

PRIMENA OPERACIONIH POJAČAVAČA

1 UVOD

Operacioni pojačavač je osnovna pojačavača komponenta koja se koristi u analognim kolima. U ovom poglavlju biće predstavljene i ukratko opisane karakteristične primene operacionih pojačavača. Jednačine kojima su predstavljene prenosne funkcije pojedinih kola izvedene su uz pretpostavku da su upotrebljeni operacioni pojačavači idealni, odnosno imaju beskonačno diferencijalno pojačanje, ne uzimajući u obzir ostale parametre operacionih pojačavača (ulazni ofset napon, ulaznu ofset struju, ulaznu struju polarizacije, ulaznu impedansu, izlaznu impedansu i pojačanje srednje vrednosti signala). Detaljniji opis realnih karakteristika operacionog pojačavača i njegova ekvivalentna šema biće izložena u sledećim poglavljljima.

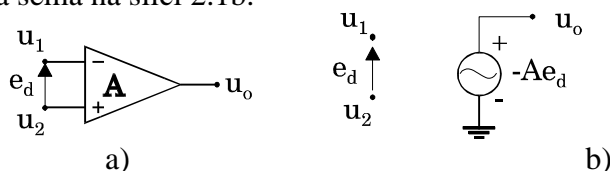
2 OPERACIONI POJAČAVAČ

Operacioni pojačavač je integrisano linearno pojačavačko kolo koje ima dva ulaza (invertujući i neinvertujući) i jedan izlaz. Ukoliko se operacioni pojačavač koristi u kolima naponskih komparatora on tada ne radi u linearnom već u pekidačkom režimu, zbog toga što nema negativnu već pozitivnu povratnu spregu. Medjutim, ovom prilikom prekidačka kola neće biti razmatrana. Ovde će biti razmatrana samo kola kod kojih operacioni pojačavač radi u linearnom režimu, odnosno kola kod kojih je izlazni napon proporcionalan razlici napona na njegovim ulaznim priključcima.

Karakteristike realnih operacionog pojačavača, naravno nisu idealne. U svakom slučaju, od operacionih pojačavača se zahteva veliko pojačanje razlike ulaznih napona, nezavisno od njihove srednje vrednosti, tj. veliko diferencijalno a malo pojačnje srednje vrednosti ulaznih signala, male ulazne struje polarizacije, mali ulazni strujni i ulazni naponski ofset, veliku ulaznu a malu izlaznu impedansu, veliki propusni opseg i mali fazni pomeraj izmedju ulaznog i izlaznog signala. Idelni operacioni pojačavač, prema tome mora imati:

- beskonačno diferencijalno pojačanje ($A \rightarrow \infty$)
- nulto pojačanje srednje vrednosti signala ($A_{cm} = 0$)
- beskonačni faktor potiskivanja srednje vrednosti signala $\left(CMRR = \frac{A}{A_{cm}} \rightarrow \infty \right)$
- nulte ulazne struje polarizacije ($I_{B1} = I_{B2} = 0$)
- nulti ulazni strujni ofset ($I_{os} = I_{B1} - I_{B2} = 0$)
- nulti ulazni naponski ofset ($V_{os} = 0$, tj. $u_o = 0$, za $u_1 = u_2$)
- beskonačnu ulaznu impedansu ($Z_i \rightarrow \infty$)
- nultu izlaznu impedansu ($Z_o = 0$)
- beskonačni propusni opseg ($f_T \rightarrow \infty$), za male i velike signale
- nulti fazni pomeraj ($\Theta = 0$).

Simbol idealnog operacionog pojačavača prikazan je na slici 2.1a, a njegova ekvivalentna električna šema na slici 2.1b.



Slika 2.1 Simbol (a) i ekvivalentna šema (b) idealnog operacionog pojačavača

Izlazni napon operacionog pojačavača proporcionalan je razlici ulaznih napona i može se predstaviti izrazom:

$$(2.1) \quad u_o = A \cdot (u_2 - u_1) = -A \cdot e_d,$$

gde je e_d razlika napona između invertujućeg (u_1) i neinvertujućeg (u_2) ulaza operacionog pojačavača. To znači da se operacioni pojačavač ponaša kao idealni naponom kontrolisani naponski generator, gde je kontrolišući napon ustvari potencijalna razlika između njegovih ulaznih priključaka.

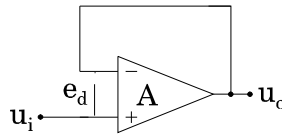
Ukoliko operacioni pojačavač radi u linearnom režimu rada izlazni napon mora imati konačnu vrednost koja je manja od napona izvora za napajanje, bar za dvostruku vrednost napona zasićenja između kolektora i emitora tranzistora V_{CES} . S obzirom da je pojačanje A operacionog pojačavača veoma veliko, a napon na izlazu mora biti konačna veličina, napon e_d između ulaznih priključaka operacionog pojačavača teži nuli. Zbog toga se kaže da su ulazni priključci operacionog pojačavača na istom virtualnom potencijalu, ali između njih ne postoji galvanska sprega, jer je ulazna impedansa beskonačno velika.

3 OSNOVNA KOLA SA OPERACIONIM POJAČAVAČIMA

3.1 Jedinični pojačavač

Jedinični pojačavač ima jedinično pojačanje napona i prikazan je na slici 3.1. Izlazni napon ovog pojačavača jednak je ulaznom naponu. Kako je kod idealnog operacionog pojačavača naponska razlika između ulaznih priključaka e_d jednaka nuli, to je:

$$(3.1) \quad u_o = u_i$$

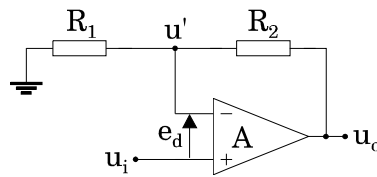


Slika 3.1 Jedinični pojačavač

Jedinični pojačavač se najčešće koristi kao razdvojni stepen u slučajevima kada se želi da se dva pojačavačka stepena međusobno galvanski izoluju.

3.2 Neinvertujući pojačavač

Neinvertujući pojačavač je opštiji slučaj pojačavača sa pozitivnim pojačanjem i njegova šema prikazana je na slici 3.2.



Slika 3.2 Neinvertujući pojačavač

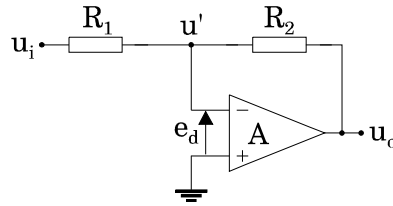
Napon na izlazu ovog kola, u slučaju idealnog operacionog pojačavača, iznosi:

$$(3.2) \quad u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot u_i.$$

Neinvertujući pojačavač ima veoma veliku ulaznu i malu izlaznu impedansu.

3.3 Invertujući pojačavač

Na slici 3.3 prikazana je šema invertujućeg pojačavača realizovanog korišćenjem operacionog pojačavača.



Slika 3.3 Invertujući pojačavač

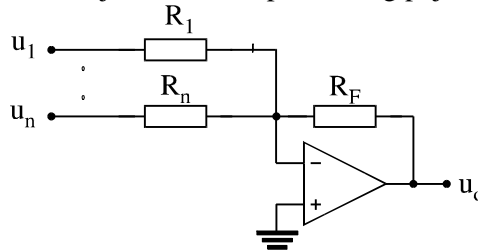
Napon na izlazu invertujućeg pojačavača dat je izrazom:

$$(3.3) \quad u_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_i.$$

Invertujući pojačavač ima malu izlaznu impedansu, a ulazna impedansa je jednaka vrednosti otpornika R_1 .

3.4 Sabirač na invertujućem ulazu

Sabirač na invertujućem ulazu operacionog pojačavača prikazan je na slici 3.4.



Slika 3.4 Sabirač na invertujućem ulazu

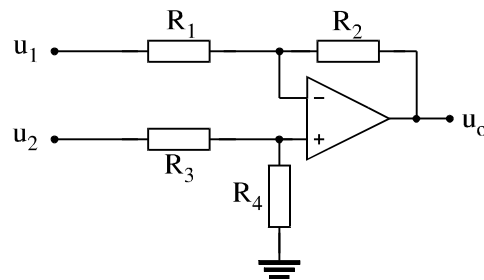
Napon na izlazu ovog sabirača može se predstaviti izrazom:

$$(3.4) \quad u_o = -\sum_{i=1}^n \frac{R_F}{R_i} u_i,$$

dok ulazne impedanse posmatrane sa ulaza u_1, \dots, u_n iznose R_1, \dots, R_n .

3.5 Diferencijalni pojačavač

Diferencijalni pojačavač realizovan korišćenjem jednog operacionog pojačavača prikazan je na slici 3.5.



Slika 3.5 Diferencijalni pojačavač

Izlazni napon kola sa slike 3.5 dat je izrazom:

$$(3.5) \quad u_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_1 + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot u_2,$$

Pod uslovom da vrednosti otpornika u kolu zadovoljavaju uslov $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$ izlazni napon je

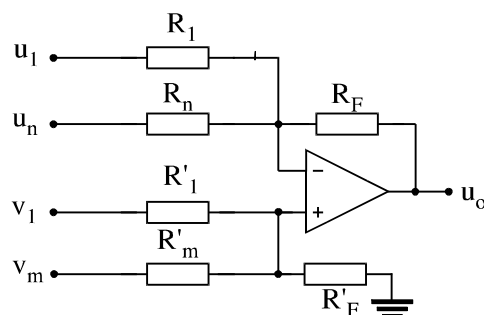
proporcionalan razlici ulaznih napona, tj. $u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_2 - u_1)$.

3.6 Algebarski sabirač

Na slici 3.6 prikazano je kolo algebarskog sabirača, kola kojim se mogu sabirati naponi sa različitim algebarskim znakom, tj. izlazni napon je (ukoliko je ispunjen uslov $\sum_{i=1}^n \frac{R_F}{R_i} = \sum_{j=1}^m \frac{R_F'}{R_j}$)

dat izrazom:

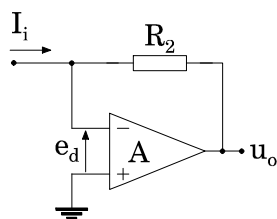
$$(3.6) \quad u_o = \sum_{j=1}^m \frac{R_F'}{R_j} \cdot v_j - \sum_{i=1}^n \frac{R_F}{R_i} \cdot u_i.$$



Slika 3.6 Algebarski sabirač

3.7 Konvertor struje u napon

Konvertor struje u napon, čija je šema prikazana na slici 3.7, je kolo čiji je izlazni napon direktno proporcionalan ulaznoj struji.



Slika 3.7 Konvertor struje u napon

Ulazna otpornost konvertora struje u napon je u idealnom slučaju veoma mala ($Z_i = R_2/A$), kao i izlazna otpornost, a izlazni napon se može predstaviti izrazom:

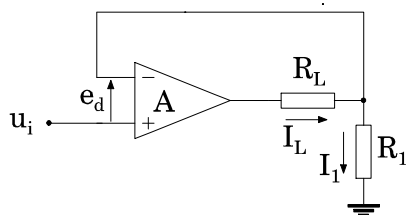
$$(3.7) \quad u_o = -R_2 \cdot I_i$$

3.8 Konvertor napona u struju sa neuzemljenim potrošačem

Struja kroz potrošač R_L data je izrazom:

$$(3.8) \quad I_L = I_1 = \frac{u_i}{R_1},$$

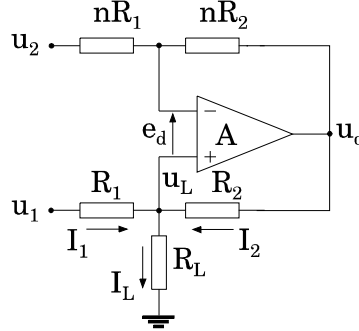
i ne zavisi od otpornosti potrošača R_L , tako da se kolo ponaša kao strujni izvor čija je struja direktno kontrolisana ulaznim naponom u_i . Karakteristično je za ovo kolo da potrošač nema ni jedan uzemljeni kraj.



Slika 3.8 Konvertor napona u struju

3.9 Izvor konstantne struje sa uzemljenim potrošačem

Howlan-ov strujni izvor (strujni izvor sa uzemljenim potrošačem) dat je na slici 3.9.



Slika 3.9 Howlan-ov strujni izvor

Struja kroz potrošač data je izrazom:

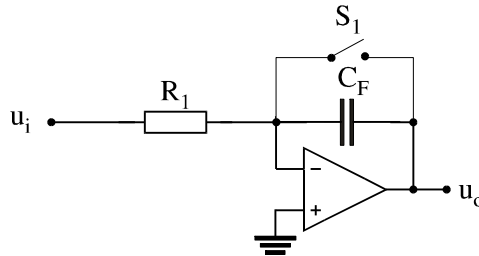
$$(3.9) \quad I_L = \frac{u_1 - u_2}{R_1},$$

ne zavisi od otpornosti potrošača R_L , a direktno je proporcionalna razlici ulaznih napona. Ovo kolo je naponom kontrolisani strujni izvor kod koga je jedan kraj potrošača R_L uzemljen.

3.10 Integrator

Izlazni napon integratora (slika 3.10) proporcionalan je integralu ulaznog napona u vremenskom domenu, gde je period integracije T određen vremenom u kome je prekidač S_1 otvoren i dat je izrazom:

$$(3.10) \quad u_o = -\frac{1}{R_1 \cdot C_F} \int_0^T u_i \cdot dt$$



Slika 3.10 Integrator

Period integracije kontrolisan je prekidačem S_1 , koji se otvara u trenutku $t=0$, kada počinje proces integraljenja, a zatvara se u trenutku $t=T$ i prekida proces integraljenja, prazni kondenzator C_F i priprema integrator za novi ciklus integraljenja. Otpornik R_1 se može izostaviti, odnosno može imati nultu vrednost i tada kolo radi kao strujni integrator kod koga je izlazni napon dat izrazom:

$$(3.11) \quad u_o = \frac{1}{C_F} \int_0^T I_i \cdot dt = \frac{Q}{C_F},$$

gde je sa Q označeno ukupno električno naelektrisanje kojim se kondenzator C_F napuni u toku perioda integraljenja.

3.11 Integrator - aktivni filter propusnik niskih frekvencija

Ukoliko se umesto prekidača S_1 u kolu sa slike 3.10 veže otpornik R_F dobija se aktivni filter propusnik niskih frekvencija prvog reda koji je prikazan na slici 3.11. U frekventnom domenu pojačanje ovog kola dato je izrazom:

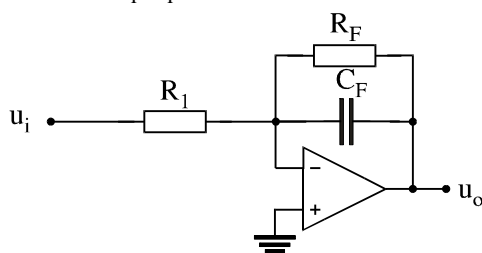
$$(3.12) \quad A_{NF} = -\frac{R_F / R_1}{1 + sR_F C_F}$$

To kolo predstavlja pojačavač niskih frekvencija sa nominalnim pojačanjem pri nultoj frekvenciji A_{NF0} , koje iznosi:

$$(3.13) \quad A_{NF0} = -\frac{R_F}{R_1}$$

Propusni opseg definisan sa 3dB slabljenja u odnosu na nominalno pojačanje je:

$$(3.14) \quad B_0 = B_{(3dB)} = \frac{1}{2\pi \cdot R_F C_F}$$

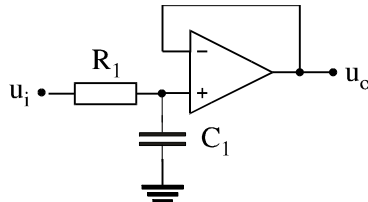


Slika 3.11 Aktivni NF filter

U vremenskom domenu, odziv na jediničnu odskočnu funkciju dat je izrazom:

$$(3.15) \quad u_o(t) = -\frac{R_F}{R_1} \left[1 - e^{-\frac{t}{R_F C_F}} \right]$$

Drugi, nešto jednostavniji način izvodjenja aktivnog NF filtra prikazan je na sledećoj slici.



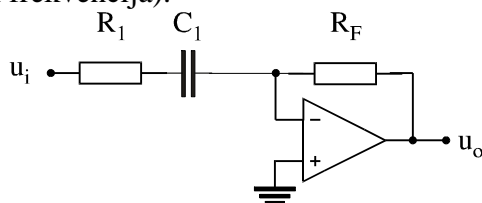
Slika 3.11a

Prenosna funkcija ovog kola data je izrazom:

$$(3.16) \quad A_{NF} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{1}{1 + sR_1 C_1}$$

3.12 Diferencijator - aktivni filter propusnik visokih frekvencija

Na slici 3.12 prikazana je šema diferencijatora, odnosno aktivnog VF filtra (filter propusnik visokih frekvencija).



Slika 3.12 Aktivni VF filter

Ako je vrednost otpornik R_1 jednaka nuli onda kolo predstavlja idealni diferencijator čiji je izlazni napon diferencijal ulaznog napona i dat je izrazom:

$$(3.17) \quad u_o = -R_F C_1 \frac{du_i}{dt}$$

Korišćenje otpornika R_1 sa malom vrednošću može biti korisno za ograničavanje pojačanja pri visokim frekvencijama, jer preveliko pojačanje pri visokim frekvencijama predstavlja problem zbog naponskog šuma na ulazu kola. Vrednost otpornika R_1 se određuje tako da vremenska konstanta $R_1 C_1$ bude mala u poredjenju sa periodom ulaznog signala.

U frekventncijskom domenu kolo, koje radi kao pojačavač visokih frekvencija, ima pojačanje:

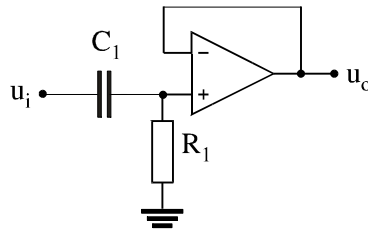
$$(3.18) \quad A_{VF} = -\frac{sR_F C_1}{1 + sR_1 C_1},$$

koje se u slučaju $R_1=0$ svodi na:

$$(3.19) \quad A_{VF} = -sR_F C_1.$$

I u ovom slučaju postoji jednostavniji način izvodjenja aktivnog VF filtra prvog reda i on je prikazan je na sledećoj slici, a njegova prenosna funkcija data je izrazom:

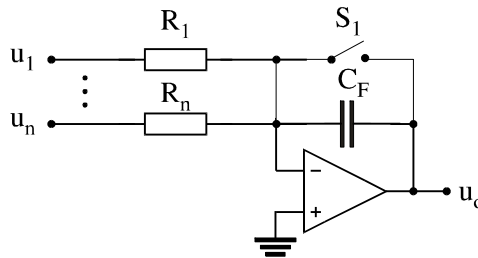
$$(3.20) \quad A_{VF} = \frac{sR_1 C_1}{1 + sR_1 C_1}.$$



Slika 3.12a

3.13 Sumirajući integrator

Ovo kolo predstavlja proširenje jednostavnog kola za integraljenje (slika 3.10) i prikazano je na slici 3.13.



Slika 3.13 Sumirajući integrator

U vremenskom domenu izlazni napon ovog kola dat je izrazom:

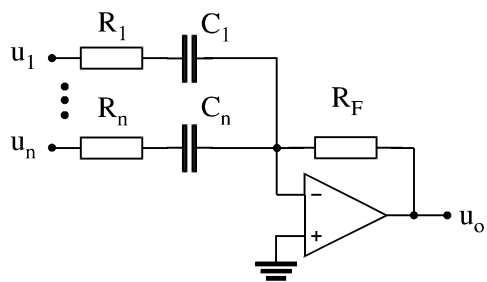
$$(3.21) \quad u_o = -\frac{1}{C_F} \int_0^T \left(\sum_{i=1}^n \frac{u_i}{R_i} \right) \cdot dt.$$

3.14 Sumirajući diferencijator

Sumirajući diferencijator predstavlja proširenje osnovnog kola za diferenciranje (slika 3.12) i prikazan je na slici 3.14. Izlazni napon ovog kola dat je sledećim izrazom:

$$(3.22) \quad u_o = -R_F \left(\sum_{i=1}^n C_i \frac{du_i}{dt} \right),$$

pod uslovom da je $R_i C_i \ll T$ za svako i , gde je T period ulaznog signala.



Slika 3.14 Sumirajući diferencijator