2} mogu biti jednakog ili različitog iznosa. Razlika, označena s I_{uln} , se naziva strujom namještanja i u dokumentaciji operacionog pojačala je zapisana kao apsolutna vrijednost.

$$I_{uln} = I_{b2} - I_{b1} \quad (3.3-8)$$

Prosječna vrijednost struja I_{b1} i I_{b2} naziva se ulaznom polarizacijskom strujom

$$I_{\delta} = \frac{I_{b1} + I_{b2}}{2} \quad (3.3-9)$$

Najčešće vrijednosti ulazne polarizacijske struje I_b su u području od 10 do 100 nA, u slučaju kada su ulazni stupnjevi sastavljeni od bipolarnih tranzistora i od 10 do 100 pA kada su ulazni stupnjevi sastavljeni od FET tranzistora. Najčešće vrijednosti struje namještanja I_{uln} su u području od 2 do 20 nA, za bipolarne i od 5 do 50 pA za FET tranzistore.

Izraze (3.3-8) i (3.3-9) je moguće zapisati i kao

$$I_{b1} = I_{\delta} - \frac{I_{uln}}{2} \quad (3.3-10)$$

$$I_{b2} = I_{\delta} + \frac{I_{uln}}{2} \quad (3.3-11)$$

što pokazuje da je struja I_b zajednička komponenta struja I_{b1} i I_{b2} , a $I_{uln}/2$ predstavlja polovicu njihove razlike.

Za poništavanje izlaznog napona kod praktičnih izvedbi krugova s operacionim pojačalima u mirnim uvjetima, potrebno je (1) osigurati istosmjernu vezu od ulaznih stezaljki do zemlje, (2) izjednačiti iznose vanjskih otpora prema zemlji i (3) ako je nužno s ciljem poništenja preostalih izlaznih napona različitih od nule, koristiti vanjski sklop za uravnoteženje, prema slici 3.3.-2.

Primjer 3.3-2

Ispitati utjecaje struje namještanja na neinvertirajuće pojačalo prikazano na slici 3.1-2, pri čemu je od stezaljke 2 do zemlje priključen otpornik R_2 .

Rješenje 3.3-2

Iz modela kruga prikazanog na slici 3.3-3. slijedi

$$u_2 = -I_{\delta 2} R_3$$

Budući operaciono pojačalo ima visoko naponsko pojačanje, može se pretpostaviti da je vrijednost diferencijalnog ulaznog napona jednaka nuli, dakle

$$u_1 = u_2$$

Zatim

$$I_1 = -\frac{u_1}{R_1} = -\frac{u_2}{R_1} = \frac{I_{\delta 2} R_3}{R_1}$$

$$I_2 = I_{\delta 1} - I_1 = I_{\delta 1} - \frac{I_{\delta 2} R_3}{R_1}$$

i

$$u_{\Sigma} = I_2 R_2 + u_1 = R_2 \left[I_{\delta 1} - I_{\delta 2} R_3 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right) \right] \quad (A)$$

Primjenom izraza (3.3-19) i (3.3-11) u (A) slijedi

$$u_{\Sigma} = R_2 \left\{ I_{\delta} \left[1 - R_3 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right) \right] - \frac{I_{\text{unb}}}{2} \left[1 + R_3 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right) \right] \right\} \quad (B)$$

Ako je

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_1 \parallel R_2$$

komponenta u_{iz} uzrokovana strujom I_b je nula. Preostala komponenta uzrokovana strujom namještanja I_{uln} je

$$u_z = -I_{uln} R_2 \quad (C)$$

Za usporedbu ostatka izlaznog napona u slučaju ako je R_3 jednak nuli, iz (B) i (C) slijedi

$$\left| \frac{u_z(z \text{ a } R_3 = 0)}{u_z(z \text{ a } R_3 = R_1 \mid R_2)} \right| = \left| \frac{I_{\delta 1}}{I_{uln}} \right|$$

Budući je kod operacionih pojačala opće namjene odnos struja $|I_{\delta 1} / I_{\delta 2}|$ u rasponu od 5 do 10 jednostavno postići, smanjenje izlaznog napona različitog od nule je znatno.

3.3.5 Faktor potiskivanja

Operaciono pojačalo konačnog iznosa naponskog pojačanja uz idealne vrijednosti ostalih parametara, daje izlazni napon u_{iz} koji je proporcionalan razlici napona na ulaznim stezaljkama. Izlazni napon je jednak $A_0 u_d$, gdje je

$$u_d = u_2 - u_1 \quad (3.3.-12)$$

U idealnom slučaju ne postoji komponenta izlaznog napona koja je u nekom odnosu sa zajedničkim naponom, u_z , prisutnim u u_2 i u_1 . Zajednički napon može se izraziti kao

$$u_z = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad (3.3-13)$$

pri čemu se za u_1 i u_2 može napisati

$$u_1 = u_z - \frac{u_d}{2} \quad (3.3-14)$$

$$u_2 = u_z + \frac{u_d}{2} \quad (3.3.-15)$$

Kod realnog operacionog pojačala u izlaznom naponu postoji komponenta uzrokovana naponom u_z i jednaka je $A_z u_z$. Pojačanje A_z predstavlja naponsko pojačanje od zajedničke komponente ulaznih napona. U slučaju realnog operacionog pojačala izraz za izlazni napon glasi

$$u_{iz} = A_0 u_d + A_z u_z \quad (3.3-16)$$

Odnos iznosa dijela idealnog izlaznog napona prema izlaznom naponu u slučaju postojanja zajedničkog napona uz jednaku pobudu, tj., $u_d = u_z$, je mjera kakvoće realnog operacionog pojačala. Odnos se izražava u decibelima i naziva se faktorom potiskivanja zajedničkog načina rada r (engl., CMRR - Common Mode Rejection Ratio) i glasi

$$\text{CMRR} = 20 \log \frac{A_0}{A_z} \quad (3.3-17)$$

Faktor potiskivanja je pozitivni broj, najčešće u području od 50 do 100 dB. Kod idealnog pojačala $\text{CMRR} = \infty$.

IZVOR:

http://www.fpz.hr/hgold/ES/AE/pog_3/nasl_3.htm