



Elektronički sklopovi – Operacijsko pojačalo

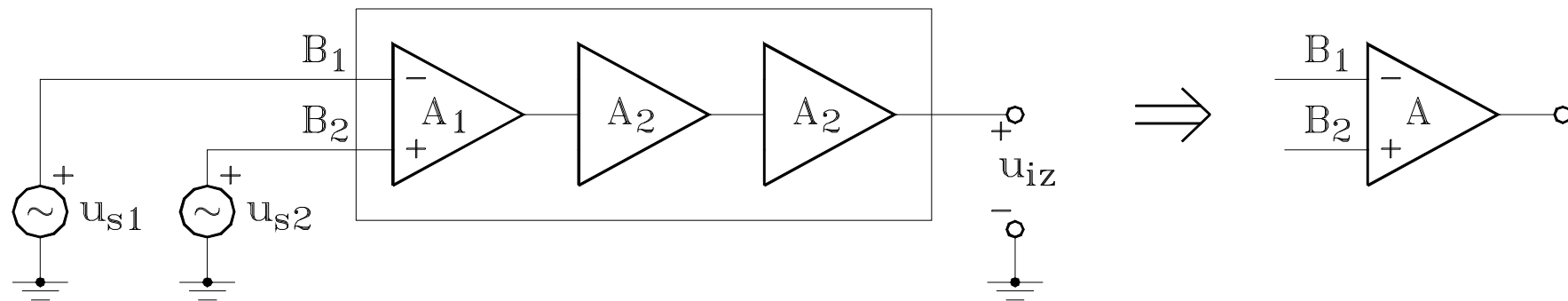
Elektronika – 11. predavanje

Operacijsko pojačalo

- Mogućnost vršenja nekih matematičkih i drugih operacija: zbrajanje, oduzimanje, integriranje, deriviranje ulaznog signala...
- Tri stupnja:
 - ulazni stupanj (velik ulazni otpor i pojačanje signala, mogućnost dva ulazna signala);
 - srednji stupanj (veoma veliko pojačanje);
 - izlazni stupanj (malen izlazni otpor i velik hod izlaznog signala).
- Idealno operacijsko pojačalo trebalo bi imati osobine:
 - pojačanje beskonačno (i negativno);
 - ulazni otpor beskonačan;
 - izlazni otpor nula;
 - prijenos svih frekvencija od nule do beskonačnosti (istosmjerno pojačalo).



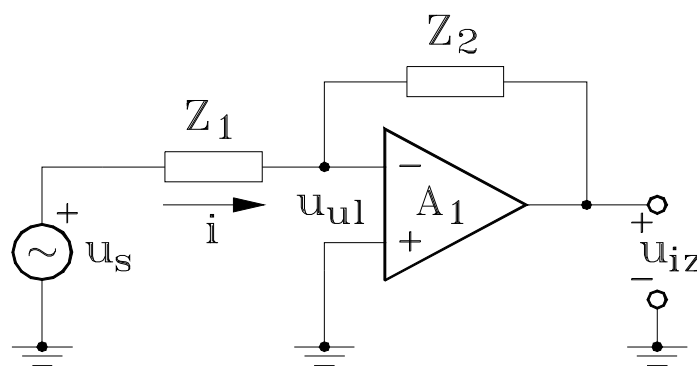
- Shematski prikaz operacijskog pojačala:



- Pojačanje: 10^4 do 10^5 .
- Ulazni otpor: $0,1 \text{ M}\Omega$ do $1 \text{ M}\Omega$.
- Izlazni otpor: oko 50Ω .

Operacijsko pojačalo s jednim, invertirajućim, ulazom

- Neinvertirajući ulaz (uobičajena oznaka “+”) je uzemljen.
- Na invertirajući ulaz (oznaka “-”) doveden je signal.



$$R_{ul} = \infty$$

$$R_{iz} = 0$$

$$|A| = \left| \frac{u_{iz}}{u_{ul}} \right| < 0$$

$$A_{op} = \frac{u_{iz}}{u_s}$$

- Primjenom načela superpozicije:

$$u_{ul} = u_s \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} + u_{iz} \cdot \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}.$$

(1)

- Kako je:

$$u_{ul} = \frac{u_{iz}}{A}, \quad (2)$$

za pojačanje operacijskog pojačala A_{OP} slijedi:

$$A_{OP} = \frac{u_{iz}}{u_s} = \frac{A \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}}{1 - A \cdot \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}} = -\frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{A} \cdot \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right)} = -\frac{Z_2}{Z_1} \Big|_{A \rightarrow \infty} \quad (3)$$

- Iz (3) je vidljivo da pri velikom pojačanju A pojačanje operacijskog pojačala A_{OP} ovisi samo o vanjskim impedancijama Z_1 i Z_2 .

- **Drugi pristup:** odredi se ulazna impedancija Z_{ul} :

$$Z_{ul} = \frac{u_{ul}}{i}. \quad (4)$$

- Struja i se odredi iz pada napona na impedanciji Z_2 :

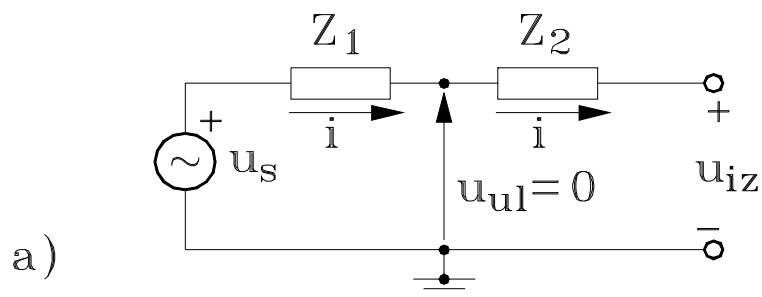
$$i = \frac{u_{ul} - u_{iz}}{Z_2} = \frac{u_{ul} - A \cdot u_{ul}}{Z_2} = \frac{u_{ul} \cdot (1 - A)}{Z_2}, \quad (5)$$

odakle slijedi za ulaznu impedanciju:

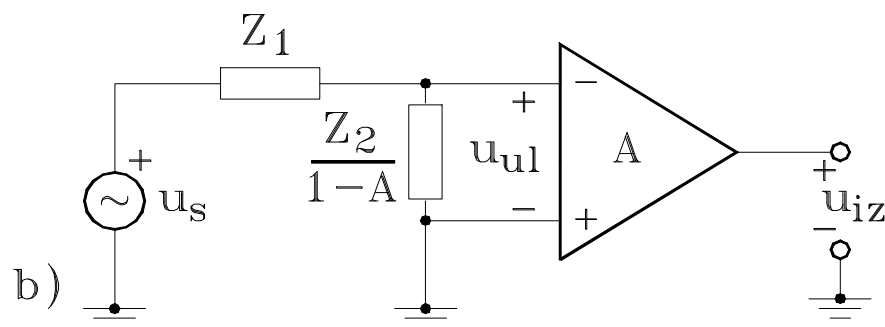
$$Z_{ul} = \frac{Z_2}{1 - A} \Big|_{A \rightarrow -\infty} = 0. \quad (6)$$

- Na temelju izraza (6) dolazimo do zaključka da **na ulazu u pojačalo A vlada tzv. virtualna nula**.
- **Millerov efekt** – impedancija Z_2 preslikava se na ulaz pojačala umanjena $(1-A)$ puta.

■ Nadomjesni sklop operacijskog pojačala:



a) Na temelju načela virtualne nule



b) Na temelju Millerovog efekta
(preslikavanja impedancije Z_2)

■ Iz prvog nadomjesnog sklopa je:

$$i = \frac{u_s}{Z_1} \quad (7)$$

■ Ista struja teče i kroz izlazni krug:

$$u_{iz} = -i \cdot Z_2 = -\frac{Z_2}{Z_1} \cdot u_s \quad (8)$$

- Pojačanje operacijskog pojačala je tad:

$$A_{OP} = \frac{u_{iz}}{u_s} = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad (9)$$

- Iz drugog nadomjesnog sklopa:

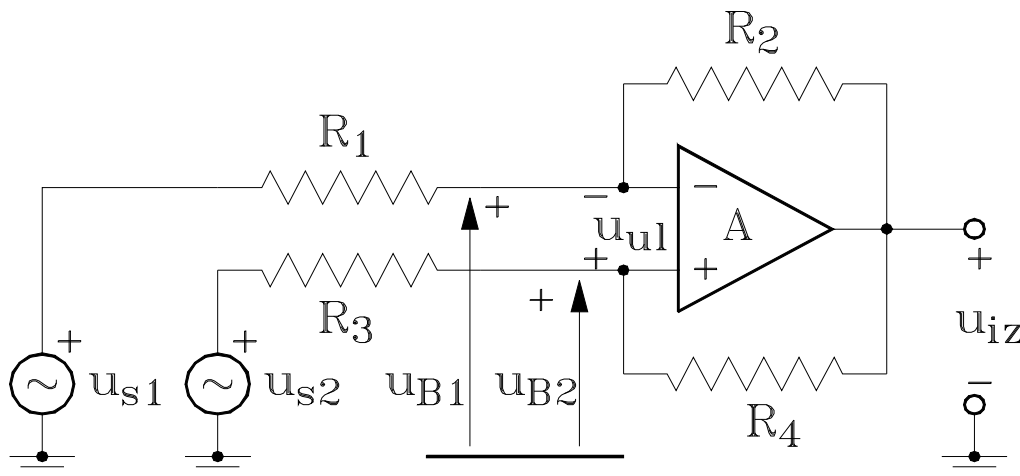
$$u_{ul} = u_s \cdot \frac{\frac{Z_2}{1-A}}{Z_1 + \frac{Z_2}{1-A}}, \quad (10)$$

$$u_{iz} = A \cdot u_{ul} = A \cdot u_s \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + (1-A) \cdot Z_1}, \quad (11)$$

$$A_{OP} = \frac{u_{iz}}{u_s} = -\frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{A} \cdot (1 + \frac{Z_2}{Z_1})}. \quad (12)$$



Operacijsko pojačalo s dva ulaza



■ Primjenom superpozicije:

$$u_{B1} = u_{s1} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + u_{iz} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (13)$$

$$u_{B2} = u_{s2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} + u_{iz} \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad (14)$$

$$u_{ul} = u_{B2} - u_{B1} \quad (15)$$

$$u_{iz} = A \cdot u_{ul} = A \cdot (u_{B2} - u_{B1}) \quad (16)$$

$$u_{iz} = \frac{A}{1 - A \cdot \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)} \cdot \left(u_{s2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} - u_{s1} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (17)$$

- Pojačanje $A=u_{iz}/u_{ul}$, gdje je napon u_{ul} pozitivan na neinvertirajućem ulazu te je pojačanje A pozitivno.
- Uz $u_{s2}=0$, $R_3=0$ i $R_4=\infty$:

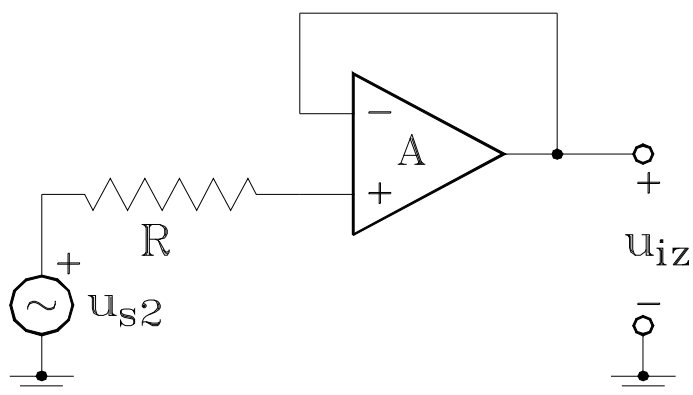
$$A_{OP} = \frac{u_{iz}}{u_{s1}} = - \frac{A \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}}{1 + A \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \bigg|_{A \rightarrow \infty} = - \frac{R_2}{R_1} \quad (18)$$



Primjeri primjene operacijskog pojačala

a) Naponsko sljedilo

a)



$$U_{s1}=0, R_1=\infty, R_2=0, R_4=\infty$$

Uvrštavajući u (13) i (14) dobija se:

$$u_{B1} = u_{iz},$$

$$u_{B2} = u_{s2},$$

odakle je:

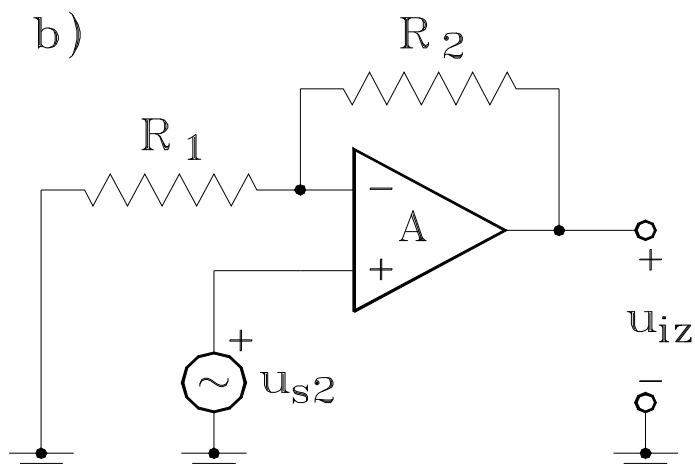
$$u_{iz} = A \cdot (u_{B2} - u_{B1}) = A \cdot u_{s2} - A \cdot u_{iz}$$

$$u_{iz} = \frac{A}{1 + A} \cdot u_{s2}$$

$$A_{OP} = \frac{A}{1 + A}$$

Naponsko sljedilo - izlazni napon slijedi ulazni po veličini i fazi.

b) Neinvertirajuće pojačalo



$$u_{s1}=0, R_3=0, R_4=\infty$$

Uvrštavajući u (13) i (14) dobija se:

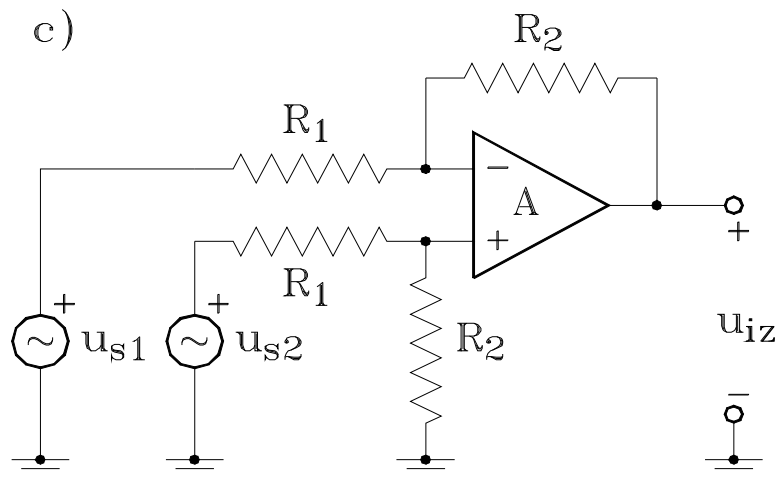
$$u_{B1} = u_{iz} \cdot \frac{R_1}{R_2 + R_1}$$

$$u_{B2} = u_{s2}$$

$$u_{iz} = A \cdot u_{s2} - A \cdot u_{iz} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$u_{iz} = \frac{A}{1 + A \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \cdot u_{s2} \Big|_{A \rightarrow \infty} = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \cdot u_{s2}$$

c) Diferencijalno pojačalo



$$u_{B1} = u_{s1} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} + u_{iz} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

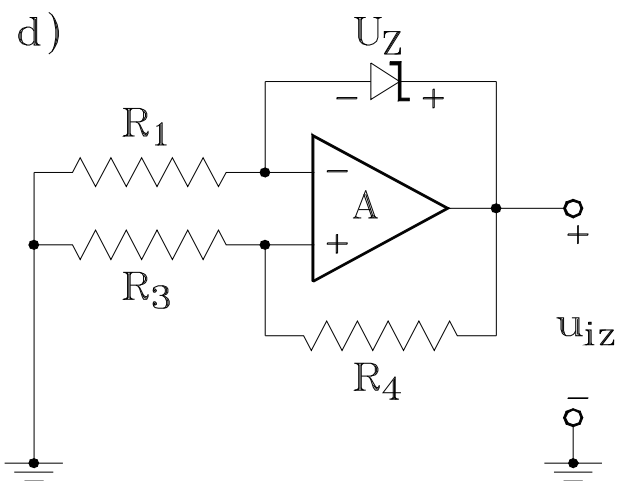
$$u_{B2} = u_{s2} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$u_{iz} = A \cdot u_{s2} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - A \cdot u_{s1} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - A \cdot u_{iz} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$u_{iz} = \frac{A \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}}{1 + A \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \cdot (u_{s2} - u_{s1}) \quad \Big|_{A \rightarrow \infty}$$

$$u_{iz} = \frac{R_2}{R_1} \cdot (u_{s2} - u_{s1})$$

d) Naponski izvor



$$u_{s1} = u_{s2} = 0$$

$$u_{B1} = u_{iz} - u_z$$

$$u_{B2} = u_{iz} \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

$$u_{iz} = A \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4} \cdot u_{iz} - A \cdot u_{iz} + A \cdot u_z$$

$$u_{iz} = \frac{A}{1 + A \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}} \cdot u_z = \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right) \cdot u_z \quad \Big|_{A \rightarrow \infty}$$