

Glava 1

Standardne primjene operacionih pojačavača

Upotreba operacionih pojačavača (OP) danas široko prevazilazi okvire izvršavanja matematičkih operacija u analognim računarima, za što su prvo bitno bili namijenjeni. Operacioni pojačavači su osnovne komponente za projektovanje raznih vrsta sklopova, kao što su: pojačavači napona i struja, aktivni filtri, oscilatori, generatori signala, stabilizatori, regulatori napona i struja, komparatori napona, analogno-digitalni i digitalno-analogni konvertori, impulsni sklopovi itd. Zahvaljujući ovako širokoj primjeni smatra se da, po količini proizvodnje, OP-i predstavljaju više od 50% proizvedenih linearnih integrisanih kola. S obzirom na raznovrsnost primjene, OP sa pravom možemo zvati univerzalnom komponentom.

Idealni operacioni pojačavač je elektronsko kolo koje posjeduje:

- beskonačno veliko pojačanje,
- beskonačnu ulaznu otpornost,
- izlaznu otpornost jednaku nuli i
- beskonačno širok frekvencijski propusni opseg.

U većini primjena može se smatrati da je operacioni pojačavač idealan, jer odstupanja parametara realnog OP-a od idealnog imaju neznatan uticaj na karakteristike projektovanog sklopa.

1.1. Invertujući pojačavač

Invertujući pojačavač ima negativno naponsko pojačanje. Drugim riječima, promjena izlaznog napona je suprotnog znaka od ulaznog. Dakle,

dok ulazni napon raste, izlazni napon opada i obrnuto. Ako se radi o razmjeničnim naponima, izlazni i ulazni napon su u protivfazi pa je prenosna karakteristika $v_O = f(v_I)$ invertujuća. Otuda potiče naziv **invertujući pojačavač**.

Zbog velikog sopstvenog pojačanja A_0 operacionog pojačavača, razlika napona v_d između "−" i "+" ulaza je veoma mala. Ova promjena je toliko mala da se može smatrati da je "−" ulaz na naponskom nivou "+" ulaza. S obzirom da je otpornost između ulaza idealnog OP-a beskonačno velika i da je "+" ulaz na masi, onda kažemo i da je "−" ulaz prividno (virtuelno) na masi, bez obzira na vrijednosti napona v_I i v_O . Drugim riječima, "−" ulaz je na virtuelnoj masi – otvorena veza na potencijalu mase ($v_d = 0$). Zahvaljujući tome, struja i_1 otpornika R_1 teče dalje kroz otpornik R_2 , tako da je $i_1 = i_2$ (sl. 1.1), odnosno:

$$\frac{v_I - v_d}{R_1} = \frac{v_d - v_O}{R_2}. \quad (1.1)$$

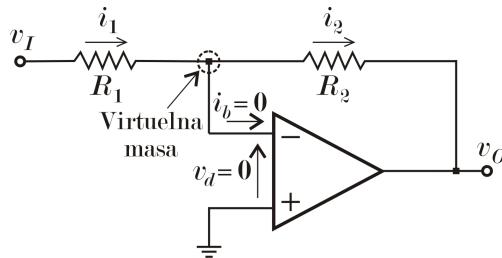
Kako je $v_d \approx 0$, onda je:

$$\frac{v_I}{R_1} = -\frac{v_O}{R_2}, \quad (1.2)$$

pa je naponsko pojačanje:

$$A = \frac{v_O}{v_I} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (1.3)$$

Dakle, naponsko pojačanje A invertujućeg pojačavača zavisi od odnosa otpornosti R_2/R_1 i ne zavisi od sopstvenog pojačanja A_0 OP-a u otvorenoj petlji. Negativni predznak označava fazni pomjeraj izlaznog i ulaznog napona od π radijana. Modulo pojačanja može da bude $|A| > 1$, kada je $R_2 > R_1$, ili $|A| < 1$, za $R_2 < R_1$. Veoma širok skup vrijednosti otpornosti R_1 i R_2



Slika 1.1. Invertujući pojačavač

daje istu vrijednost pojačanja A . Tako, na primjer, pri svim sljedećim parovima (R_2, R_1) : $(10 \text{ k}\Omega, 1 \text{ k}\Omega)$, $(1 \text{ k}\Omega, 100 \Omega)$, ..., $(100 \text{ k}\Omega, 10 \text{ k}\Omega)$ dobijamo $A = -10$.

Ulagna otpornost invertujućeg pojačavača jednaka je odnosu ulaznog napona i ulazne struje, odnosno:

$$R_I = \frac{v_I}{(v_I - v_d)/R_1} \approx R_1, \quad (1.4)$$

jer je $v_d \approx 0$ (s obzirom da je $v_d \ll v_I$).

Izlazna otpornost invertujućeg pojačavača je $R_O \approx 0$.

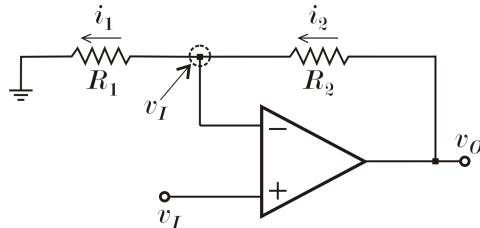
1.2. Neinvertujući pojačavač

Neinvertujući pojačavač dobijamo kada otpornik R_1 invertujućeg pojačavača uzemljimo, a ulazni napon primijenimo na "+" ulaz OP-a (sl. 1.2). Pod pretpostavkom da je OP idealan, struje kroz otpornike R_2 i R_1 su jednake ($i_2 = i_1$), odnosno:

$$\frac{v_O - v_I}{R_2} = \frac{v_I}{R_1}, \quad (1.5)$$

odakle proizlazi da je pojačanje napona:

$$A = \frac{v_O}{v_I} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (1.6)$$



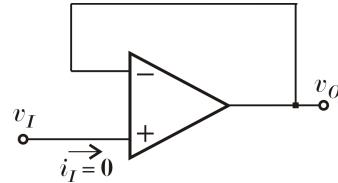
Slika 1.2. Neinvertujući pojačavač

U odnosu na pojačanje invertujućeg pojačavača, ovdje nema negativnog predznaka, što znači da su izlazni i ulazni napon u fazi. Pojačanje invertujućeg pojačavača je uvijek $A \geq 1$.

Specijalan slučaj neinvertujućeg pojačavača, za $R_2 = 0$ i $R_1 \rightarrow \infty$, jeste **naponsko sljedilo ili jedinični pojačavač** (sl. 1.3). Za naponsko sljedilo

nisu potrebni dodatni elementi jer je negativna povratna sprega direktno sa izlaza na invertujući ulaz. Ako je OP idealan, $v_d = 0$, pa je $v_O = v_I$, a pojačanje je:

$$A = v_O/v_I = 1. \quad (1.7)$$

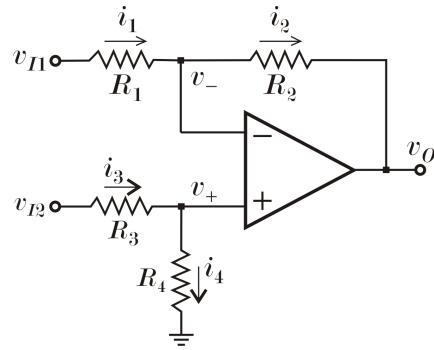


Slika 1.3. Naponsko sljedilo

1.3. Diferencijalni pojačavač

Diferencijalni pojačavač pojačava razliku ulaznih napona (sl. 1.4). Ulagni stepen svakog OP-a je diferencijalni pojačavač pa bi se OP mogao direktno koristiti za pojačanje razlike ulaznih signala. Ipak se tako ne koristi zato što OP ima veoma veliko pojačanje (10^5 do 10^7), te bi veoma male razlike ulaznih napona i nivoa šuma mogle da dovedu do velikih promjena izlaznog napona pa i do zasićenja izlaznog stepena. Zbog toga je potrebno kolo negativne povratne sprege kojim se ostvaruje zahtijevano i stabilno pojačanje potrebne razlike ulaznih napona.

Operacioni pojačavač u spoju diferencijalnog pojačavača (sl. 1.4) je kombinacija neinvertujućeg i invertujućeg pojačavača. Uz pretpostavku da je OP



Slika 1.4. Operacioni pojačavač u spoju diferencijalnog pojačavača

idealnan, onda su: $i_1 = i_2$, $i_3 = i_4$ i $v_- = v_+$. Izlazni napon može se dobiti primjenom metoda superpozicije, gdje je taj napon, za invertujući pojačavač:

$$v'_O = -\frac{R_2}{R_1}v_{I1}, \quad (1.8)$$

dok je za neinvertujući pojačavač:

$$v''_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{I2}. \quad (1.9)$$

Izlazni napon diferencijalnog pojačavača jednak je sumi napona datih sa (1.8) i (1.9):

$$v_O = v'_O + v''_O = \frac{R_4}{R_3} \frac{1 + R_2/R_1}{1 + R_4/R_3} v_{I2} - \frac{R_2}{R_1} v_{I1}. \quad (1.10)$$

Da bi signal srednje vrijednosti bio potisnut, potrebno je da ta pojačanja budu brojno jednaka. Tada će jedan zajednički signal za oba ulaza biti poništen, jer je pojačanje preko "–" ulaza negativno. Pojačanja će biti brojno jednaka ako je:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}. \quad (1.11)$$

Tada je:

$$v_O = \frac{R_2}{R_1} (v_{I2} - v_{I1}), \quad (1.12)$$

a diferencijalno pojačanje:

$$A_d = \frac{v_O}{v_{I2} - v_{I1}} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (1.13)$$

U praksi se obično uzima da su $R_3 = R_1$ i $R_4 = R_2$.

1.4. Pojačavači struje

Izlazna struja strujnog pojačavača (sl. 1.5) proporcionalna je ulaznoj struji. Uz pretpostavku da je OP idealan, struja kroz otpornik R_2 je i_I , a kroz otpornik R_1 je i_O , pa je $R_1 i_O = -R_2 i_I$, odakle proizlazi da je strujno pojačanje:

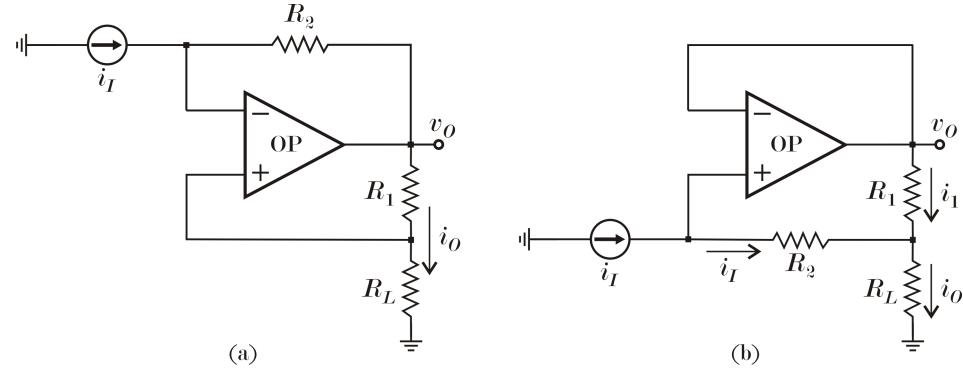
$$A_c = \frac{i_O}{i_I} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (1.14)$$

Dakle, strujno pojačanje je negativno, $A_c < 0$, pa je pojačavač invertujući.

Struja opterećenja i_O pojačavača na sl. 1.5b jednaka je zbiru struja kroz otpornike R_1 i R_2 , odnosno $i_O = i_I + i_1 = i_I + i_I R_2 / R_1$, odakle proizlazi strujno pojačanje neinvertujućeg strujnog pojačavača:

$$A_c = \frac{i_O}{i_I} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (1.15)$$

U oba slučaja, struja opterećenja ne zavisi od otpornosti opterećenja R_L i proporcionalna je ulaznoj struji i_I . Iznosi strujnih pojačanja jednaki su naponskim pojačanjima odgovarajućih naponskih pojačavača.



Slika 1.5. Invertujući (a) i neinvertujući (b) strujni pojačavač

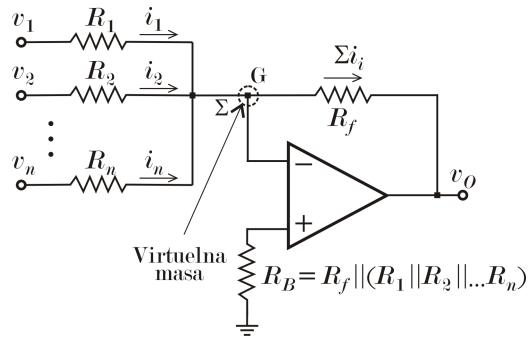
1.5. Sabirač

Sabirač analognog napona prikazan je na sl. 1.6. Izlazni napon je:

$$v_O = -R_f \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{R_i}, \quad (1.16)$$

gdje su v_i/R_i struje kroz otpornike R_i . Sve ove struje se sabiraju u tački G (virtuelna masa) pa se ova tačka često zove sumirajuća tačka. Specijalno, kada su otpornosti svih otpornika u ulaznom kolu jednake, to jest $R_i = R$ ($i = 1, \dots, n$), onda je:

$$v_O = -\frac{R_f}{R}(v_1 + v_2 + \dots + v_n). \quad (1.17)$$



Slika 1.6. Analogni sabirač

Zbog negativnog pojačanja $-R_f/R$, izlazni napon je suprotan po fazi sa linearnom kombinacijom ulaznih napona. Ako je potreban izlazni napon sa pozitivnim znakom, izlaz v_O sabirača na sl. 1.6 možemo primijeniti na ulaz jediničnog invertujućeg pojačavača. Jednostavnije rješenje je sa neinvertujućim spojem OP-a (sl. 1.7). Ovdje je:

$$v_O = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) v_+ . \quad (1.18)$$

Ulagna struja OP-a je nula, pa je:

$$\sum_{i=1}^n \frac{v_i - v_+}{R_i} = 0, \quad (1.19)$$

odakle proizlazi:

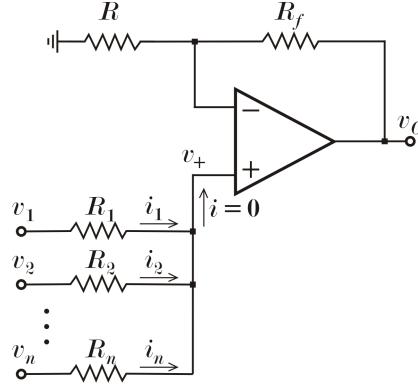
$$v_+ = R_e \left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \dots + \frac{v_n}{R_n} \right), \quad (1.20)$$

gdje je:

$$\frac{1}{R_e} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}. \quad (1.21)$$

Ako je $R_1 = R_2 = \dots = R_n$, kombinjujući (1.18) i (1.20) dobijamo:

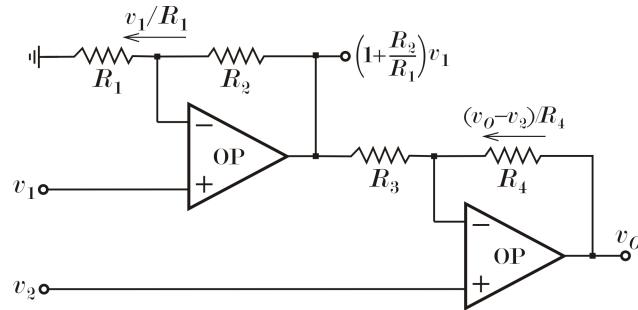
$$v_O = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) (v_1 + v_2 + \dots + v_n). \quad (1.22)$$



Slika 1.7. Sabirač sa neinvertujućim spojem OP-a

1.6. Oduzimač

Kolo razlike dva napona je u stvari diferencijalni pojačavač (sl. 1.4) koji je kombinacija invertujućeg i neinvertujućeg pojačavača napona. Ozbiljni nedostatak ovog kola je u veoma različitim ulaznim otpornostima i dosta malom $CMRR$ faktoru. Zbog toga je češće kolo oduzimača sa dva OP-a (sl. 1.8). Oduzimač se sastoji od dva neinvertujuća pojačavača tako da su ulazne otpornosti prema oba ulaza veoma velike.



Slika 1.8. Kolo za oduzimanje

Struje kroz otpornike R_3 i R_4 su jednake, pa je:

$$\frac{v_O - v_2}{R_4} = \frac{v_2 - (1 + R_2/R_1)v_1}{R_3}, \quad (1.23)$$

odakle dobijamo:

$$v_O = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) v_2 - \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_1. \quad (1.24)$$

Uslov je da su $R_1 = R_2$ i $R_3 = R_4$. Tada je:

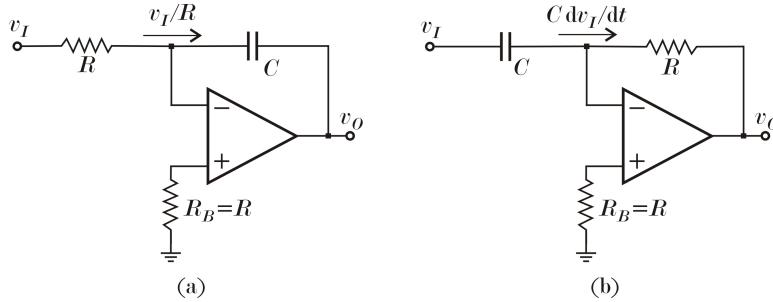
$$v_O = 2(v_2 - v_1). \quad (1.25)$$

1.7. Integrator i diferencijator

Ova kola posjeduju kondenzator u kolu povratne sprege invertujućeg pojačavača. Ako je kondenzator na mjestu otpornika R_2 , onda je to integrator (sl. 1.9a), a ako je umjesto otpornika R_1 , onda imamo diferencijator.

Struja kroz kondenzator integratora je v_I/R , pa je:

$$v_O(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_I(t) dt + v_C(0). \quad (1.26)$$



Slika 1.9. Integrator (a) i diferencijator (b)

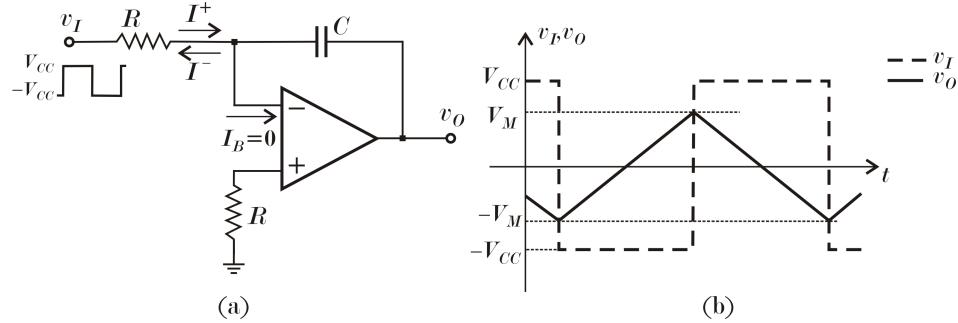
Takvo kolo poznato je pod imenom **Milerov integrator**. Ako na ulaz Milerovog integratora, umjesto konstantnog napona, primijenimo povorku kvadratnih impulsa (sl. 1.10), na izlazu ćemo dobiti simetričan trougaoni napon. Kada je $v_I = -V_{CC}$, kondenzator C se puni strujom $I^- = V_{CC}/R$, pa je:

$$v_O(t) = -V_M + \frac{V_{CC}}{RC} t. \quad (1.27)$$

Kada je $v_I = +V_{CC}$, struja kroz kondenzator je $I^+ = V_{CC}/R$, a:

$$v_O(t) = V_M - \frac{V_{CC}}{RC} t, \quad (1.28)$$

gdje je V_M amplituda izlaznog trougaonog napona.



Slika 1.10. Generator trougaonog napona (a) i impulsni oblici na ulazu i izlazu (b)

1.8. Logaritamski i antilogaritamski pojačavač

Kolo za logaritmovanje (sl. 1.11) na izlazu daje napon koji je proporcionalan logaritmu ulaznog napona. U kolu povratne sprege, između "—" ulaza i izlaza OP-a, je dioda. Struja diode određena je sa:

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{v_D}{nV_t}} - 1 \right) \approx I_S e^{\frac{v_D}{nV_t}}, \quad (1.29)$$

gdje su I_S inverzna struja zasićenja, $1 \leq n \leq 2$ korekcionii faktor karakteristike $i_D = f(v_D)$, a V_t termički potencijal. Kad je dioda provodna, prvi član je mnogo veći od jedan. Pošto je ulazna struja OP-a nula, struje kroz otpornik R i diodu D su jednake, odnosno:

$$\frac{v_I}{R} = i_D. \quad (1.30)$$

S obzirom da je $v_O = -v_D$, na osnovu (1.29) i (1.30) dobijamo:

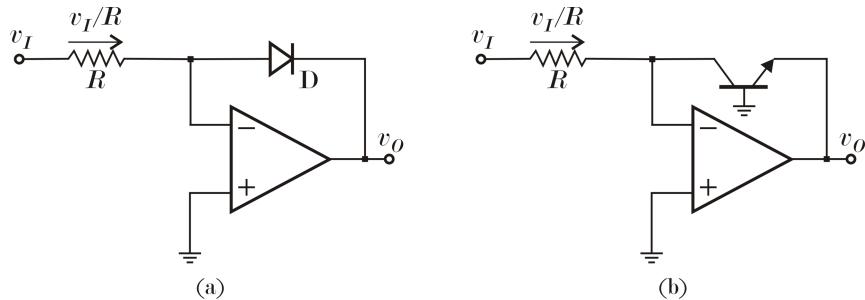
$$v_O = -nV_t \ln \frac{v_I}{RI_S} = -nV_t \ln v_I + nV_t \ln(RI_S). \quad (1.31)$$

Korekcionii faktor n zavisi od struje diode zbog rekombinacione komponente struje. Uticaj ovog faktora može se eliminisati primjenom tranzistora umjesto diode (sl. 1.11b), jer u kolektorskoj strui preovladava difuziona komponenta. Pošto je:

$$i_C = I_{CS} e^{\frac{v_{BE}}{V_t}} = \frac{v_I}{R}, \quad (1.32)$$

izlazni napon je:

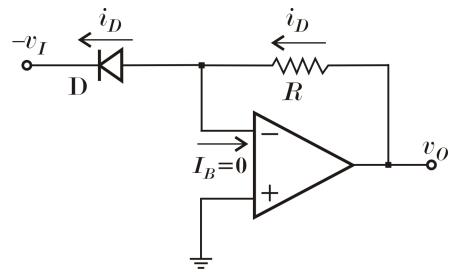
$$v_O = -v_{BE} = V_t \ln \frac{v_I}{I_{CS} R} = -V_t \ln v_I + V_t \ln(I_{CS} R). \quad (1.33)$$



Slika 1.11. Kola za logaritmovanje sa diodom (a) i tranzistorom (b)

Treba istaći da napon v_O zavisi od temperature, jer je promjena napona V_t linearna funkcija temperature.

Eksponencijalni (antilogaritamski) pojačavač (sl. 1.12) ima izlazni napon koji je eksponencijalna funkcija ulaznog napona.



Slika 1.12. Eksponencijalni pojačavač

Pošto je $v_O = Ri_D$ i $v_D = v_I$, s obzirom na (1.29), izlazni napon je:

$$v_O = RI_S e^{\frac{v_I}{nV_t}} \quad (1.34)$$

I ovdje se nameće problem temperaturne zavisnosti izlaznog napona. Postoje tehnike za temperaturnu stabilizaciju logaritamskih i eksponencijalnih pojačavača.