

Osnove elektronike

III semestar

NEGATIVNA POVRATNA SPREGA

Negativna povratna sprega

Veličina sa izlaza (napon ili struja) se dovodi na ulazni priključak. Pojačanje po krugu koji obuhvata pojačavač i kolo povratne sprege se naziva kružno pojačanje i označava sa βA .

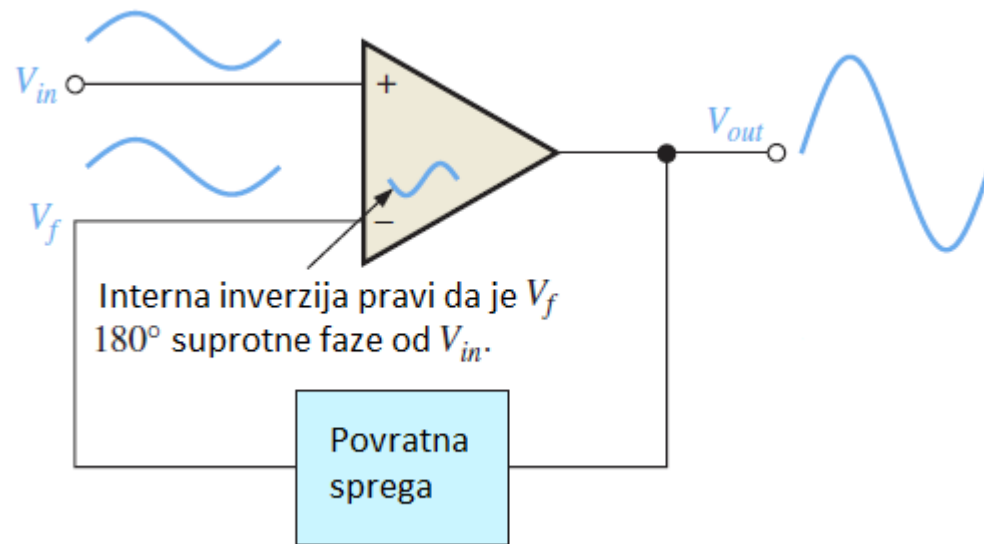
Povratna sprega može biti:

- ❖ negativna (sa $\beta A < 0$, koja smanjuje izlaznu veličinu)
- ❖ pozitivna (sa $\beta A > 0$, koja povećava izlaznu veličinu)
- ❖ pozitivna (sa $\beta A = 1$, za oscilatore)

Najčešće se koriste četiri tipa negativne povratne sprege:

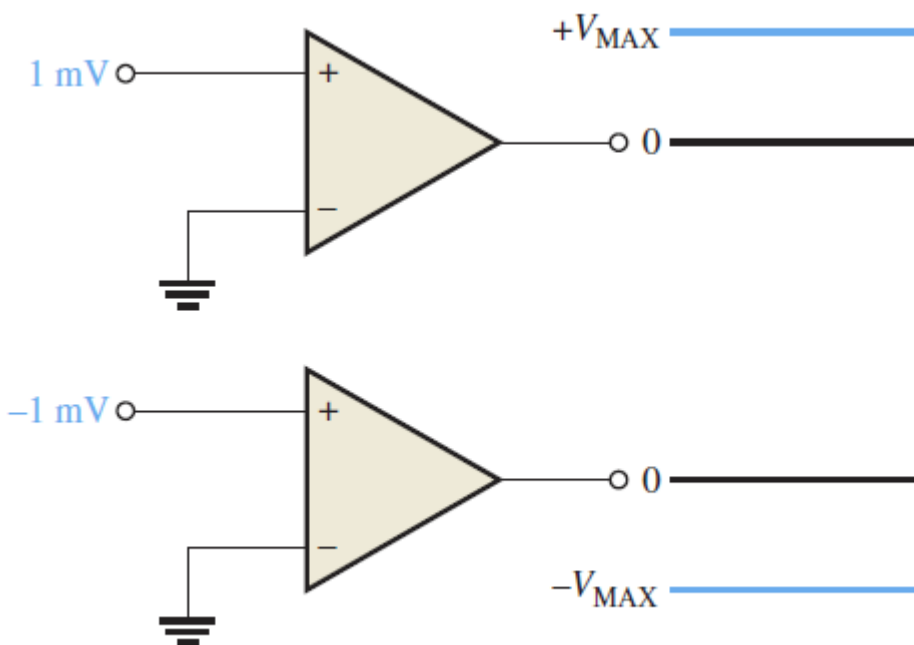
- ❖ paralelno-naponska (vraćena veličina u β kolo je napon)
- ❖ redno-naponska (vraćena veličina u β kolo je napon)
- ❖ paralelno-strujna (vraćena veličina u β kolo je struja)
- ❖ redno-strujna (vraćena veličina u β kolo je struja)

Princip negativne povratne sprege

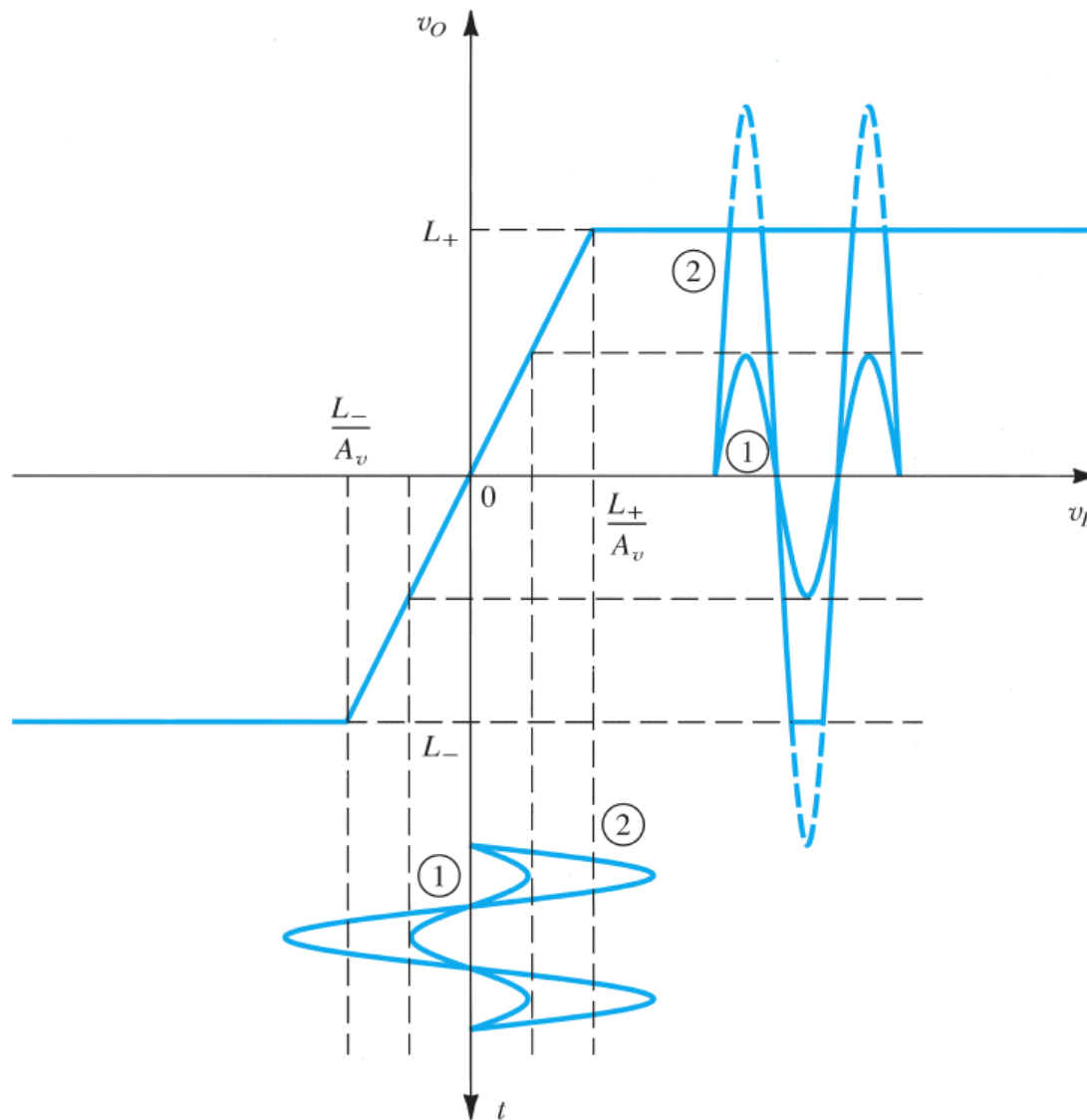


Svrha negativne povratne sprege

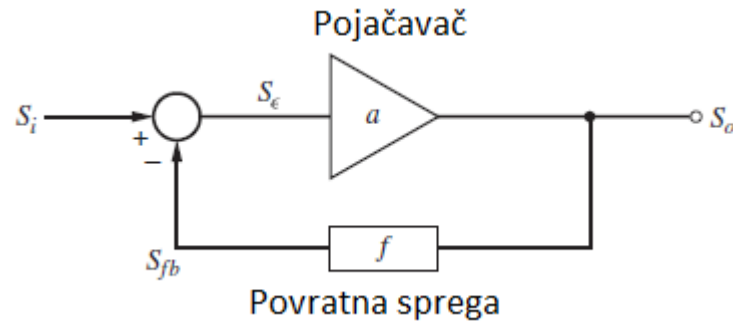
Bez negativne povratne sprege, mali ulazni napon bi odveo izlaz operacionog pojačavača u pozitivno ili negativno zasićenje, u zavisnosti od polariteta ulaznog napona.



Izbegavanje rada u zasićenju smanjenjem pojačanja



Opšta negativna povratna sprega



$$S_o = aS_\epsilon$$

$$S_{fb} = fS_o$$

$$S_\epsilon = S_i - S_{fb}$$

$$S_\epsilon = S_i - fS_o$$

$$S_o = aS_i - afS_o$$

$$T = af$$

$$\frac{S_o}{S_i} = A = \frac{a}{1 + af}$$

$$\frac{S_o}{S_i} = A = \frac{a}{1 + T}$$

$$T \gg 1$$

$$A \simeq \frac{1}{f}$$

$$S_\epsilon = S_i - f \frac{aS_i}{1 + af}$$

$$\frac{S_\epsilon}{S_i} = \frac{1}{1 + af} = \frac{1}{1 + T}$$

$$T \gg 1$$

$$\frac{S_\epsilon}{S_i} \simeq 0$$

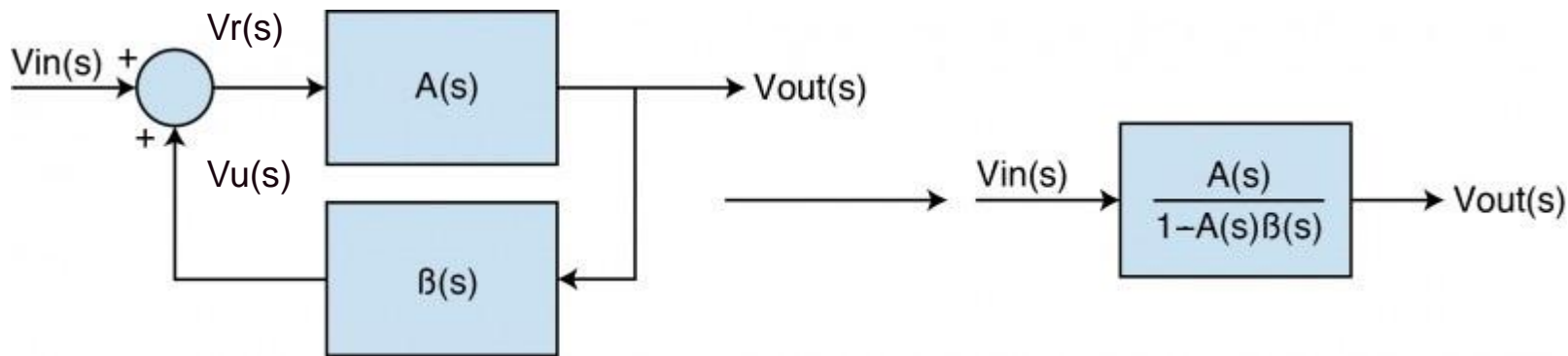
$$S_{fb} = fS_i \frac{a}{1 + af}$$

$$\frac{S_{fb}}{S_i} = \frac{T}{1 + T}$$

$$T \gg 1$$

$$\frac{S_{fb}}{S_i} \simeq 1$$

Opšta povratna sprega



$$\beta A = A(s) \beta(s) = -af$$

$$A_r = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{A_{br}}{1 - \beta A}$$

Izračunavanje pojačanja, ulazne i izlazne impedanse sa reakcijom

Pojačanje, ulazna i izlazna impedansa sa reakcijom u kolima sa povratnom spregom se mogu izračunati na klasičan način:

- ❖ metodom napona čvorova (sporo)
- ❖ prvim i drugim Kirhofovim zakonom (sporije)
- ❖ metodom konturnih struja (najsporije)

Pojačanje sa reakcijom se može brže izračunati:

- ❖ izračunavanjem ekvivalentnog četvoropola pojačavača
- ❖ izračunavanjem ekvivalentnog četvoropola povratne sprege
- ❖ zamenom izračunatih veličina u formulu sa četvoropolima

Pojačanje sa reakcijom se može još brže alternativno izračunati:

- ❖ izračunavanjem kružnog pojačanja βA
- ❖ izračunavanjem pojačanja “bez reakcije”
- ❖ zamenom izračunatih veličina u formulu za pojačanje

Izračunavanje pojačanja, ulazne i izlazne impedanse sa reakcijom

Pojačanje sa reakcijom se može najbrže izračunati:

- ❖ izračunavanjem kružnog pojačanja βA
- ❖ izračunavanjem pojačanja sa beskonačnim βA
- ❖ izračunavanjem pojačanja sa nultim βA
- ❖ zamenom izračunatih veličina u asimptotsku formulu

Ulazna impedansa sa reakcijom se može brže izračunati:

- ❖ izračunavanjem kružnog pojačanja βA
- ❖ izračunavanjem ulazne impedanse “bez reakcije”
- ❖ zamenom izračunatih veličina u formulu za ulaznu impedansu

Izlazna impedansa sa reakcijom se može brže izračunati:

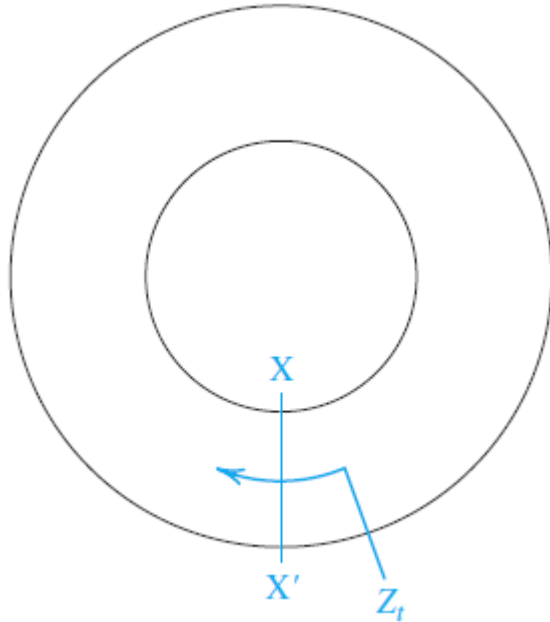
- ❖ izračunavanjem kružnog pojačanja βA
- ❖ izračunavanjem izlazne impedanse “bez reakcije”
- ❖ zamenom izračunatih veličina u formulu za izlaznu impedansu

Izračunavanje kružnog pojačanja

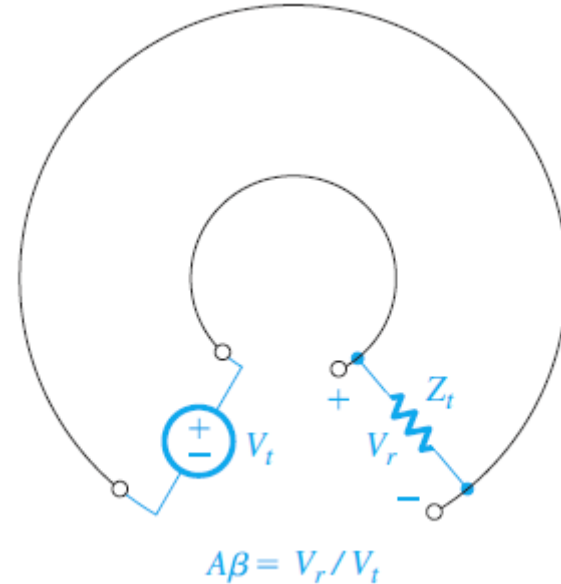
Izračunavanje kružnog pojačanja βA obuhvata:

- ❖ crtanje modela za male signale pojačavača sa povratnom spregom
- ❖ uočavanje βA kruga
- ❖ uočavanje smera toka signala u βA krugu
- ❖ presecanje βA kruga na pogodnom mestu (više o tome na sledećoj strani)
- ❖ povezivanje pobudnog generatora na preseku u smeru toka signala
- ❖ određivanje otpornosti Z_t koju “vidi” pobudni generator
- ❖ povezivanje otpornosti Z_t sa strane preseka βA kruga suprotne pobudnom generatoru
- ❖ izračunavanje kružnog pojačanja βA kao odnosa napona na otpornosti Z_t i napona pobudnog generatora
- ❖ Ako je $\beta A < 0$, primenjena je negativna povratna sprega.

Izračunavanje kružnog pojačanja



$$A\beta = \frac{V_r}{V_t}$$

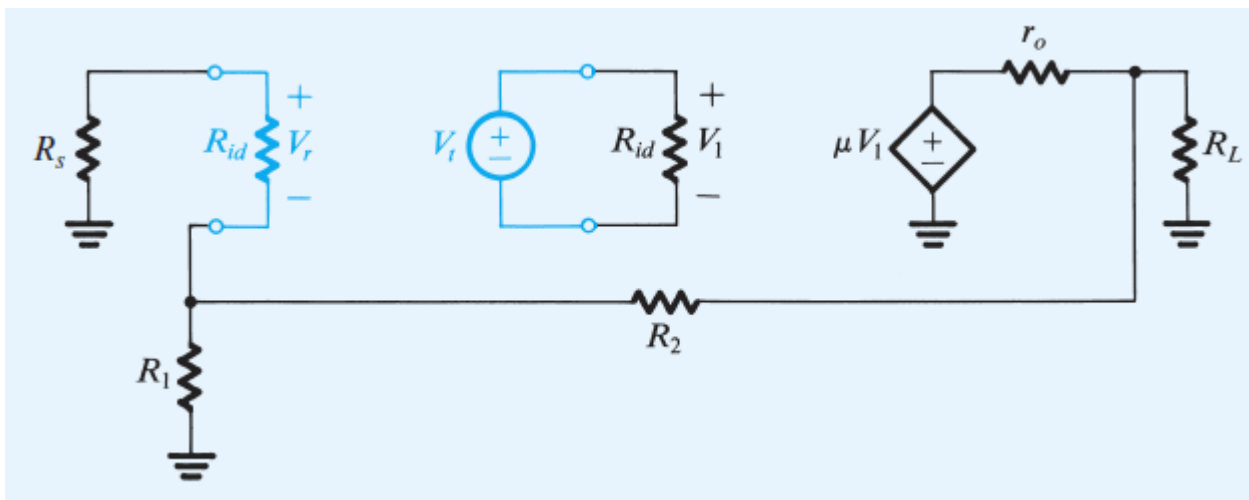
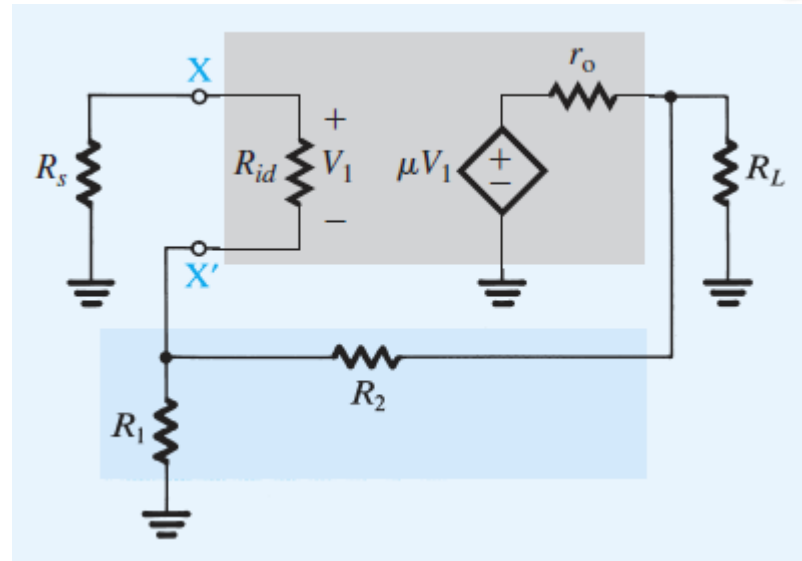
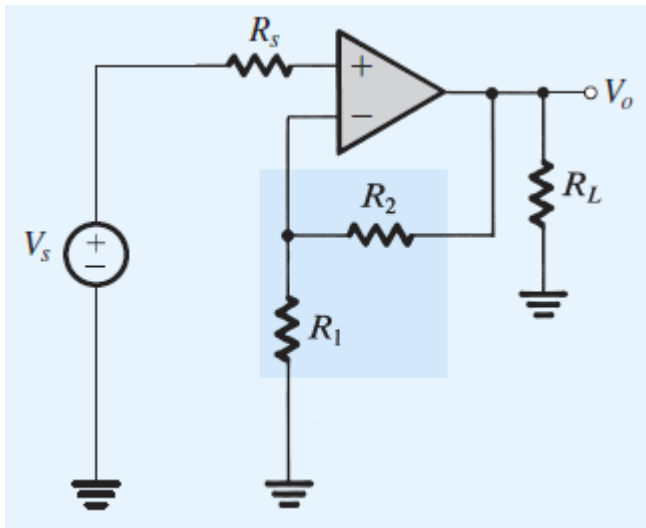


$$A\beta = V_r / V_t$$

Pogodna mesta za presecanje βA kruga su:

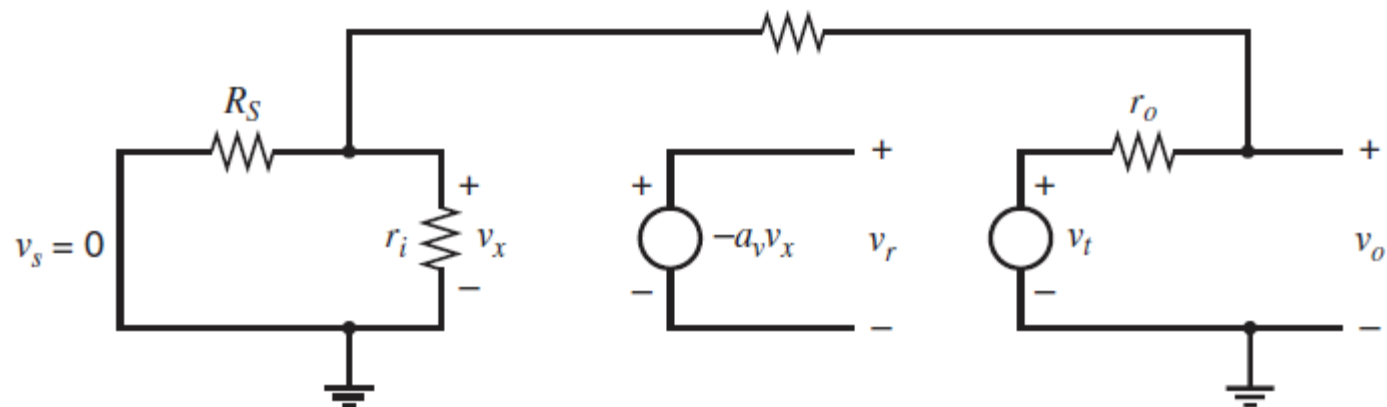
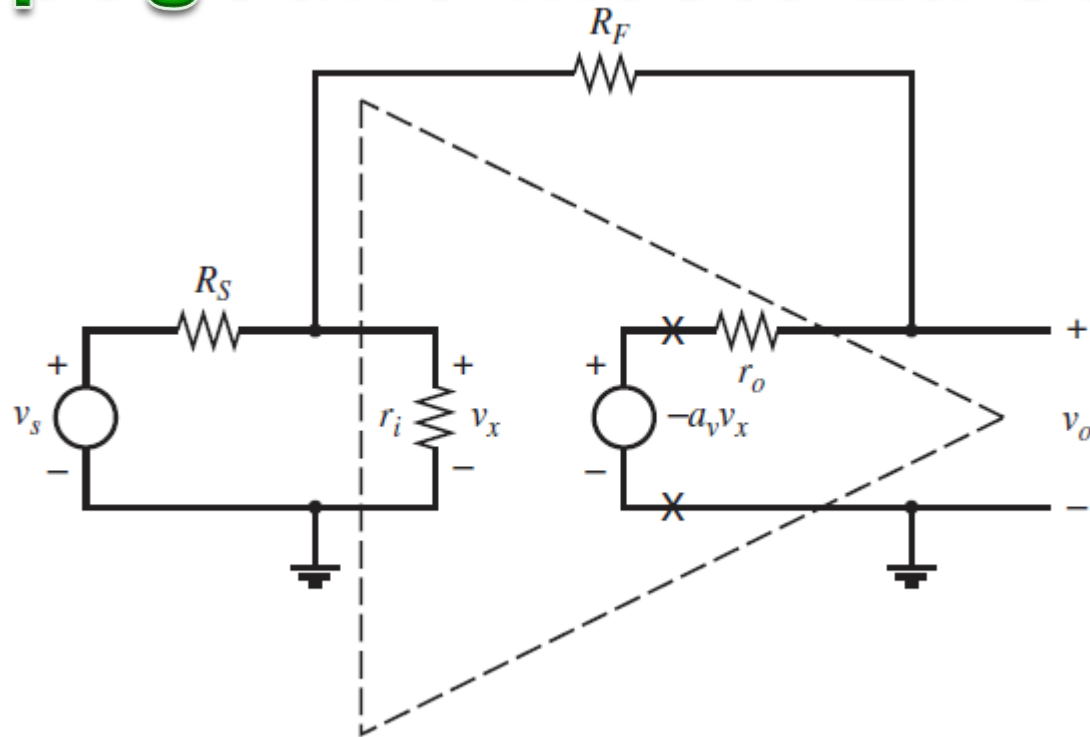
- ❖ ulaz pojačavača pre ulazne otpornosti $Z_t = R_u$
- ❖ ulaz pojačavača posle ulazne otpornosti $Z_t \rightarrow \infty$
- ❖ izlaz pojačavača posle kontrolisanog naponskog generatora jer je Z_t nebitan pošto je na krajevima naponskog generatora.

Izračunavanje kružnog pojačanja prvo pogodno mesto za sečenje

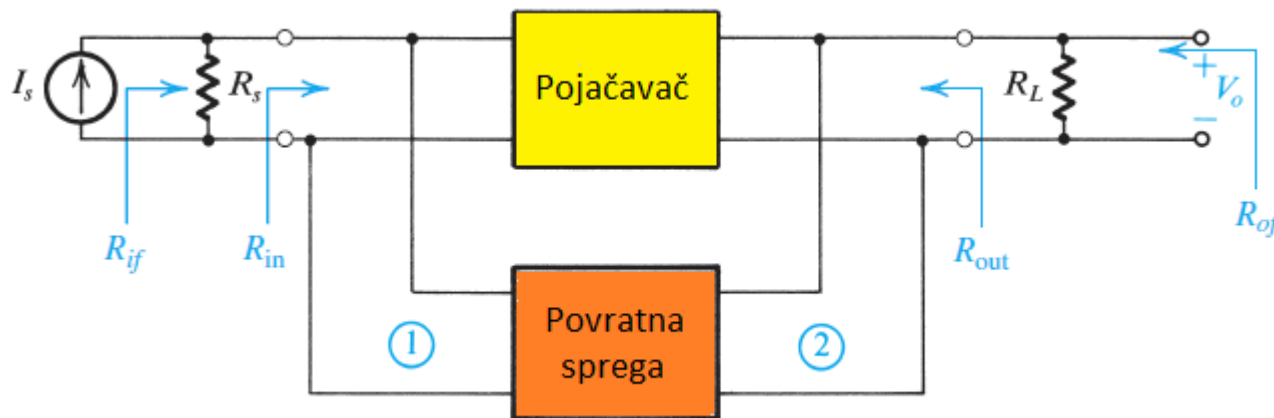


$$A\beta = \mu \frac{\{R_L \parallel [R_2 + R_1 \parallel (R_{id} + R_s)]\}}{\{R_L \parallel [R_2 + R_1 \parallel (R_{id} + R_s)]\} + r_o} \times \frac{[R_1 \parallel (R_{id} + R_s)]}{[R_1 \parallel (R_{id} + R_s)] + R_2} \times \frac{R_{id}}{R_{id} + R_s}$$

Izračunavanje kružnog pojačanja treće pogodno mesto za sečenje



Paralelno-naponska negativna povratna sprega

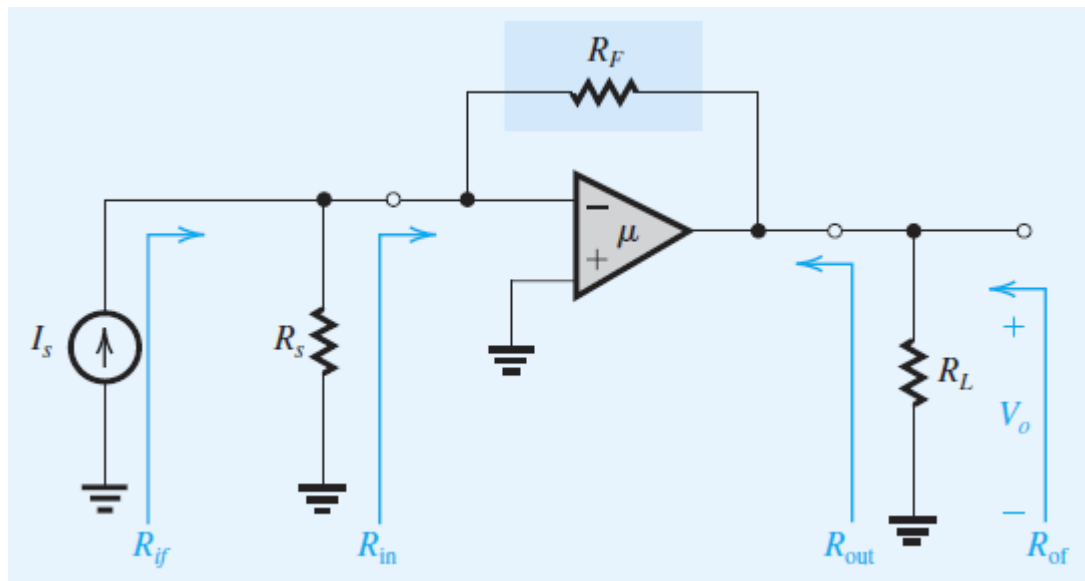


Paralelna sprega generatora, pojačavača i povratne sprega na ulazu (2 tačke koje pripadaju svakom elementu).

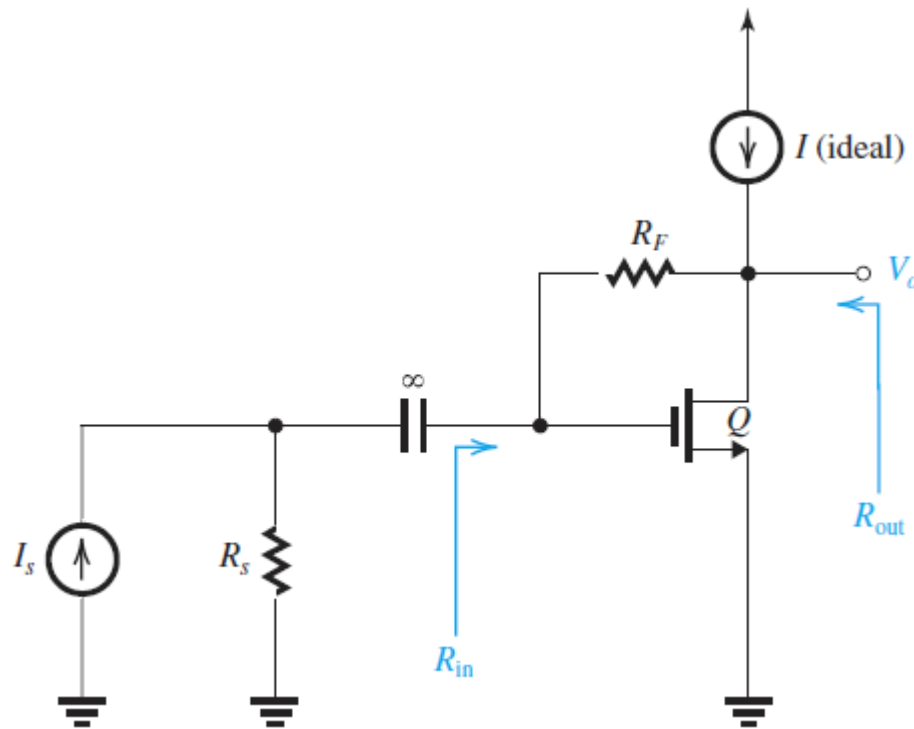
Naponska sprega potrošača, pojačavača i povratne sprega na izlazu (2 tačke koje pripadaju svakom elementu).

Vraćena veličina u kolo povratne sprega je napon.

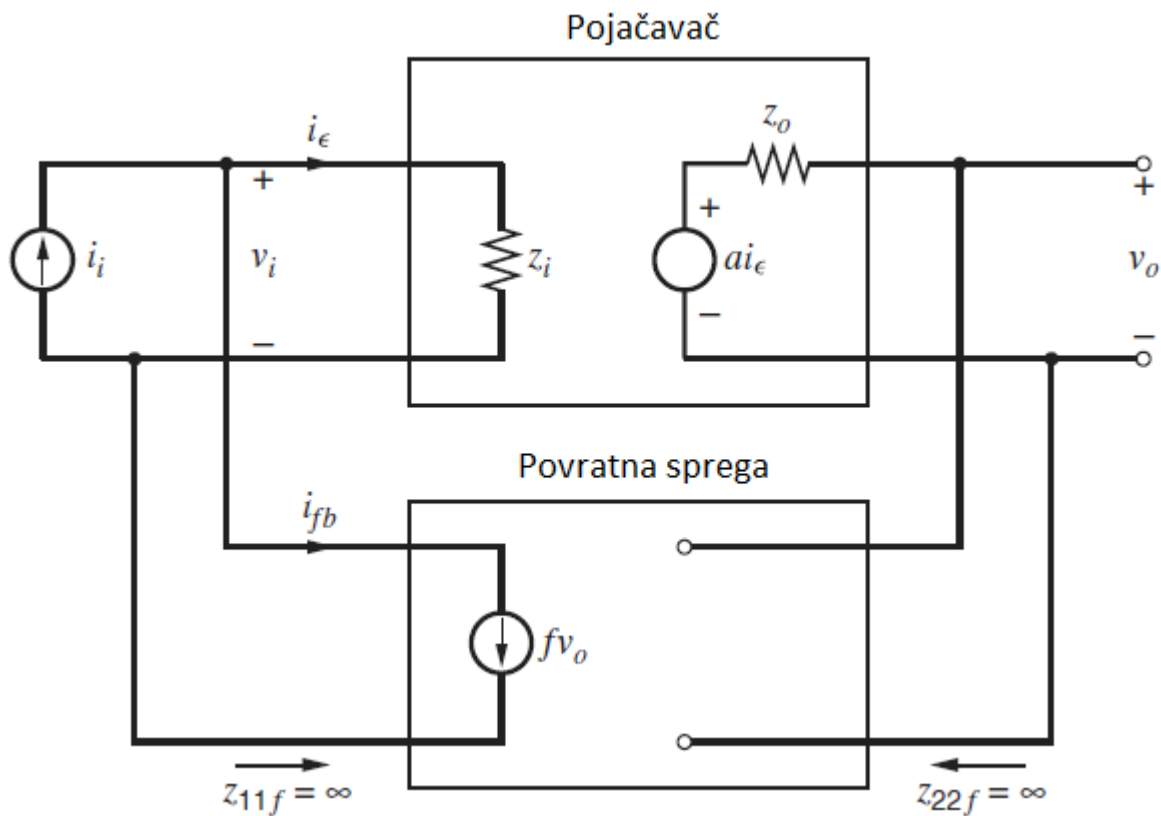
Paralelno-naponska negativna povratna sprega primer



Paralelno-naponska negativna povratna sprega primer



Pojačanje v_o/v_i paralelno-naponske NPS



$$a = \frac{v_o}{i_\epsilon}$$

$$f = \frac{i_{fb}}{v_o}$$

$$v_o = ai_\epsilon$$

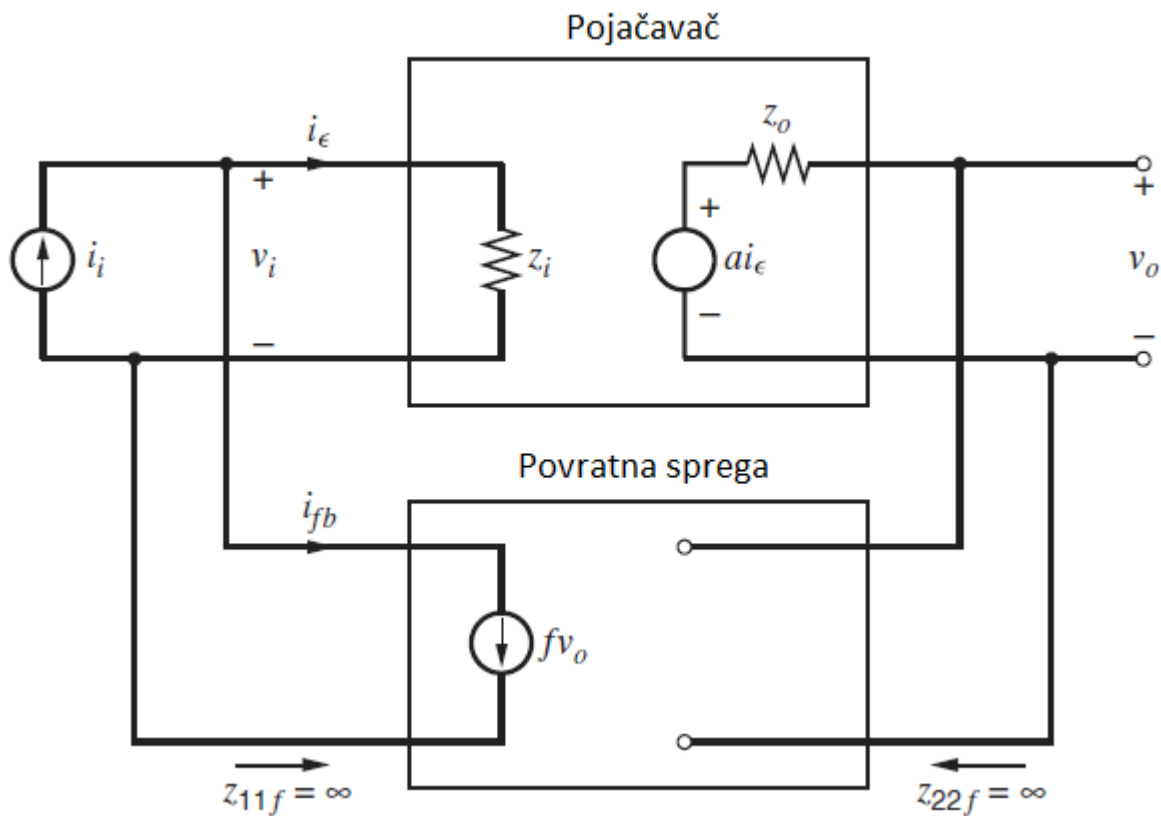
$$i_\epsilon = i_i - i_{fb}$$

$$i_\epsilon = i_i - fv_o$$

$$\frac{v_o}{a} = i_i - fv_o$$

$$\frac{v_o}{i_i} = \frac{a}{1 + af} = A$$

Ulazna Z_i i izlazna Z_o impedansa paralelno-naponske NPS



$$v_o = ai_e$$

$$\frac{v_o}{i_i} = \frac{a}{1 + af} = A$$

$$i_e = \frac{i_i}{1 + af}$$

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i}$$

$$Z_i = \frac{v_i}{i_e} \frac{1}{1 + af} = \frac{z_i}{1 + T}$$

$$T = af \quad T = -\beta A$$

$$Z_o = \frac{z_o}{1 + T}$$

Ekvivalentni četvoropol za pojačavač i povratnu spregu



$$i_1 = y_{11} v_1 + y_{12} v_2$$

$$i_2 = y_{21} v_1 + y_{22} v_2$$

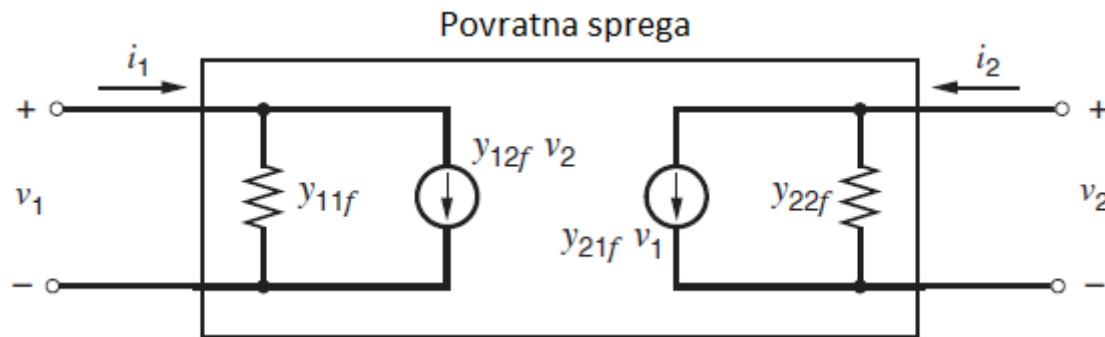
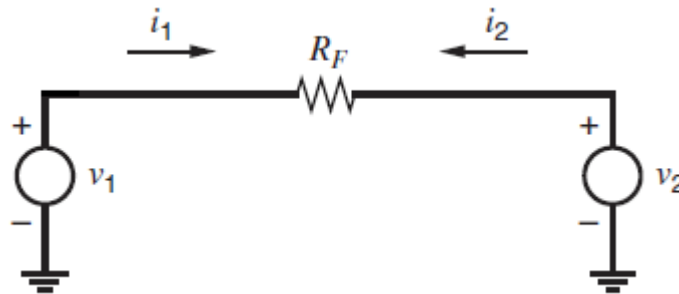
$$y_{11} = \left. \frac{i_1}{v_1} \right|_{v_2 = 0}$$

$$y_{21} = \left. \frac{i_2}{v_1} \right|_{v_2 = 0}$$

$$y_{12} = \left. \frac{i_1}{v_2} \right|_{v_1 = 0}$$

$$y_{22} = \left. \frac{i_2}{v_2} \right|_{v_1 = 0}$$

Ekvivalentni četvorpol za kolo povratne sprege



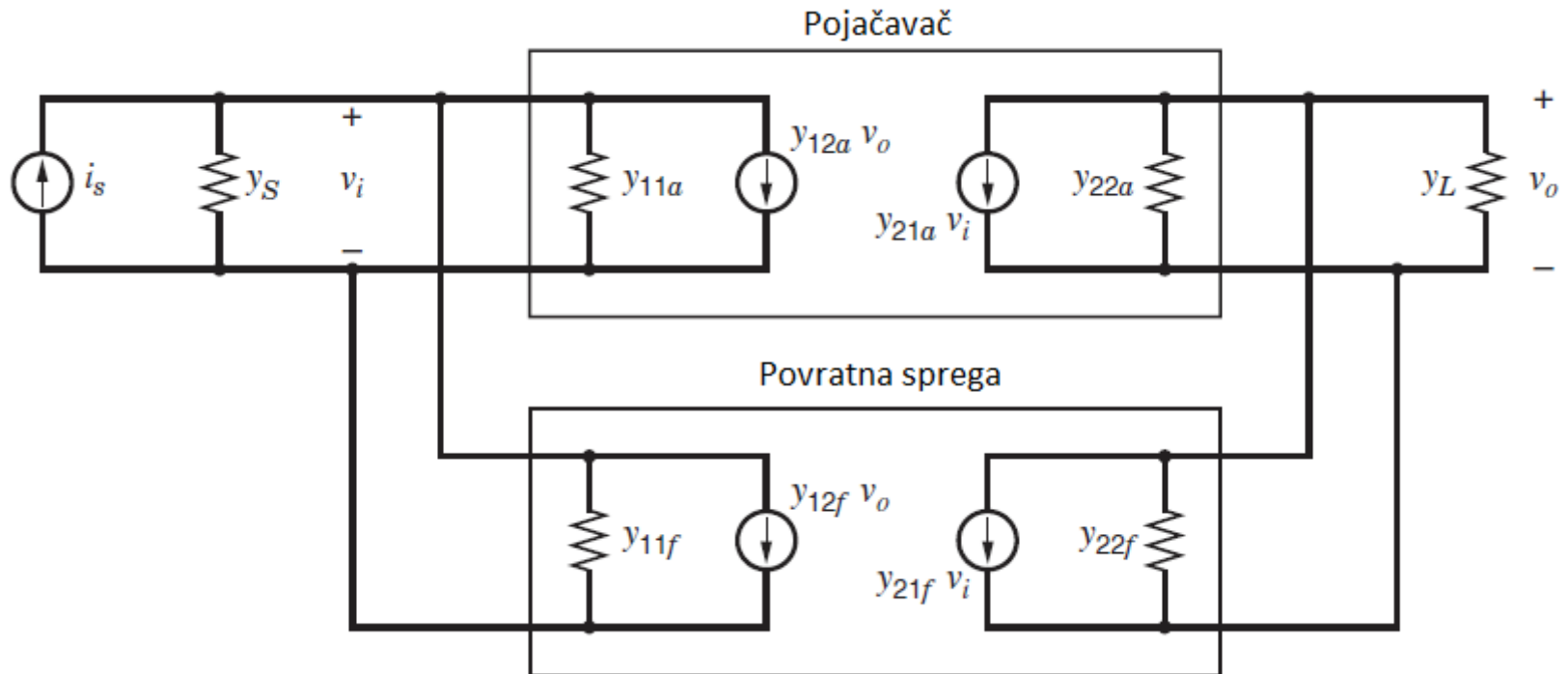
$$y_{11f} = \left. \frac{i_1}{v_1} \right|_{v_2=0} = \frac{1}{R_F}$$

$$y_{12f} = \left. \frac{i_1}{v_2} \right|_{v_1=0} = -\frac{1}{R_F} = f$$

y_{21f} se zanemaruje zbog $|y_{21a}| \gg |y_{21f}|$

$$y_{22f} = \left. \frac{i_2}{v_2} \right|_{v_1=0} = \frac{1}{R_F}$$

Izračunavanje pojačanja paralelno-naponske NPS



$$i_s = (y_S + y_{11a} + y_{11f})v_i + (y_{12a} + y_{12f})v_o$$

$$0 = (y_{21a} + y_{21f})v_i + (y_L + y_{22a} + y_{22f})v_o$$

Izračunavanje pojačanja paralelno-naponske NPS

$$y_i = y_S + y_{11a} + y_{11f}$$

$$y_o = y_L + y_{22a} + y_{22f}$$

$$\frac{v_o}{i_s} = \frac{-(y_{21a} + y_{21f})}{y_i y_o - (y_{21a} + y_{21f})(y_{12a} + y_{12f})}$$

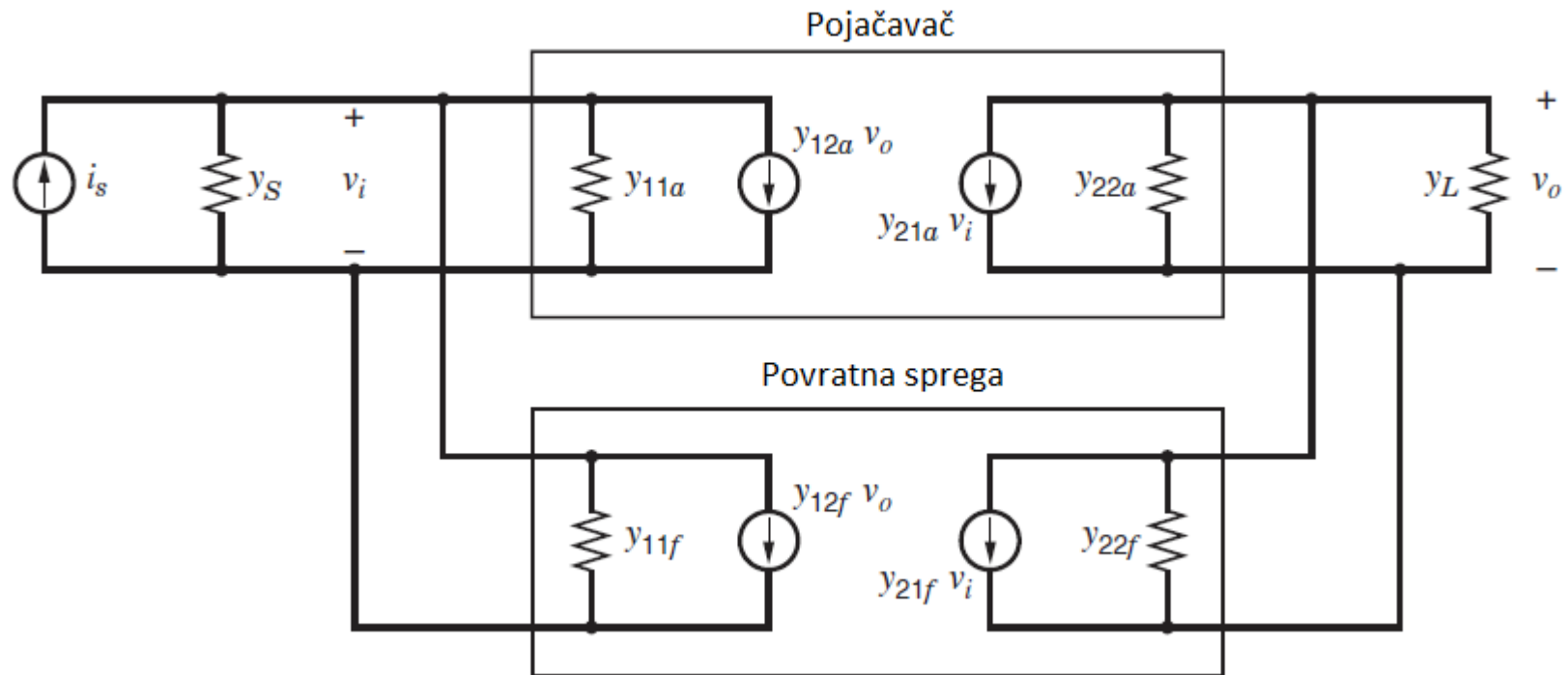
$$\frac{v_o}{i_s} = \frac{\frac{-(y_{21a} + y_{21f})}{y_i y_o}}{1 + \frac{-(y_{21a} + y_{21f})}{y_i y_o}(y_{12a} + y_{12f})}$$

$$a = -\frac{y_{21a} + y_{21f}}{y_i y_o}$$

$$f = y_{12a} + y_{12f}$$

$$\frac{v_o}{i_s} = \frac{a}{1 + af} = A$$

Izračunavanje pojačanja paralelno-naponske NPS



$$|y_{21a}| \gg |y_{21f}|$$

$$|y_{12a}| \ll |y_{12f}|$$

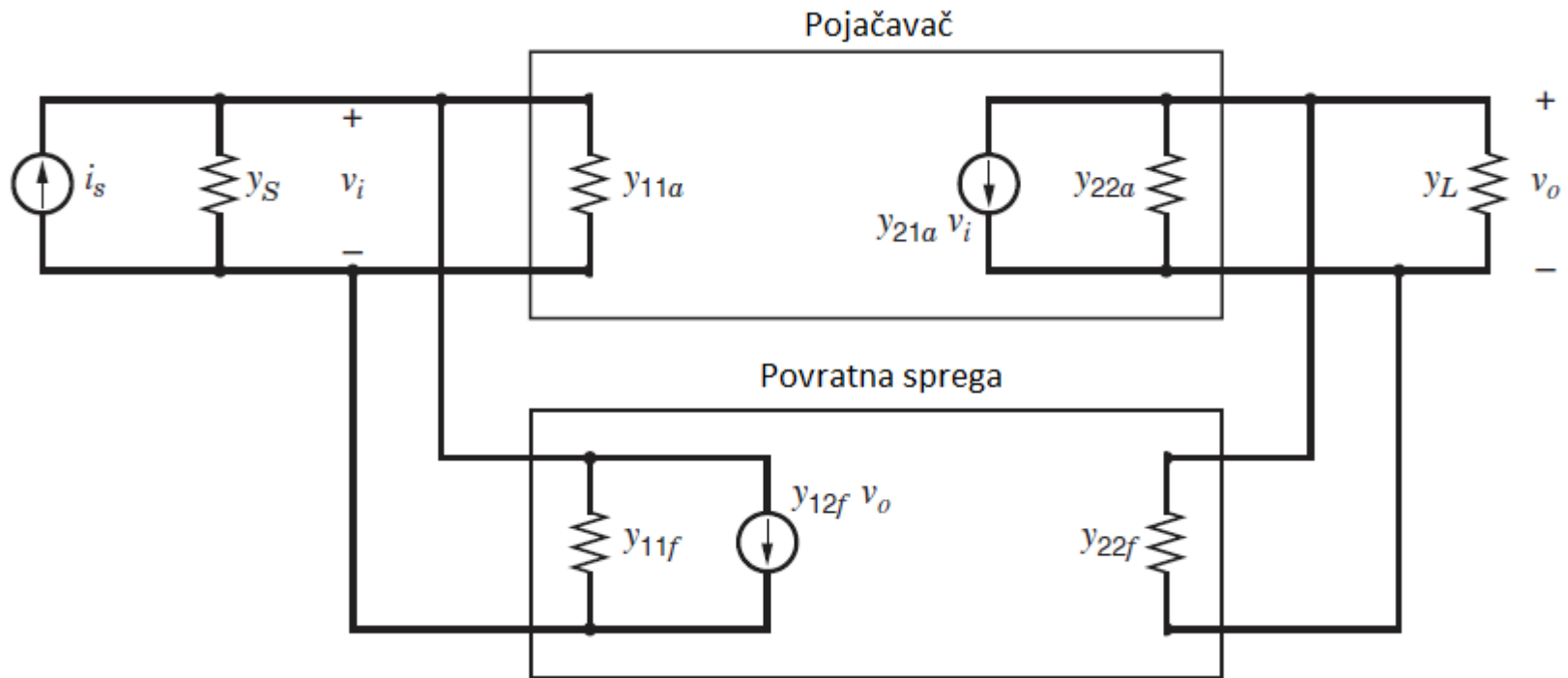
$$\frac{v_o}{i_s} = A \simeq \frac{-y_{21a}}{y_i y_o} \frac{1}{1 + \left(\frac{-y_{21a}}{y_i y_o}\right) y_{12f}}$$

$$a = -\frac{y_{21a}}{y_i y_o}$$

$$f = y_{12f}$$

$$\frac{v_o}{i_s} = \frac{a}{1 + af} = A$$

Izračunavanje približnog pojačanja paralelno-naponske NPS



$$|y_{21a}| \gg |y_{21f}|$$

$$|y_{12a}| \ll |y_{12f}|$$

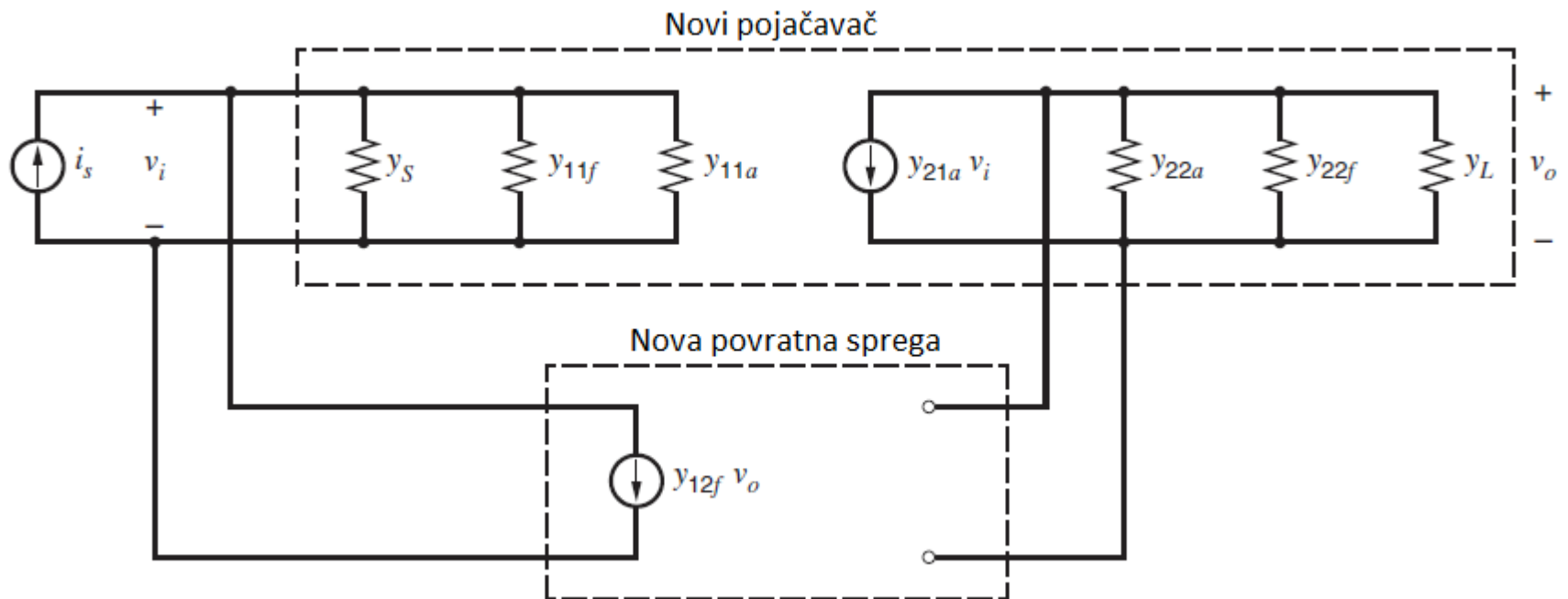
$$\frac{v_o}{i_s} = A \simeq \frac{\frac{-y_{21a}}{y_i y_o}}{1 + \left(\frac{-y_{21a}}{y_i y_o}\right) y_{12f}}$$

$$a = -\frac{y_{21a}}{y_i y_o}$$

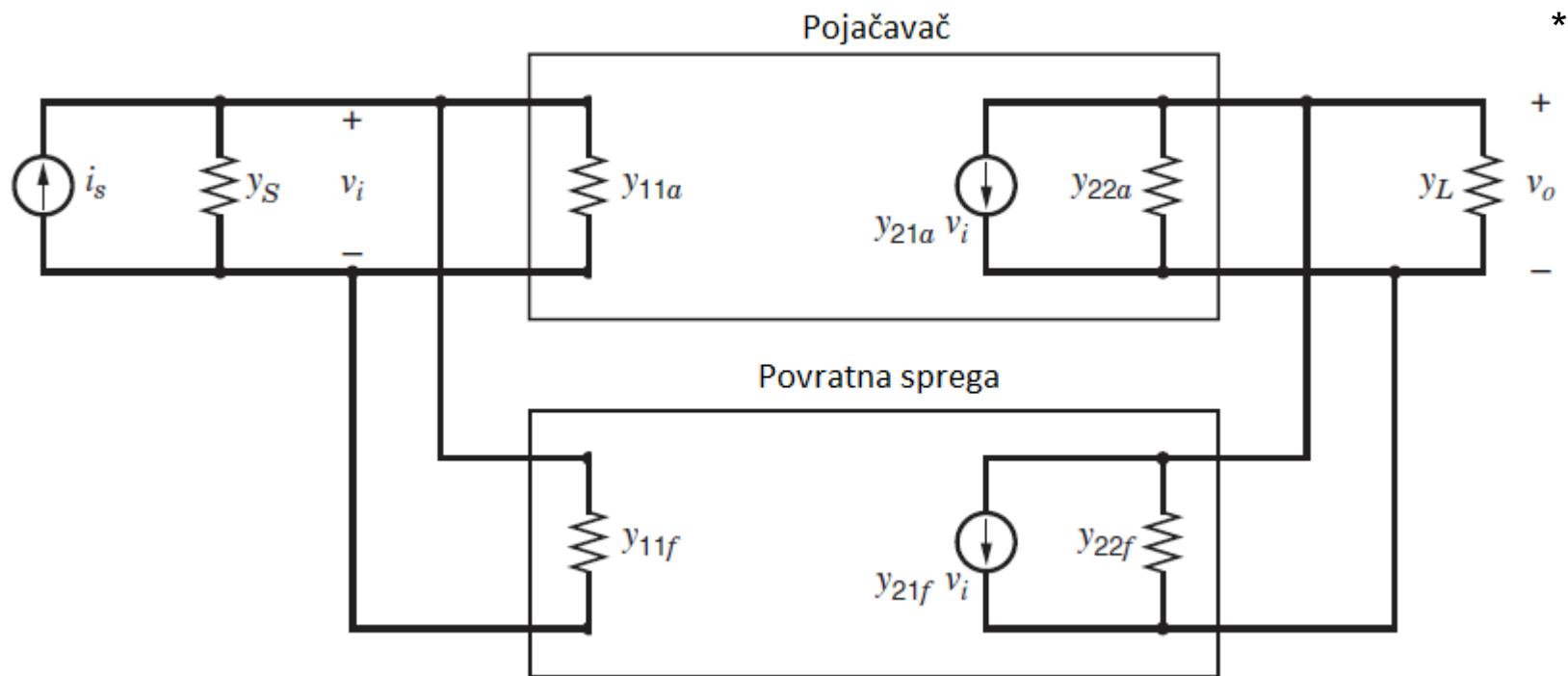
$$f = y_{12f}$$

$$\frac{v_o}{i_s} = \frac{a}{1 + af} = A$$

Izračunavanje približnog pojačanja paralelno-naponske NPS



Alternativno izračunavanje pojačanja “bez reakcije” paralelno-naponske NPS



Izračunavanje pojačanja “bez reakcije” paralelno-naponske NPS

Ulazno kolo se dobija kratkim spajanjem izlaznih krajeva.

Izlazno kolo se dobija ukidanjem pobudnog generatora.

Pojačanje A sa reakcijom se izračunava pomoću pojačanja “bez reakcije” a i kružnog pojačanja $\beta A = -af$.

$$i_s = (y_S + y_{11a} + y_{11f})v_i$$

$$0 = (y_{21a} + y_{21f})v_i + (y_L + y_{22a} + y_{22f})v_o^*$$

$$y_i = y_S + y_{11a} + y_{11f}$$

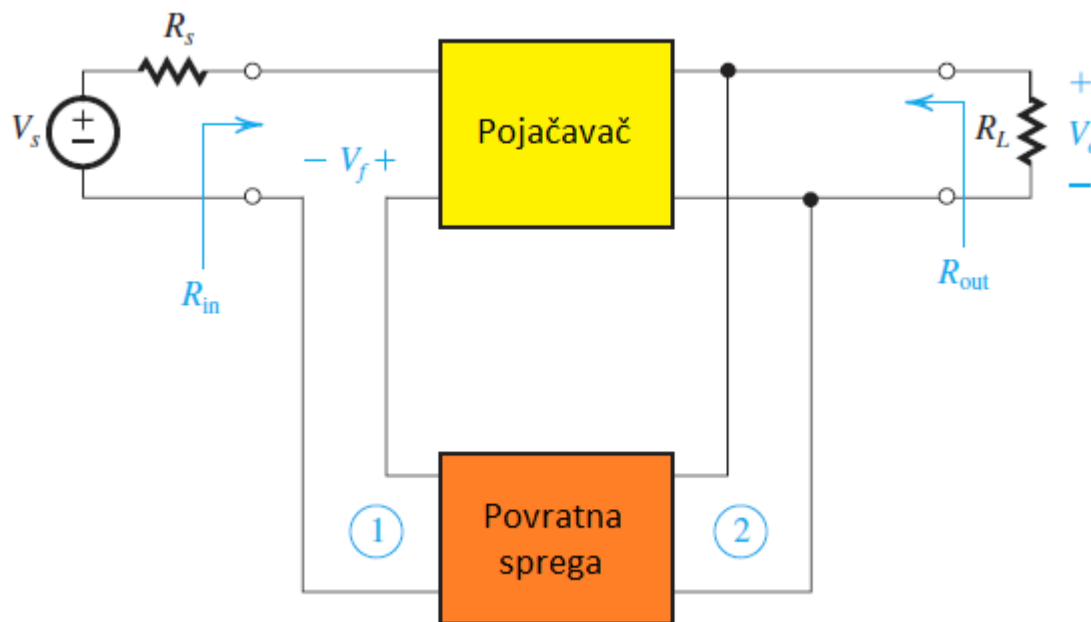
$$y_o = y_L + y_{22a} + y_{22f}$$

$$\frac{v_o^*}{i_s} = \frac{-(y_{21a} + y_{21f})}{y_i y_o}$$

$$a = -\frac{y_{21a} + y_{21f}}{y_i y_o}$$

$$\frac{v_o}{i_s} = \frac{a}{1 + af} = A$$

Redno-naponska negativna povratna sprega

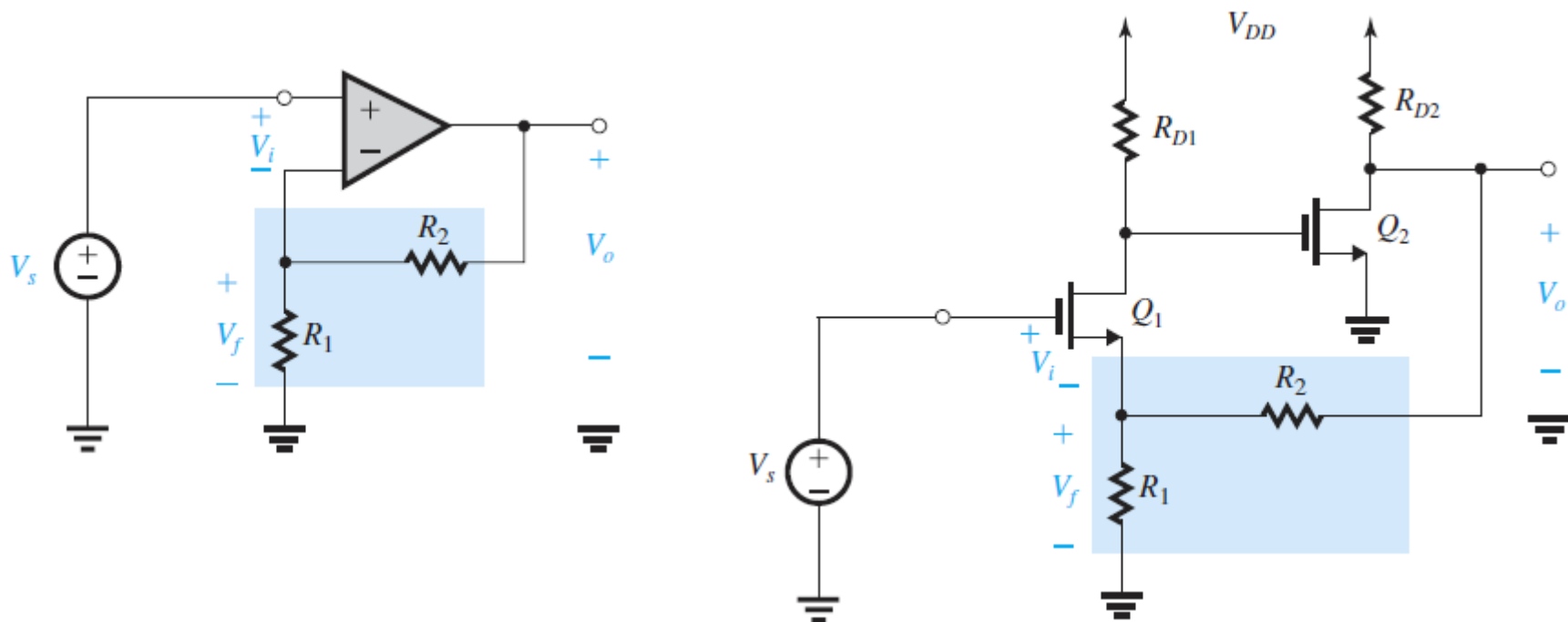


Redna sprega generatora, pojačavača i povratne sprege na ulazu (3 tačke, od kojih dve pripadaju jednom elementu).

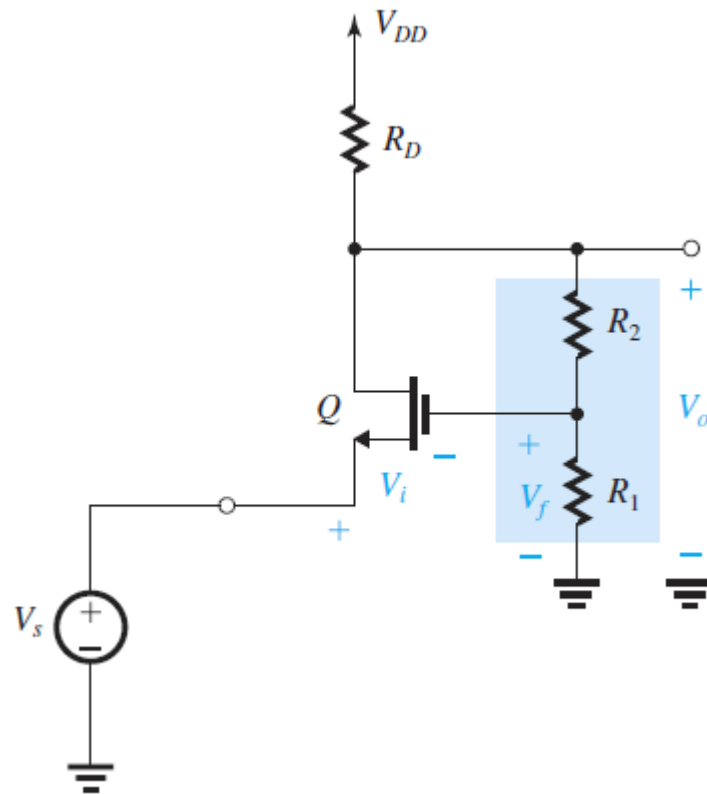
Naponska sprega potrošača, pojačavača i povratne sprege na izlazu (2 tačke koje pripadaju svakom elementu).

Vraćena veličina u kolo povratne sprege je napon.

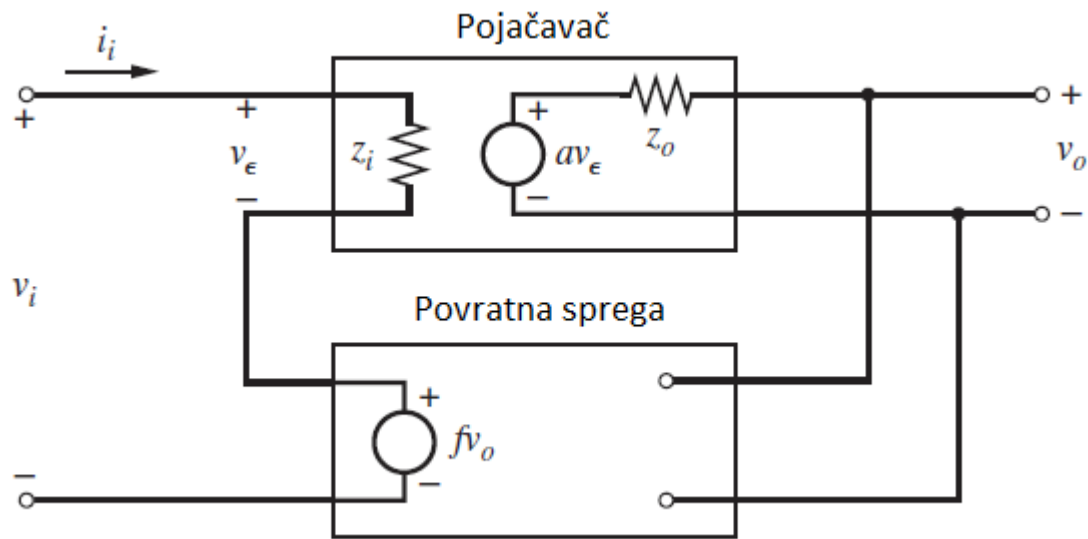
Redno-naponska negativna povratna sprega primeri



Redno-naponska negativna povratna sprega primer



Pojačanje v_o/v_i redno-naponske NPS



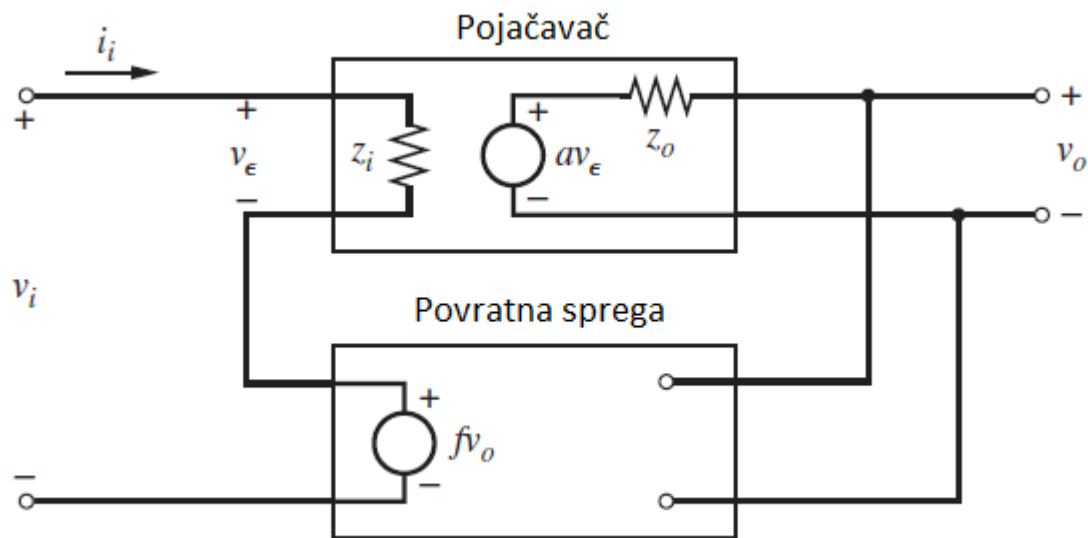
$$v_o = av_\epsilon$$

$$v_{fb} = fv_o$$

$$v_\epsilon = v_i - v_{fb}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{a}{1 + af}$$

Ulazna impedansa Z_i redno-naponske NPS



$$v_o = av_\epsilon$$

$$v_i = v_\epsilon + fv_o$$

$$v_i = v_\epsilon + afv_\epsilon$$

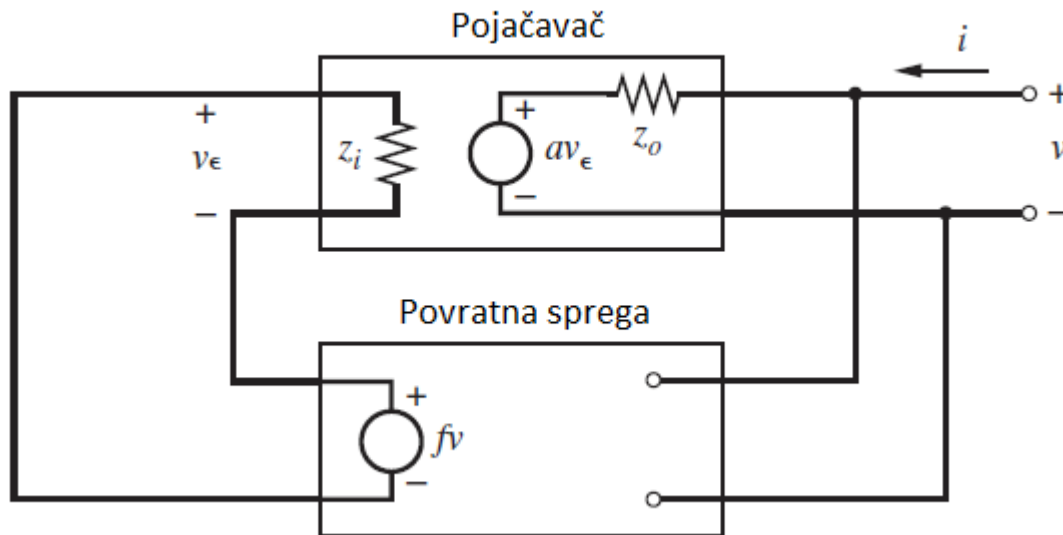
$$v_i = v_\epsilon(1 + af)$$

$$i_i = \frac{v_\epsilon}{z_i}$$

$$i_i = \frac{v_i}{z_i} \frac{1}{1 + af}$$

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i} = (1 + T)z_i$$

Izlazna impedansa Z_o redno-naponske NPS



$$v_\epsilon + fv = 0$$

$$i = \frac{v - av_\epsilon}{z_o}$$

$$i = \frac{v + afv}{z_o}$$

$$Z_o = \frac{v}{i} = \frac{z_o}{1 + T}$$

Ekvivalentni četvoropol za pojačavač i povratnu spregu



$$v_1 = h_{11}i_1 + h_{12}v_2$$
$$i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}v_2$$

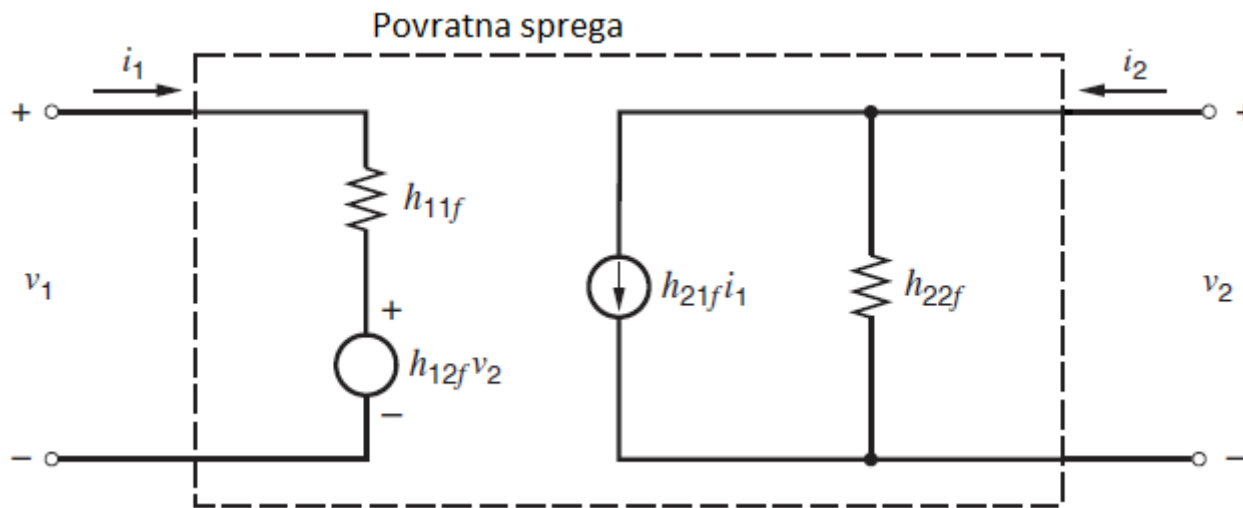
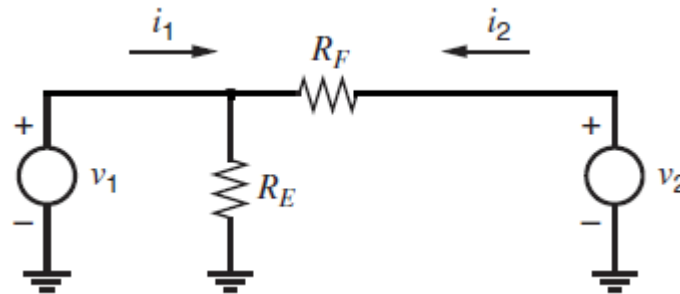
$$h_{11} = \left. \frac{v_1}{i_1} \right|_{v_2 = 0}$$

$$h_{12} = \left. \frac{v_1}{v_2} \right|_{i_1 = 0}$$

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{v_2 = 0}$$

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{v_2} \right|_{i_1 = 0}$$

Ekvivalentni četvoropol za kolo povratne sprege



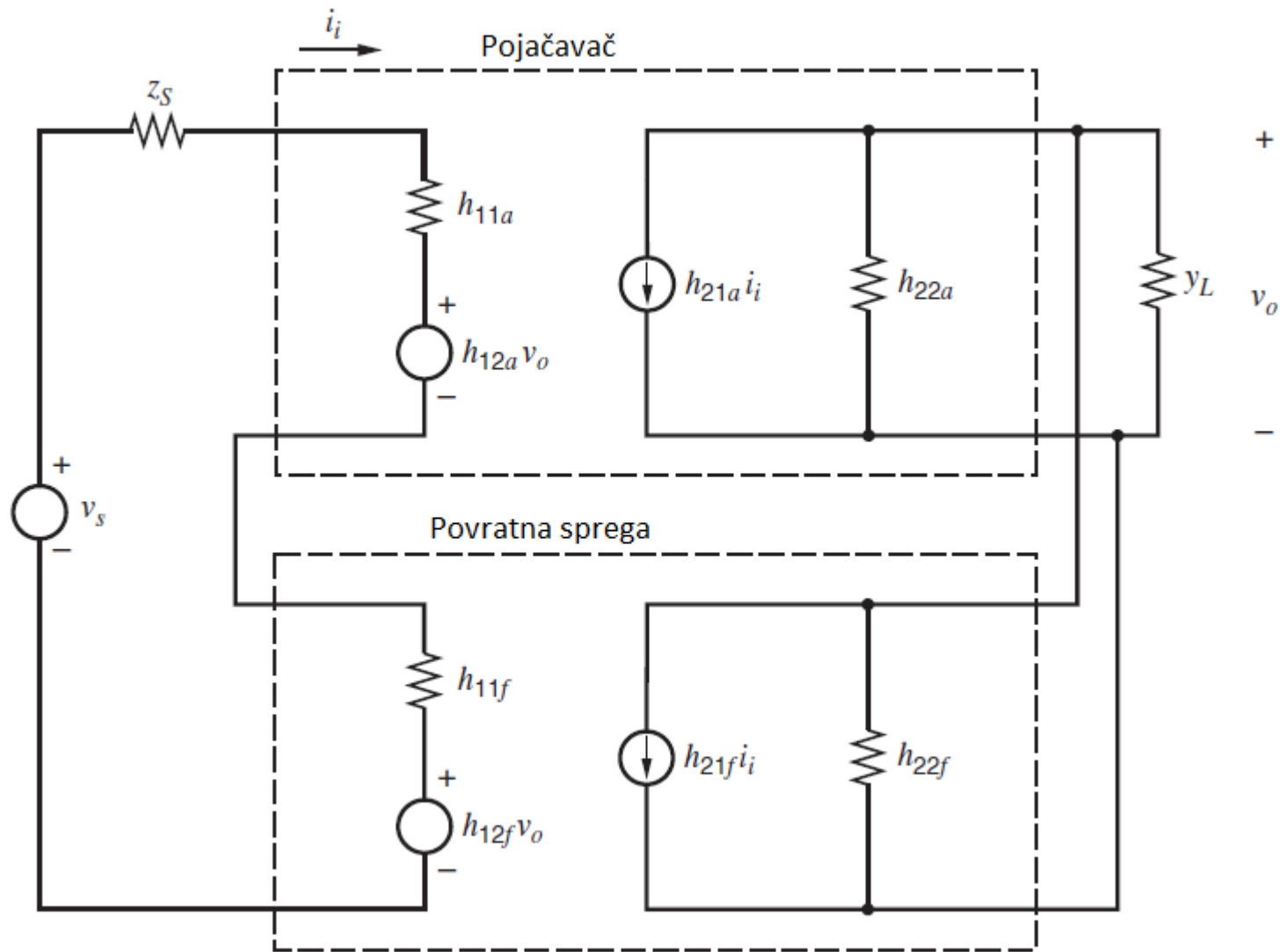
$$h_{11f} = \left. \frac{v_1}{i_1} \right|_{v_2=0} = R_E || R_F$$

$$h_{12f} = \left. \frac{v_1}{v_2} \right|_{i_1=0} = \frac{R_E}{R_E + R_F}$$

h_{21f} se zanemaruje zbog $|h_{21a}| \gg |h_{21f}|$

$$h_{22f} = \left. \frac{i_2}{v_2} \right|_{i_1=0} = \frac{1}{R_F + R_E}$$

Izračunavanje pojačanja redno-naponske NPS



Izračunavanje pojačanja redno-naponske NPS

$$v_s = (z_S + h_{11a} + h_{11f})i_i + (h_{12a} + h_{12f})v_o$$

$$0 = (h_{21a} + h_{21f})i_i + (y_L + h_{22a} + h_{22f})v_o$$

$$z_i = z_S + h_{11a} + h_{11f}$$

$$y_o = y_L + h_{22a} + h_{22f}$$

$$|h_{12a}| \ll |h_{12f}|$$

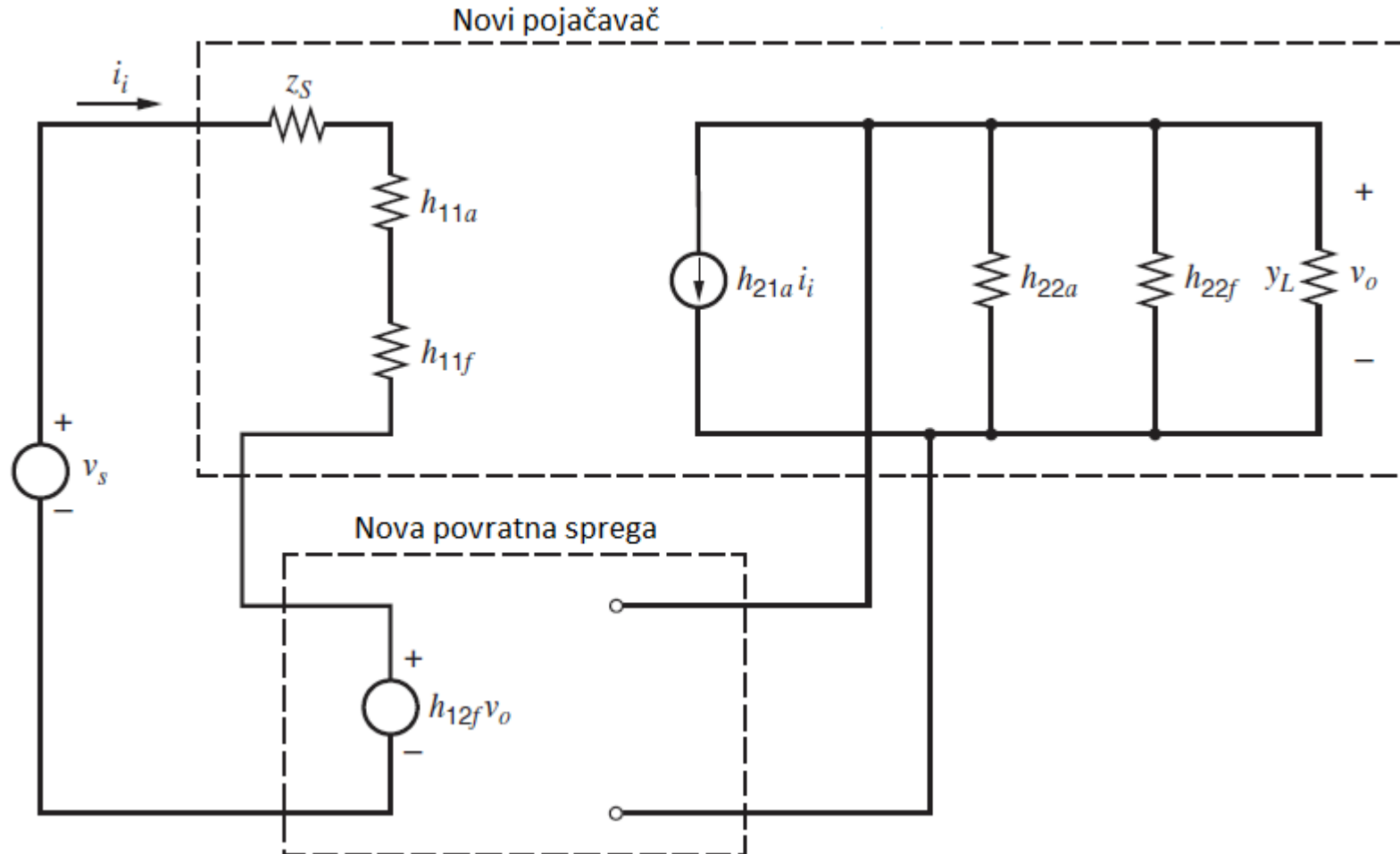
$$|h_{21a}| \gg |h_{21f}|$$

$$\frac{v_o}{v_s} = A \simeq \frac{-\frac{h_{21a}}{z_i y_o}}{1 + \left(-\frac{h_{21a}}{z_i y_o}\right) h_{12f}} = \frac{a}{1 + af}$$

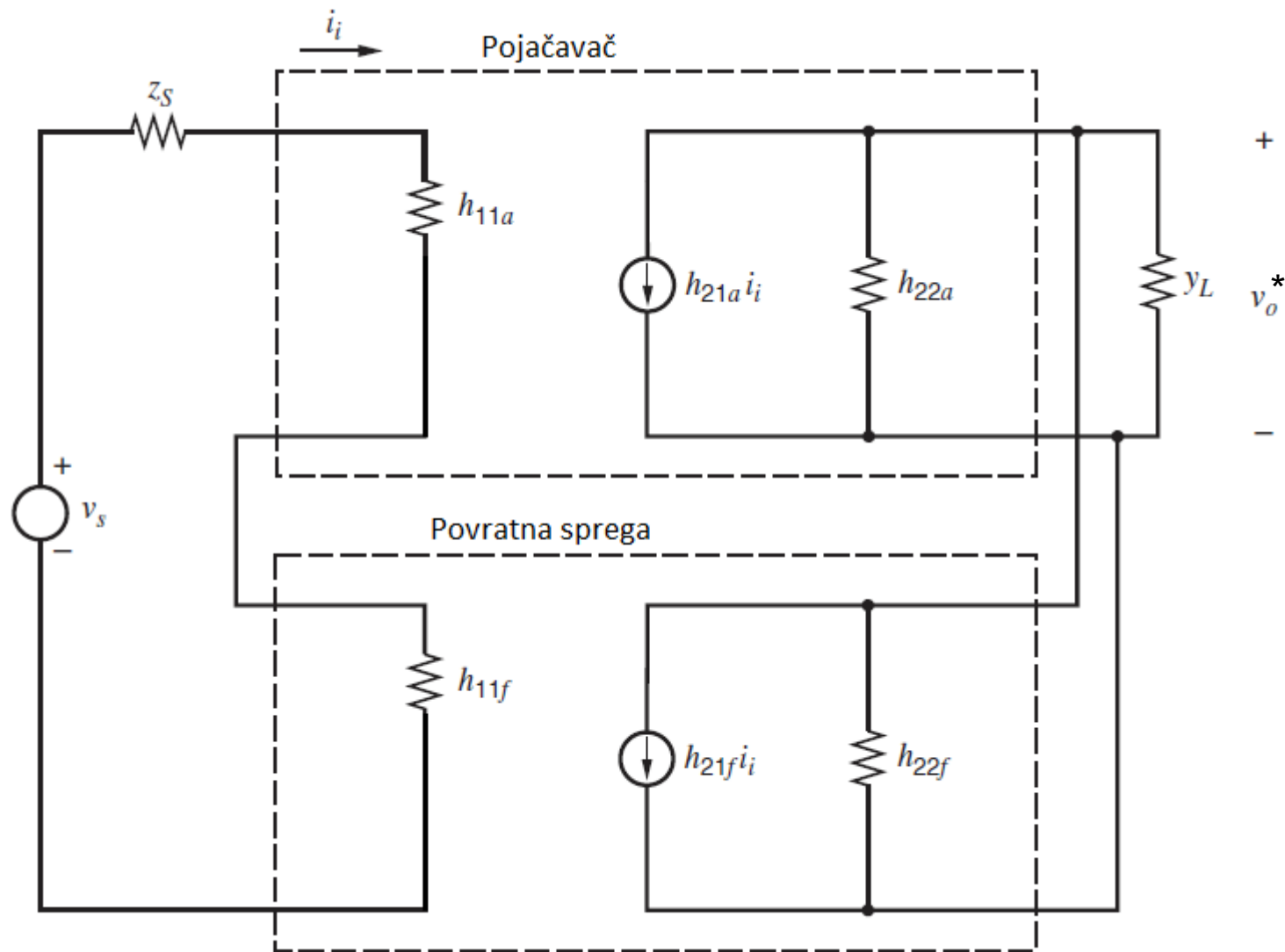
$$a = -\frac{h_{21a}}{z_i y_o}$$

$$f = h_{12f}$$

Izračunavanje pojačanja redno-naponske NPS



Alternativno izračunavanje pojačanja “bez reakcije” redno-naponske NPS



Izračunavanje pojačanja “bez reakcije” redno-naponske NPS

Ulazno kolo se dobija kratkim spajanjem izlaznih krajeva.

Izlazno kolo se dobija ukidanjem pobudnog generatora.

Pojačanje A sa reakcijom se izračunava pomoću pojačanja “bez reakcije” a i kružnog pojačanja $\beta A = -af$.

$$v_s = (z_S + h_{11a} + h_{11f})i_i$$

$$0 = (h_{21a} + h_{21f})i_i + (y_L + h_{22a} + h_{22f})v_o^*$$

$$z_i = z_S + h_{11a} + h_{11f}$$

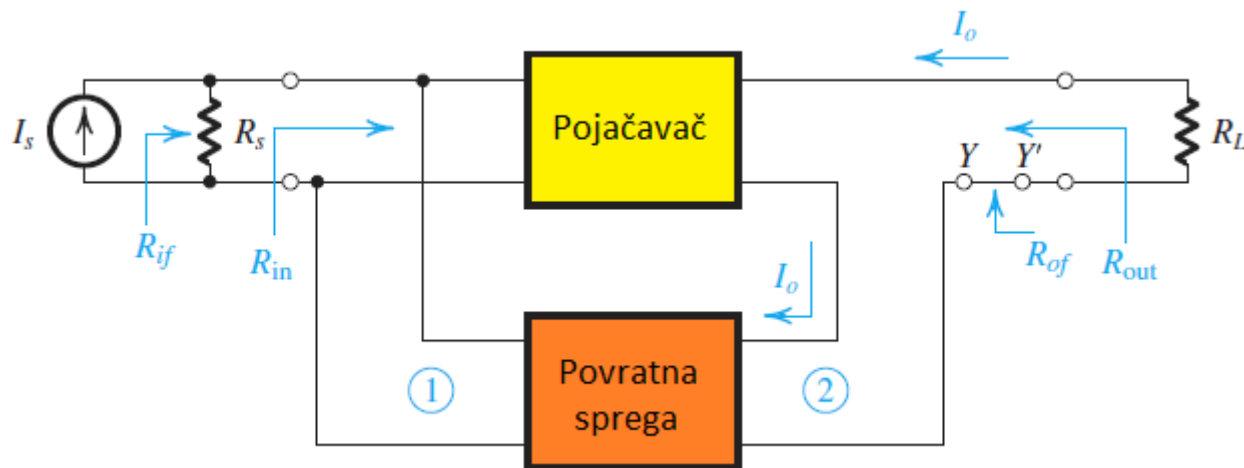
$$y_o = y_L + h_{22a} + h_{22f}$$

$$\frac{v_o^*}{v_s} = \frac{-(h_{21a} + h_{21f})}{z_i y_o}$$

$$a = -\frac{h_{21a} + h_{21f}}{z_i y_o}$$

$$\frac{v_o}{v_s} = \frac{a}{1 + af} = A$$

Paralelno-strujna negativna povratna sprega

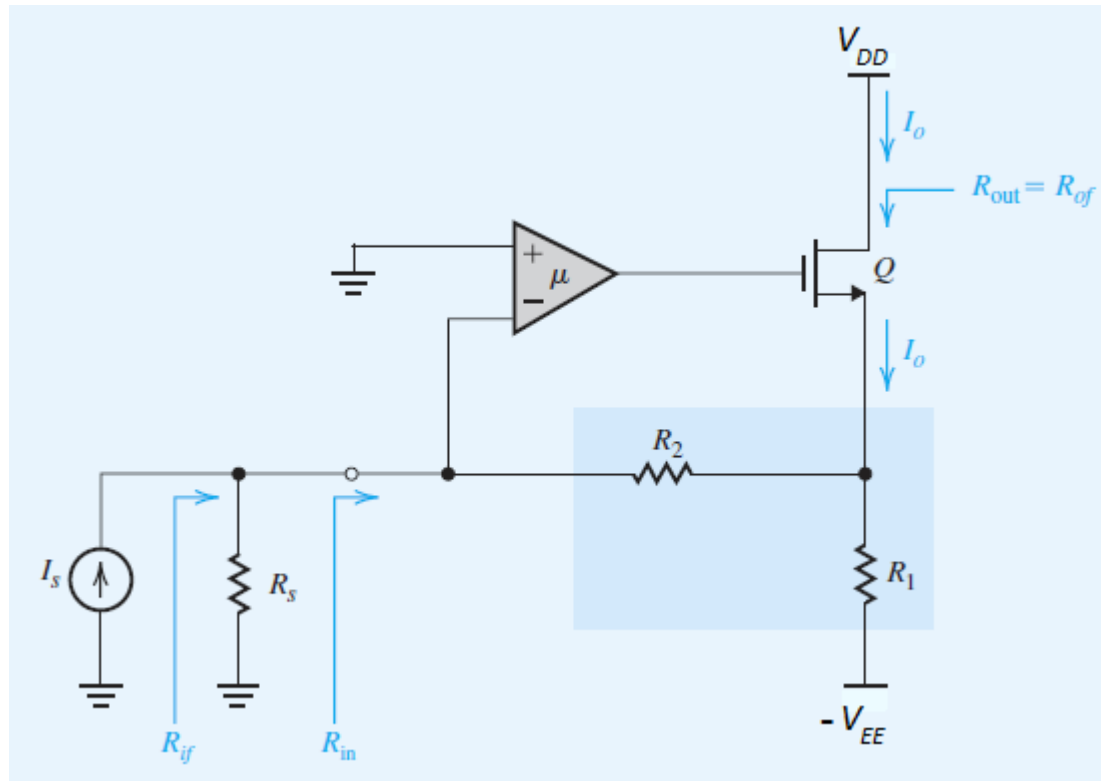


Paralelna sprega generatora, pojačavača i povratne sprega na ulazu (2 tačke koje pripadaju svakom elementu).

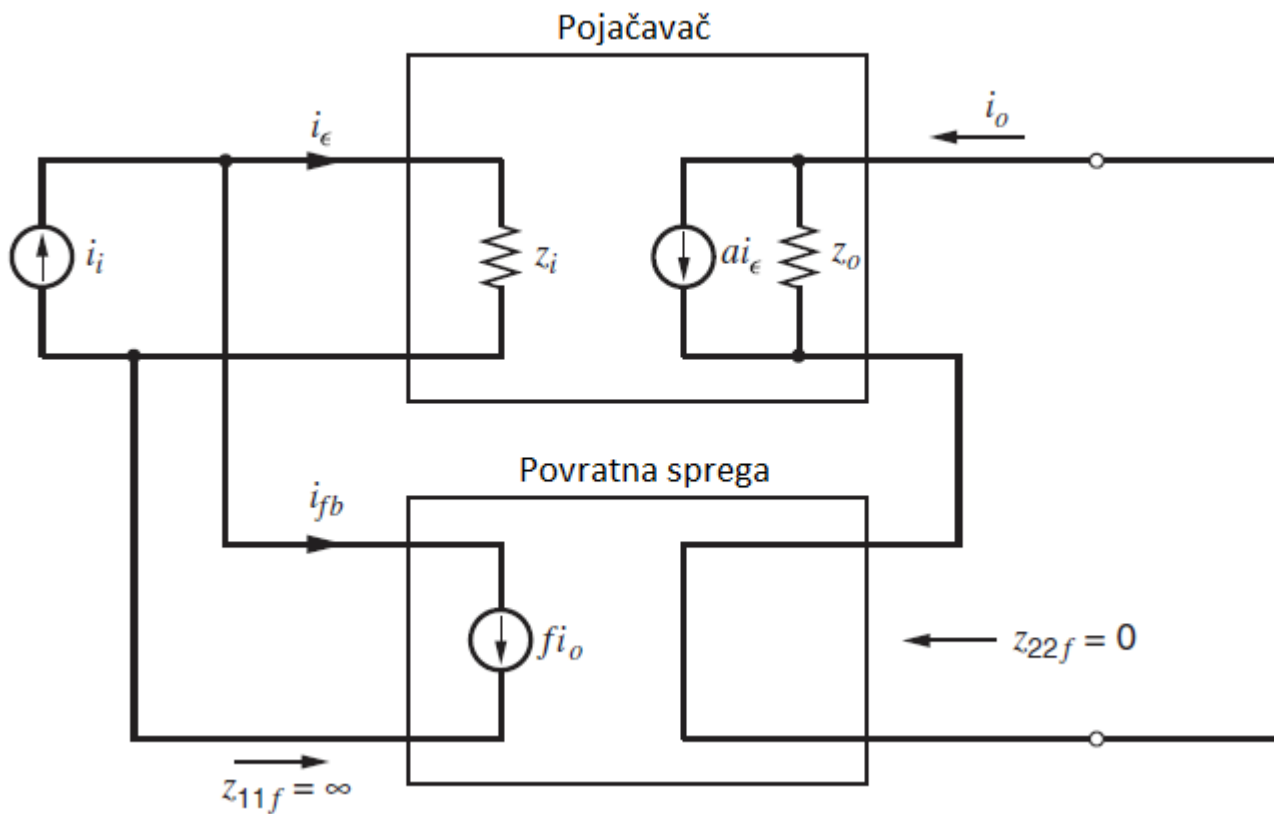
Strujna sprega potrošača, pojačavača i povratne sprega na izlazu (3 tačke, od kojih dve pripadaju jednom elementu).

Vraćena veličina u kolo povratne sprega je struja.

Paralelno-strujna negativna povratna sprega primer



Pojačanje v_o/v_i , ulazna Z_i i izlazna Z_o impedansa paralelno-strujne NPS



$$\frac{i_o}{i_i} = \frac{a}{1 + af}$$

$$T = af$$

$$T = -\beta A$$

$$Z_i = \frac{z_i}{1 + T}$$

$$Z_o = z_o(1 + T)$$

Ekvivalentni četvoropol za pojačavač i povratnu spregu



$$\begin{aligned}i_1 &= g_{11}v_1 + g_{12}i_2 \\v_2 &= g_{21}v_1 + g_{22}i_2\end{aligned}$$

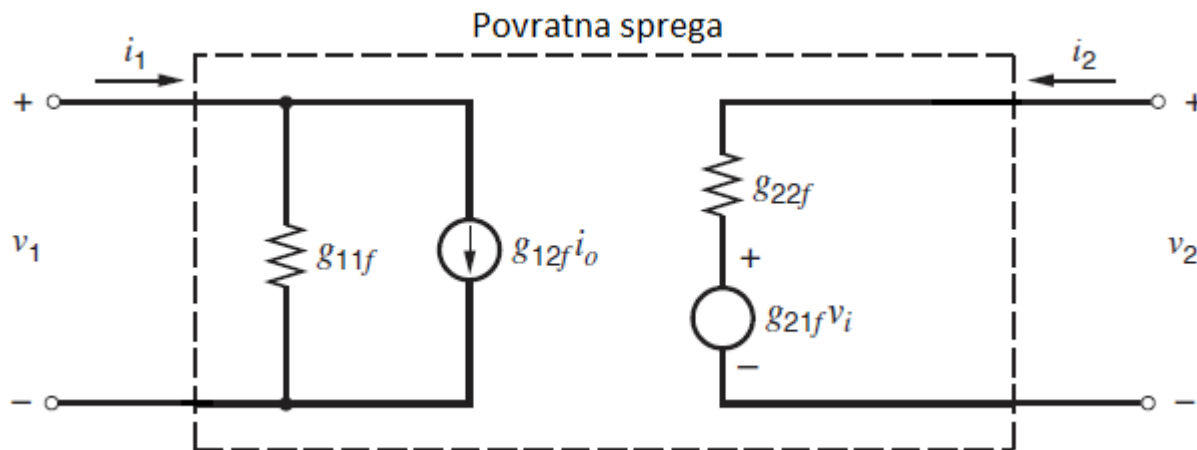
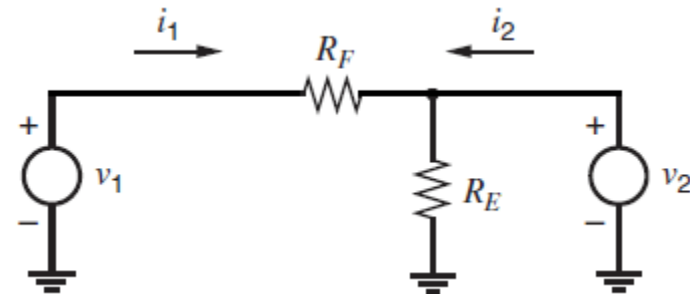
$$g_{11} = \left. \frac{i_1}{v_1} \right|_{i_2 = 0}$$

$$g_{12} = \left. \frac{i_1}{i_2} \right|_{v_1 = 0}$$

$$g_{21} = \left. \frac{v_2}{v_1} \right|_{i_2 = 0}$$

$$g_{22} = \left. \frac{v_2}{i_2} \right|_{v_1 = 0}$$

Ekvivalentni četvorpol za kolo povratne sprege



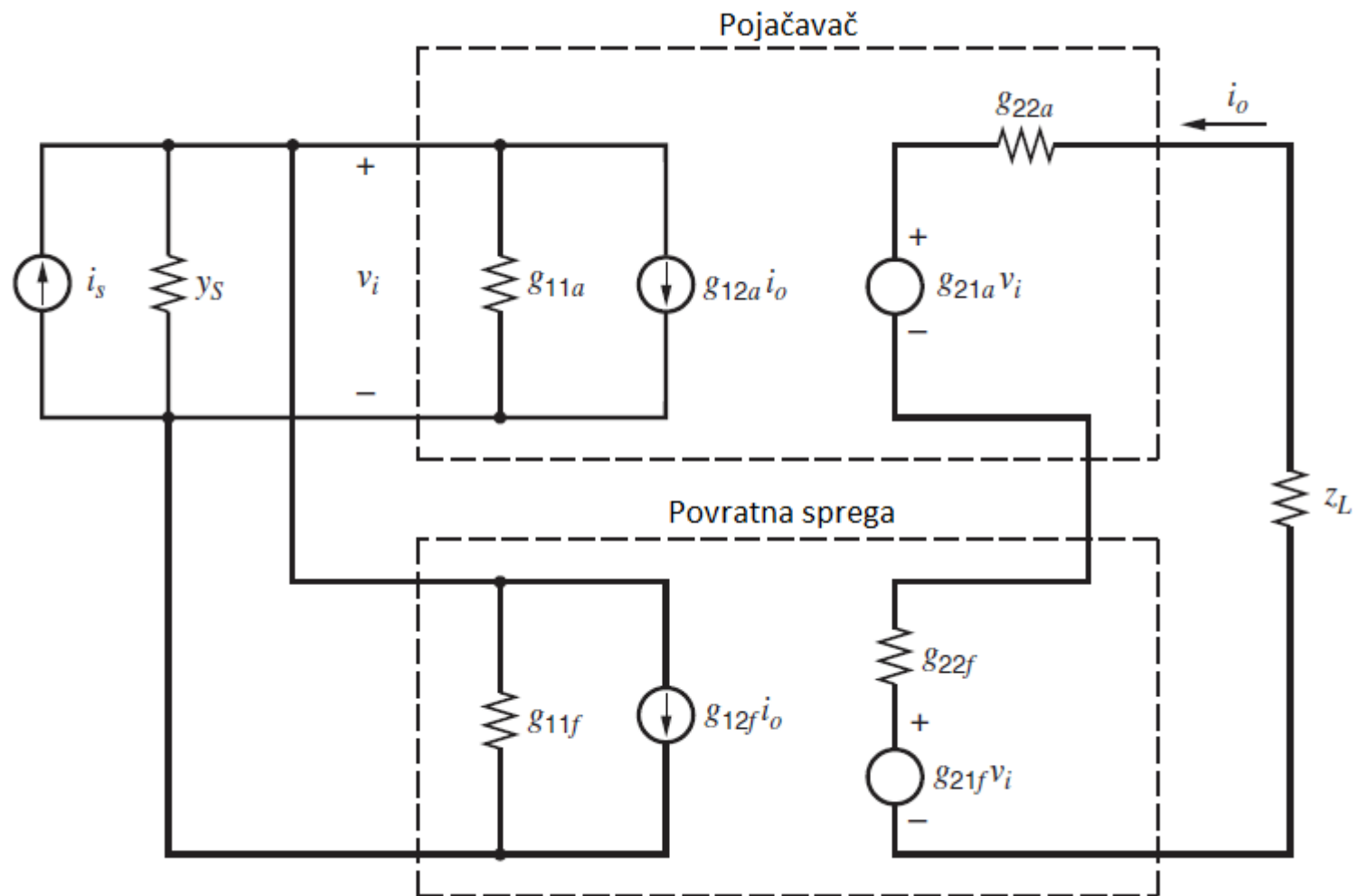
$$g_{11f} = \left. \frac{i_1}{v_1} \right|_{i_2=0} = \frac{1}{R_F + R_E}$$

$$g_{12f} = \left. \frac{i_1}{i_2} \right|_{v_1=0} = -\frac{R_E}{R_E + R_F}$$

g_{21f} se zanemaruje zbog $|g_{21a}| \gg |g_{21f}|$

$$g_{22f} = \left. \frac{v_2}{i_2} \right|_{v_1=0} = R_E || R_F$$

Izračunavanje pojačanja paralelno-strujne NPS



Izračunavanje pojačanja paralelno-strujne NPS

$$i_s = (y_s + g_{11a} + g_{11f})v_i + (g_{12a} + g_{12f})i_o$$

$$0 = (g_{21a} + g_{21f})v_i + (z_L + g_{22a} + g_{22f})i_o$$

$$y_i = y_s + g_{11a} + g_{11f}$$

$$z_o = z_L + g_{22a} + g_{22f}$$

$$|g_{12a}| \ll |g_{12f}|$$

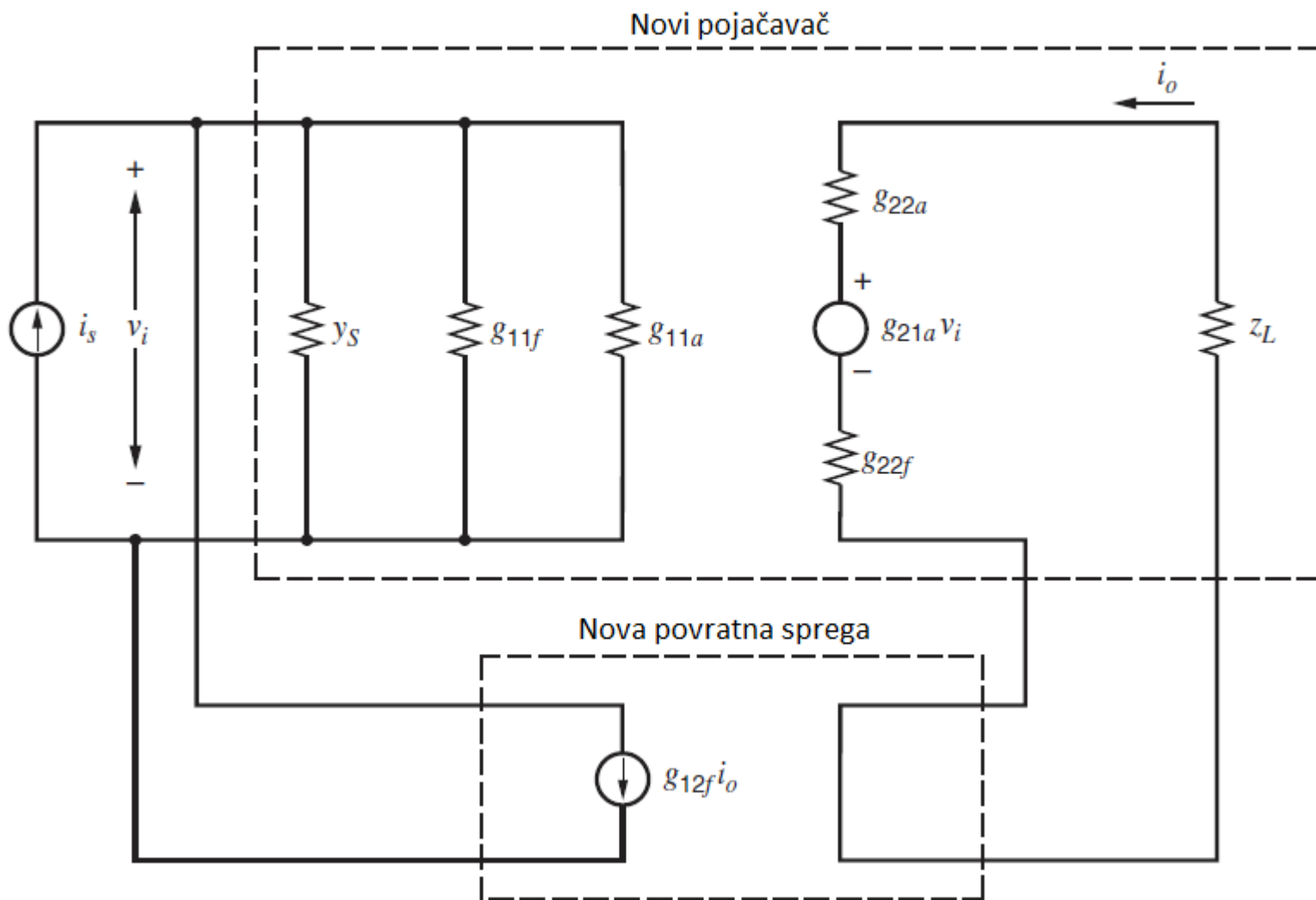
$$|g_{21a}| \gg |g_{21f}|$$

$$\frac{i_o}{i_s} = A \simeq \frac{-\frac{g_{21a}}{y_i z_o}}{1 + \left(-\frac{g_{21a}}{y_i z_o}\right) g_{12f}} = \frac{a}{1 + af}$$

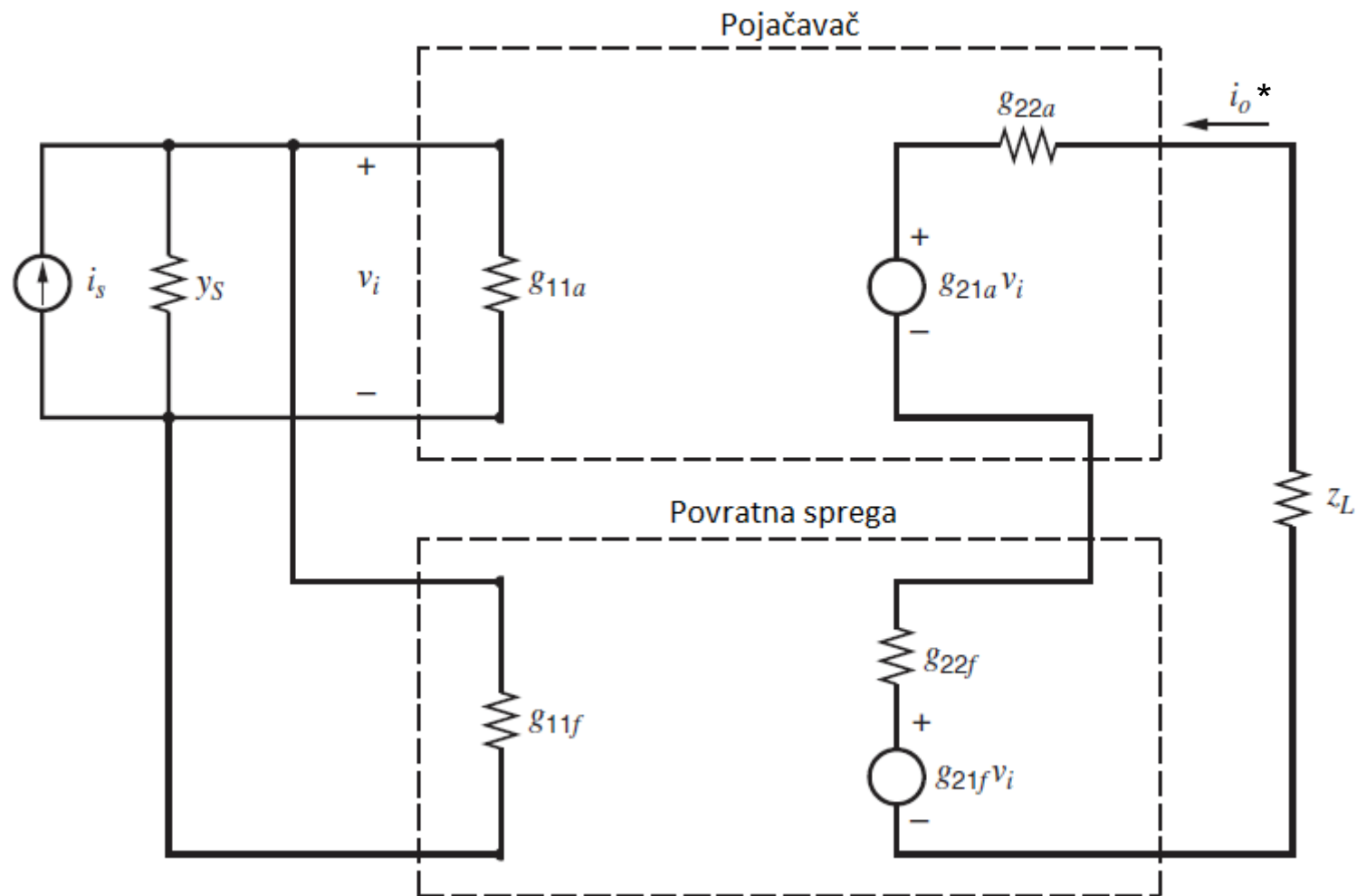
$$a = -\frac{g_{21a}}{y_i z_o}$$

$$f = g_{12f}$$

Približno izračunavanje pojačanja paralelno-strujne NPS



Alternativno izračunavanje pojačanja “bez reakcije” paralelno-strujne NPS



Izračunavanje pojačanja “bez reakcije” paralelno-strujne NPS

Ulazno kolo se dobija raskidanjem izlaznog kola.

Izlazno kolo se dobija ukidanjem pobudnog generatora.

Pojačanje A sa reakcijom se izračunava pomoću pojačanja “bez reakcije” a i kružnog pojačanja $\beta A = -af$.

$$i_s = (y_S + g_{11a} + g_{11f})v_i$$

$$0 = (g_{21a} + g_{21f})v_i + (z_L + g_{22a} + g_{22f})i_o^*$$

$$y_i = y_S + g_{11a} + g_{11f}$$

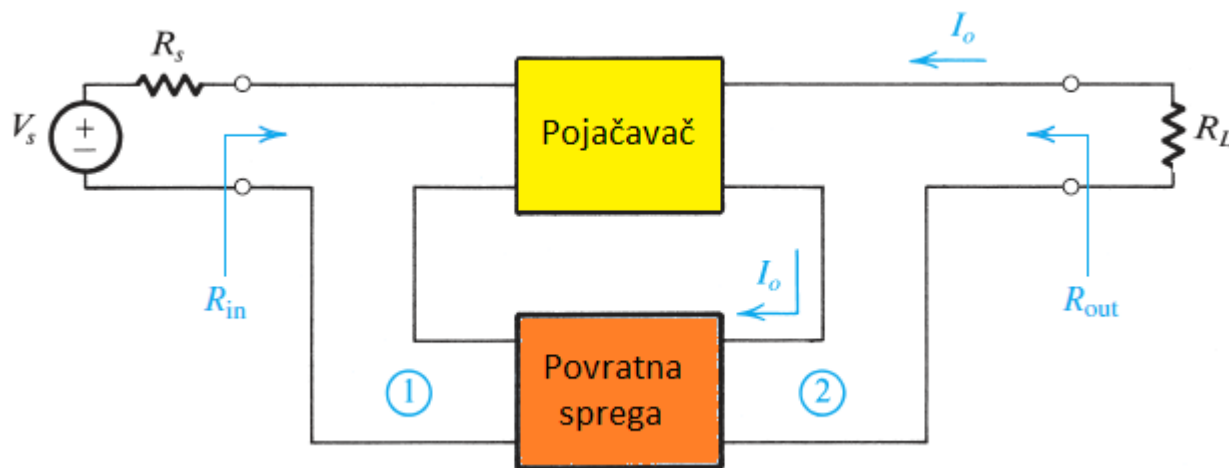
$$z_o = z_L + g_{22a} + g_{22f}$$

$$\frac{i_o^*}{i_s} = \frac{-(g_{21a} + g_{21f})}{y_i z_o}$$

$$a = -\frac{g_{21a} + g_{21f}}{y_i z_o}$$

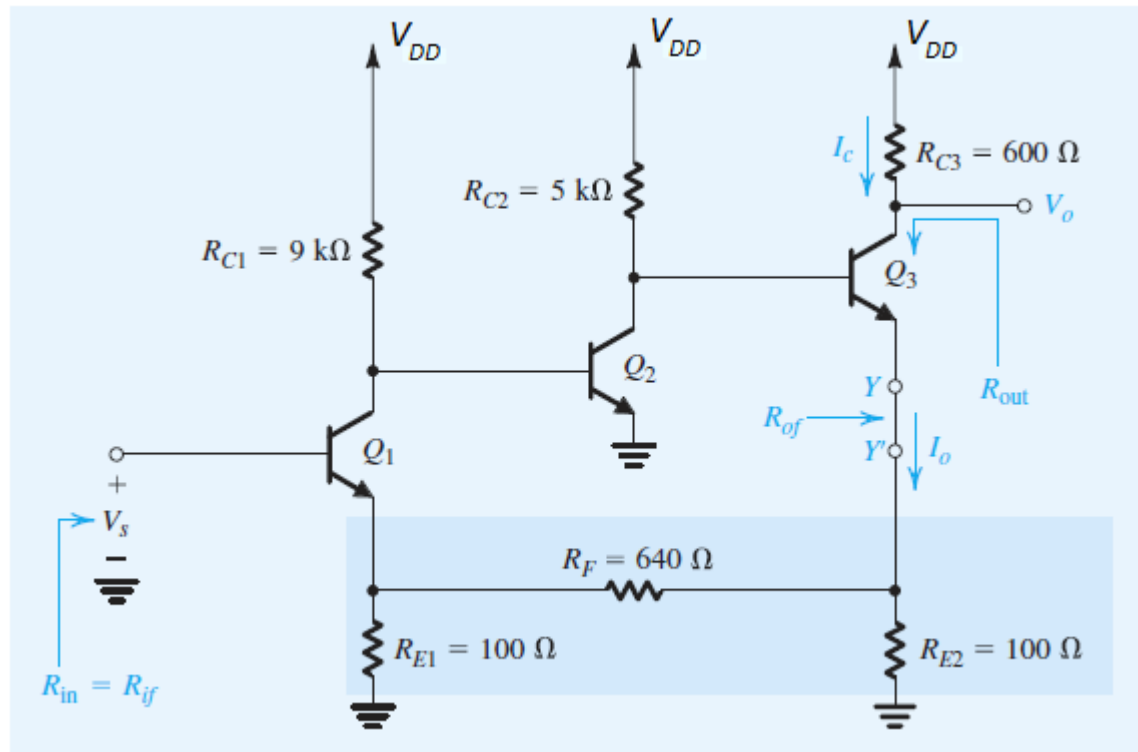
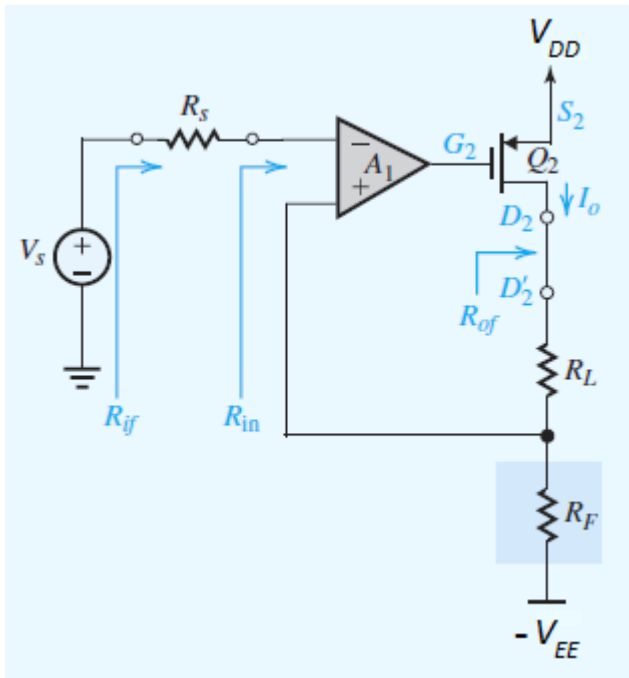
$$\frac{i_o}{i_s} = \frac{a}{1 + af} = A$$

Redno-strujna negativna povratna sprega

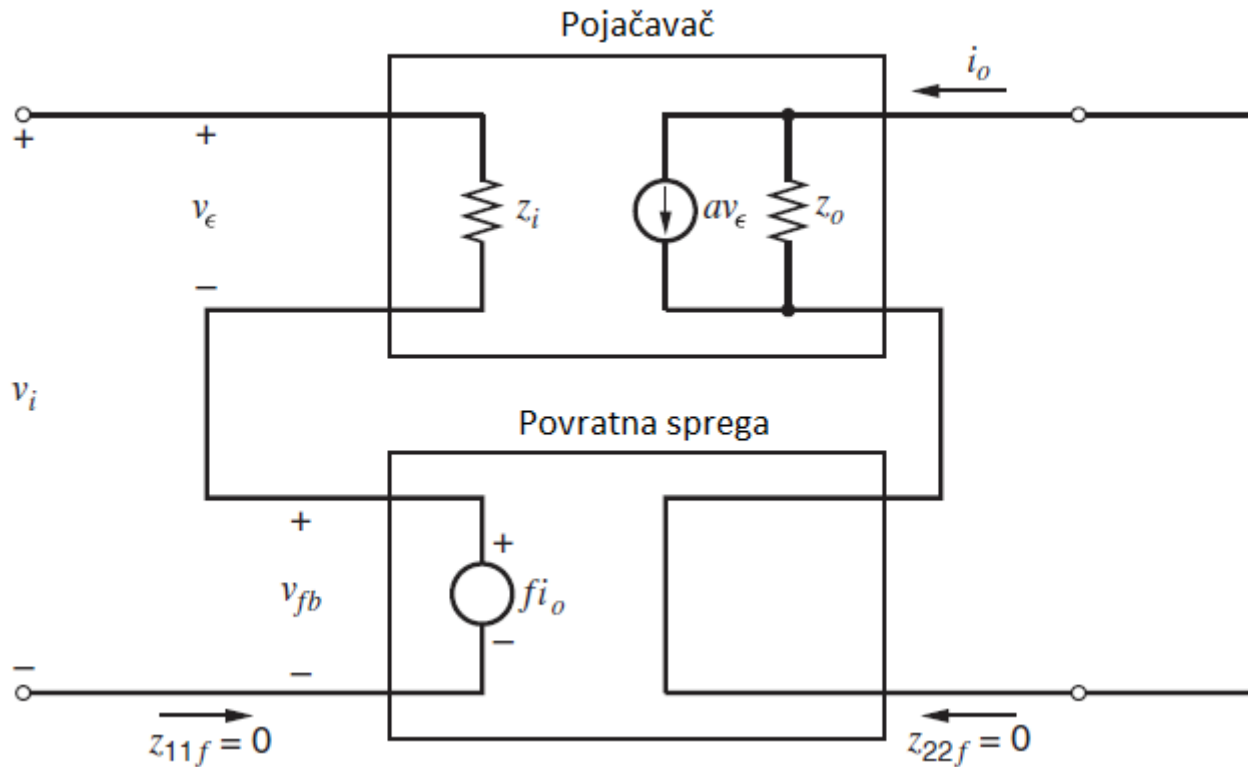


Redna sprega generatora, pojačavača i povratne sprege na ulazu (3 tačke, od kojih dve pripadaju jednom elementu).
Strujna sprega potrošača, pojačavača i povratne sprege na izlazu (3 tačke, od kojih dve pripadaju jednom elementu).
Vraćena veličina u kolo povratne sprege je struja.

Redno-strujna negativna povratna sprega primeri



Pojačanje v_o/v_i , ulazna Z_i i izlazna Z_o Impedansa redno-naponske NPS



$$\frac{i_o}{v_i} = \frac{a}{1 + af}$$

$$T = af$$

$$T = -\beta A$$

$$Z_i = z_i(1 + T)$$

$$Z_o = z_o(1 + T)$$

Ekvivalentni četvoropol za pojačavač i povratnu spregu



$$v_1 = z_{11}i_1 + z_{12}i_2$$

$$v_2 = z_{21}i_1 + z_{22}i_2$$

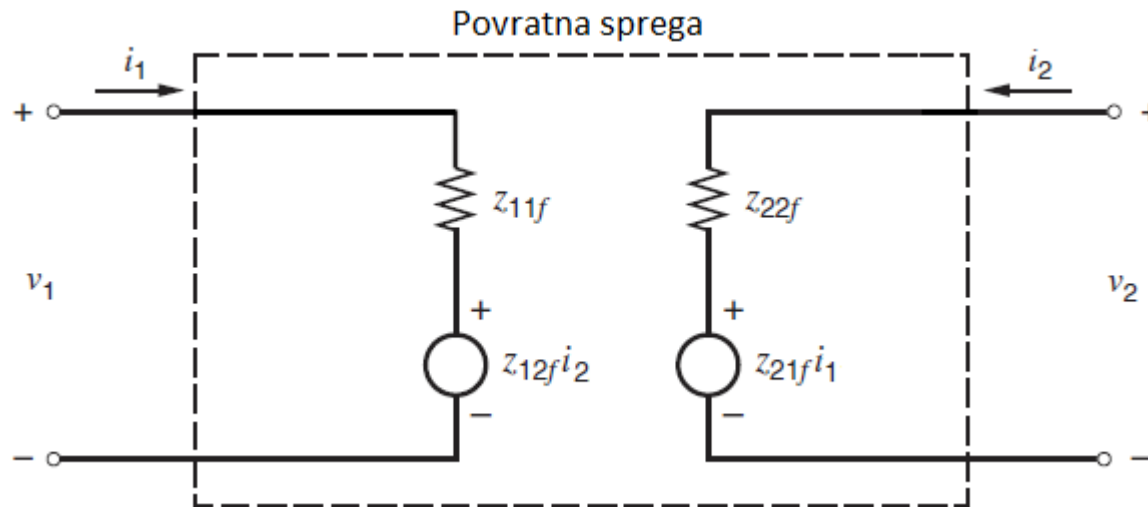
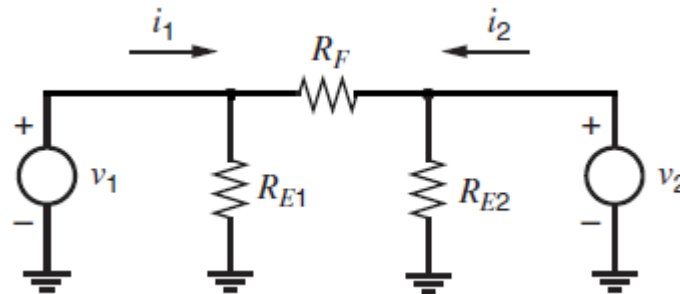
$$z_{11} = \frac{v_1}{i_1} \Big|_{i_2 = 0}$$

$$z_{21} = \frac{v_2}{i_1} \Big|_{i_2 = 0}$$

$$z_{12} = \frac{v_1}{i_2} \Big|_{i_1 = 0}$$

$$z_{22} = \frac{v_2}{i_2} \Big|_{i_1 = 0}$$

Ekvivalentni četvorpol za povratnu spregu



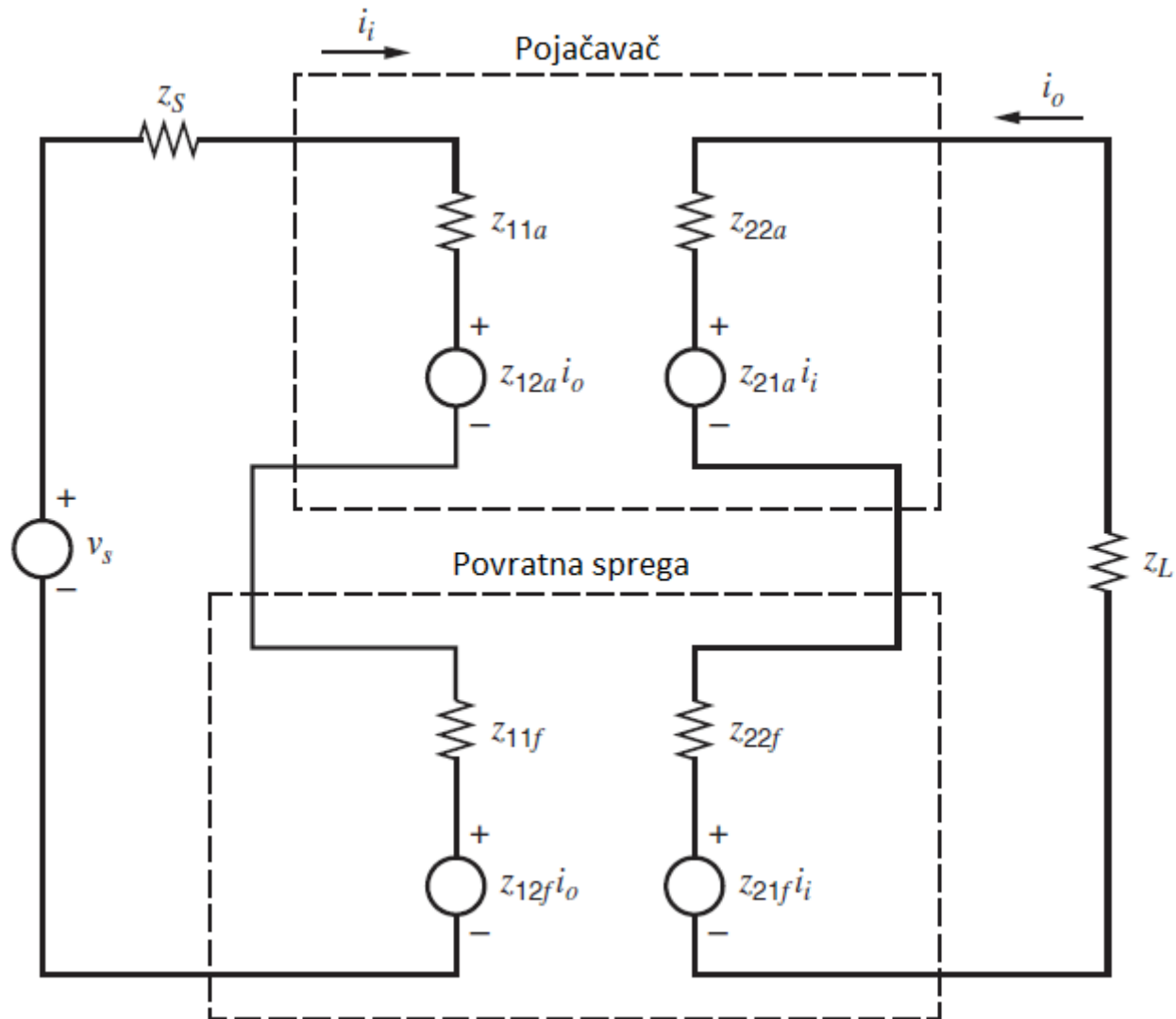
$$z_{11f} = \left. \frac{v_1}{i_1} \right|_{i_2=0} = R_{E1} \parallel (R_F + R_{E2})$$

$$z_{12f} = \left. \frac{v_1}{i_2} \right|_{i_1=0} = \frac{R_{E1} R_{E2}}{R_{E1} + R_{E2} + R_F}$$

z_{21f} se zanemaruje zbog $|z_{21a}| \gg |z_{21f}|$

$$z_{22f} = \left. \frac{v_2}{i_2} \right|_{i_1=0} = R_{E2} \parallel (R_{E1} + R_F)$$

Izračunavanje pojačanja redno-strujne NPS



Izračunavanje pojačanja redno-strujne NPS

$$v_s = (z_S + z_{11a} + z_{11f})i_i + (z_{12a} + z_{12f})i_o$$

$$0 = (z_{21a} + z_{21f})i_i + (z_L + z_{22a} + z_{22f})i_o$$

$$z_i = z_S + z_{11a} + z_{11f}$$

$$z_o = z_L + z_{22a} + z_{22f}$$

$$|z_{12a}| \ll |z_{12f}|$$

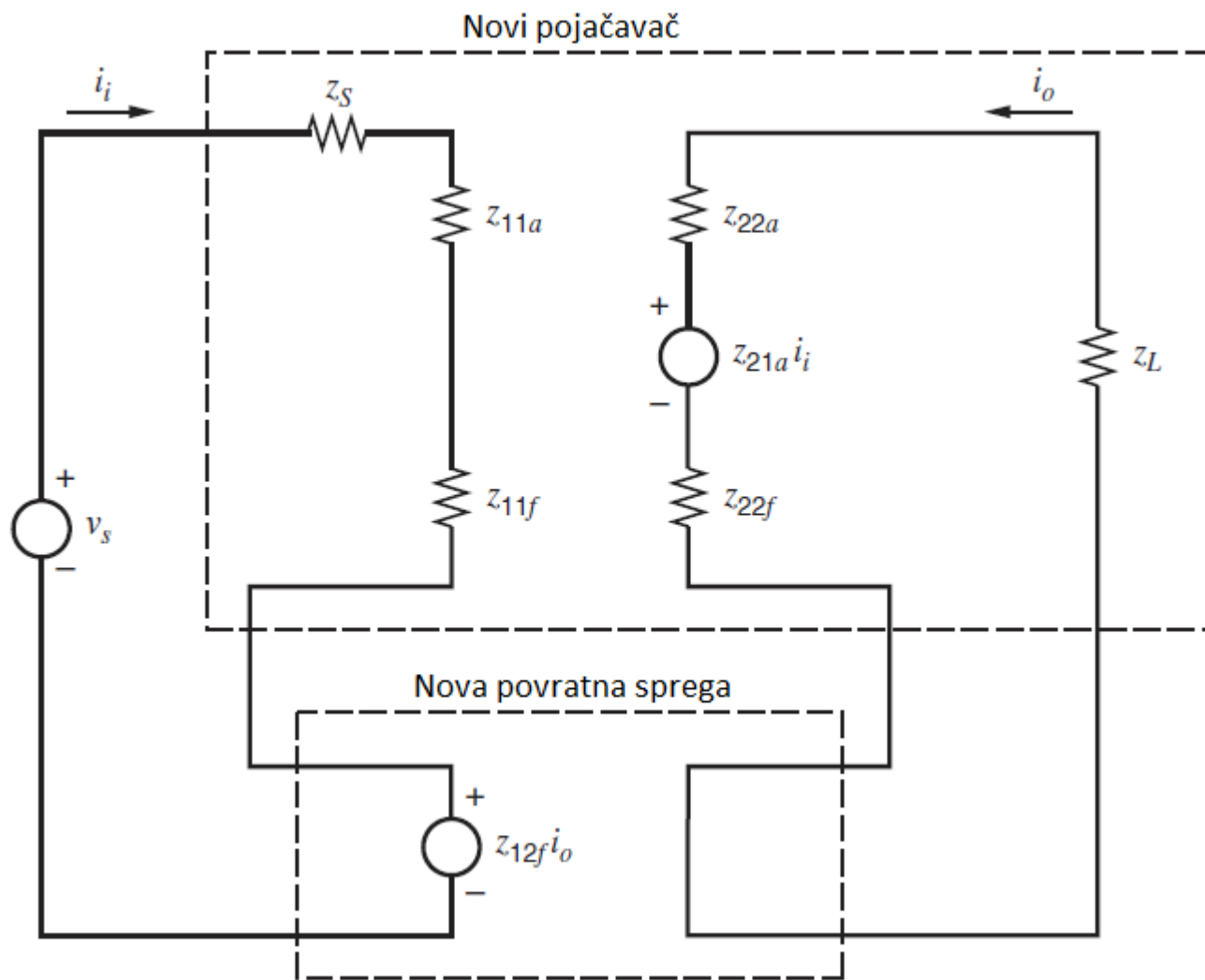
$$|z_{21a}| \gg |z_{21f}|$$

$$\frac{i_o}{v_s} = A \simeq \frac{\frac{-z_{21a}}{z_i z_o}}{1 + \left(\frac{-z_{21a}}{z_i z_o}\right) z_{12f}} = \frac{a}{1 + af}$$

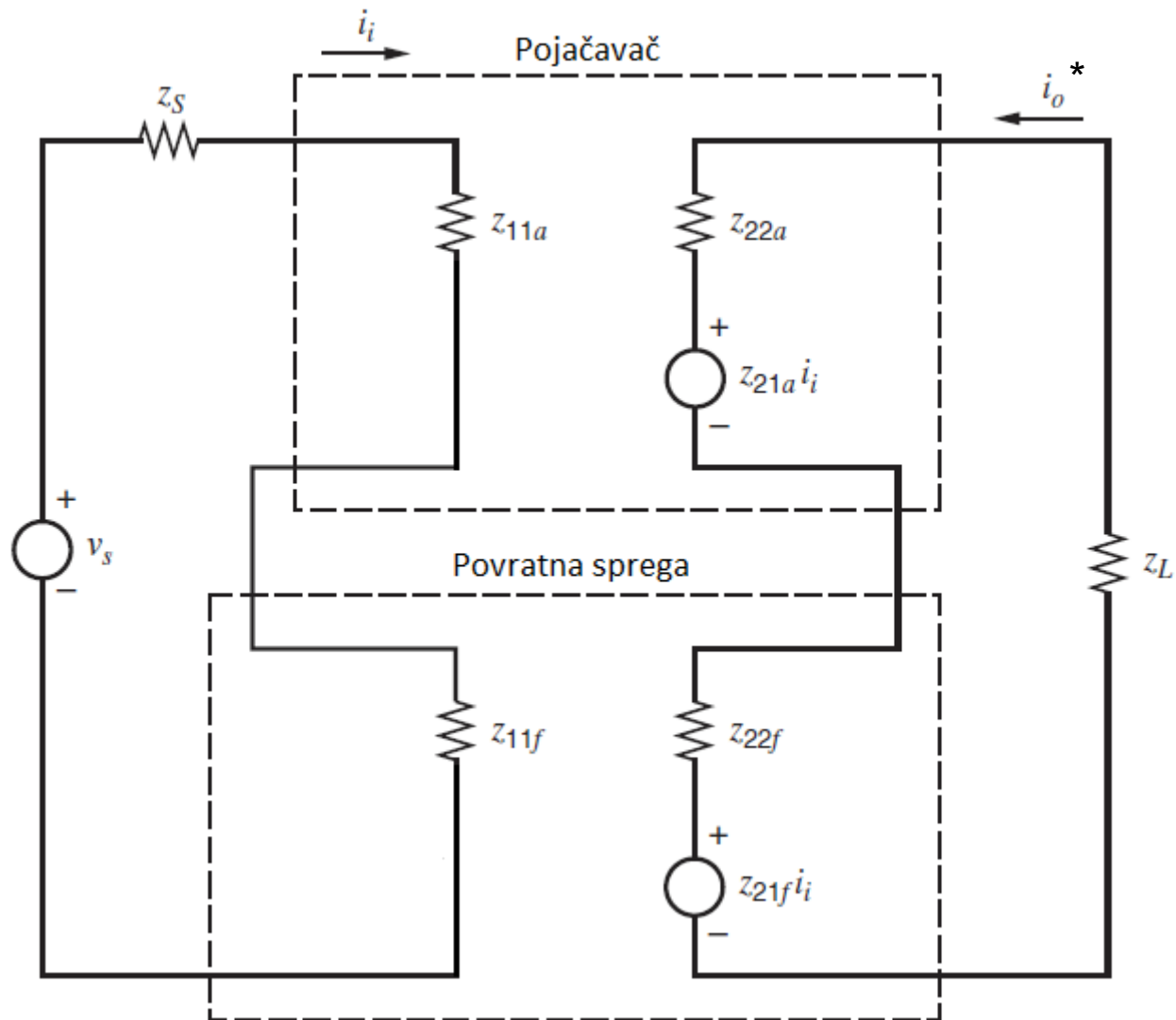
$$a = -\frac{z_{21a}}{z_i z_o}$$

$$f = z_{12f}$$

Približno izračunavanje pojačanja redno-strujne NPS



Alternativno izračunavanje pojačanja “bez reakcije” redno-strujne NPS



Izračunavanje pojačanja “bez reakcije” redno-strujne NPS

Ulazno kolo se dobija raskidanjem izlaznog kola.

Izlazno kolo se dobija ukidanjem pobudnog generatora.

Pojačanje A sa reakcijom se izračunava pomoću pojačanja “bez reakcije” a i kružnog pojačanja $\beta A = -af$.

$$v_s = (z_S + z_{11a} + z_{11f})i_i$$

$$0 = (z_{21a} + z_{21f})i_i + (z_L + z_{22a} + z_{22f})i_o$$

$$z_i = z_S + z_{11a} + z_{11f}$$

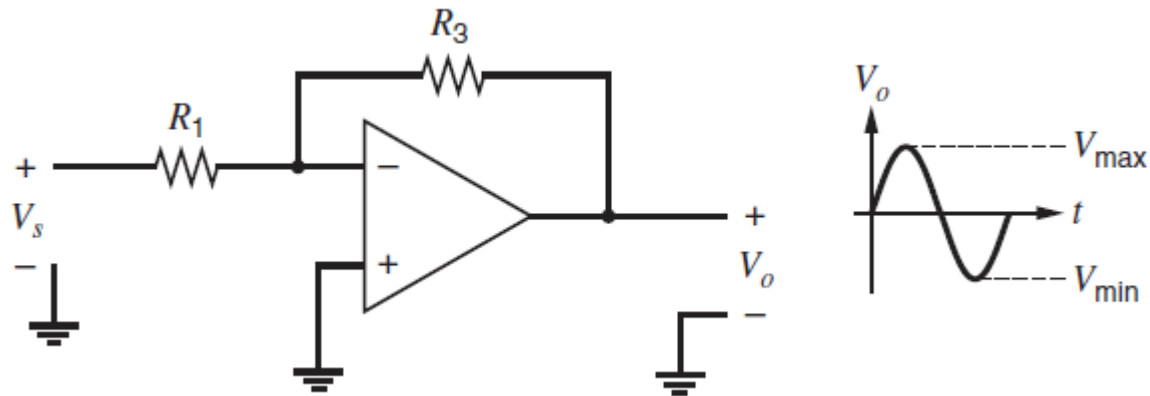
$$z_o = z_L + z_{22a} + z_{22f}$$

$$\frac{i_o^*}{v_s} = \frac{-(z_{21a} + z_{21f})}{z_i z_o}$$

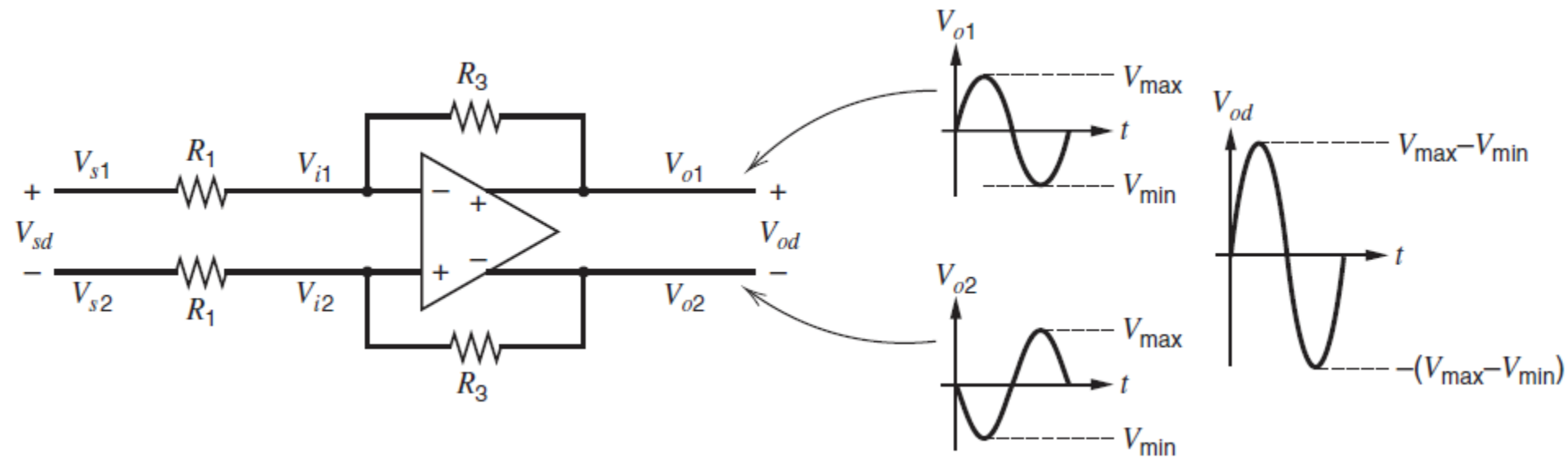
$$a = -\frac{z_{21a} + z_{21f}}{z_i z_o}$$

$$\frac{i_o}{v_s} = \frac{a}{1 + af} = A$$

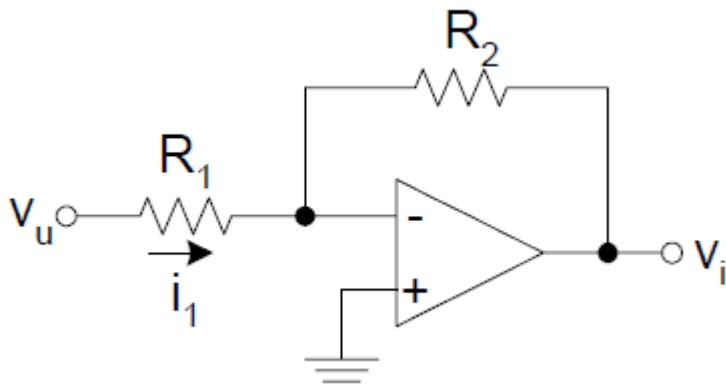
Operacioni pojačavač sa jednostrukim izlazom



Operacioni pojačavač sa diferencijalnim izlazom



Invertujući pojačavač sa beskonačnim pojačanjem

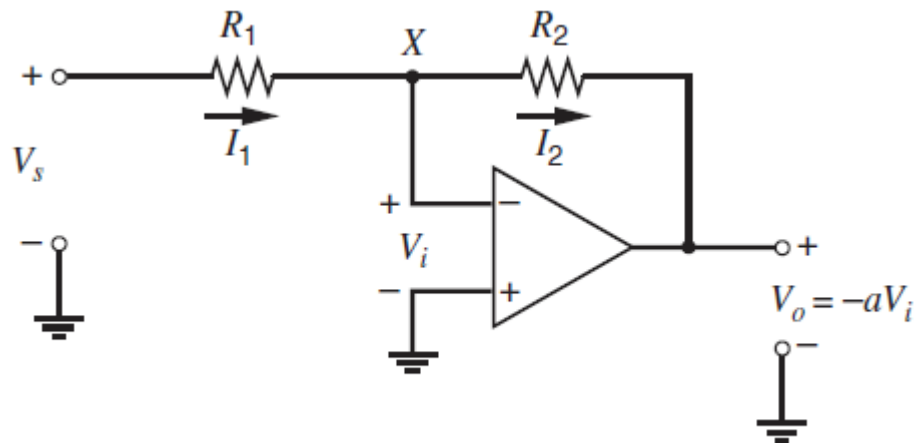


$$i_1 = \frac{v_u}{R_1}$$

$$v_i = -R_2 i_1 = -\frac{R_2}{R_1} v_u$$

$$A_v = \frac{v_i}{v_u} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Invertujući pojačavač sa konačnim pojačanjem



$$\frac{V_s - V_i}{R_1} + \frac{V_o - V_i}{R_2} = 0$$

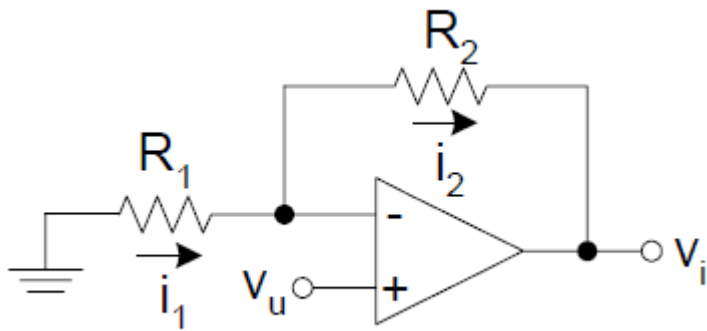
$$V_i = \frac{-V_o}{a}$$

$$\frac{V_o}{V_s} = -\frac{R_2}{R_1} \left[\frac{1}{1 + \frac{1}{a} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)} \right]$$

$$\frac{V_o}{V_s} \simeq -\frac{R_2}{R_1}$$

$$a \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \gg 1$$

Neinvertujući pojačavač sa beskonačnim pojačanjem

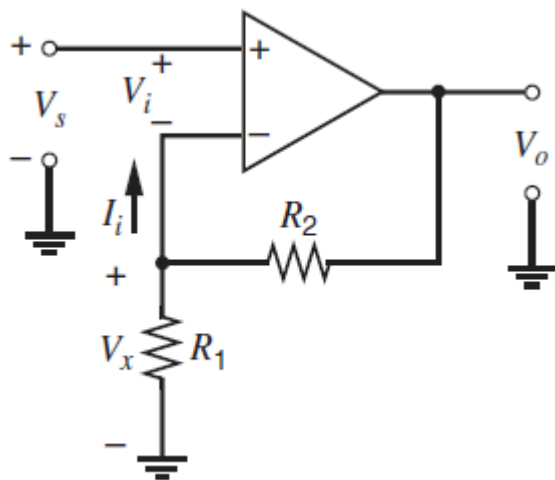


$$i_1 = \frac{v_u}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{v_i - v_u}{R_2} = i_1 = \frac{v_u}{R_1}$$

$$A_v = \frac{v_i}{v_u} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

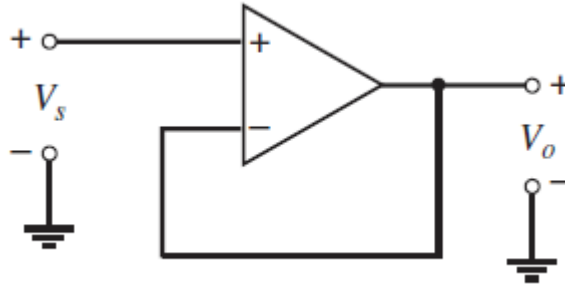
Neinvertujući pojačavač sa konačnim pojačanjem



$$V_x = V_o \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = V_s - \frac{V_o}{a}$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{\frac{aR_1}{R_1 + R_2}}{1 + \frac{aR_1}{R_1 + R_2}} \simeq \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad a \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \gg 1$$

Jedinični bafer sa beskonačnim pojačanjem



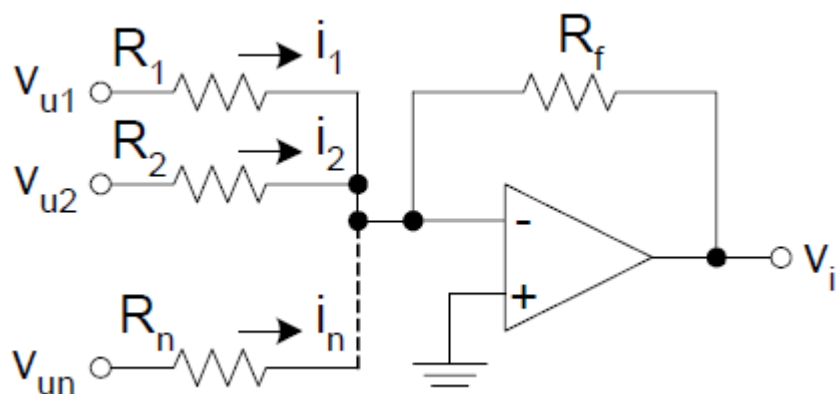
$$R_1 \rightarrow \infty$$

$$R_2 = 0$$

$$a \gg 1$$

$$\frac{V_o}{V_s} = 1$$

Sabirač



$$i_k = \frac{v_{uk}}{R_k}, k = 1, 2, \dots, n$$

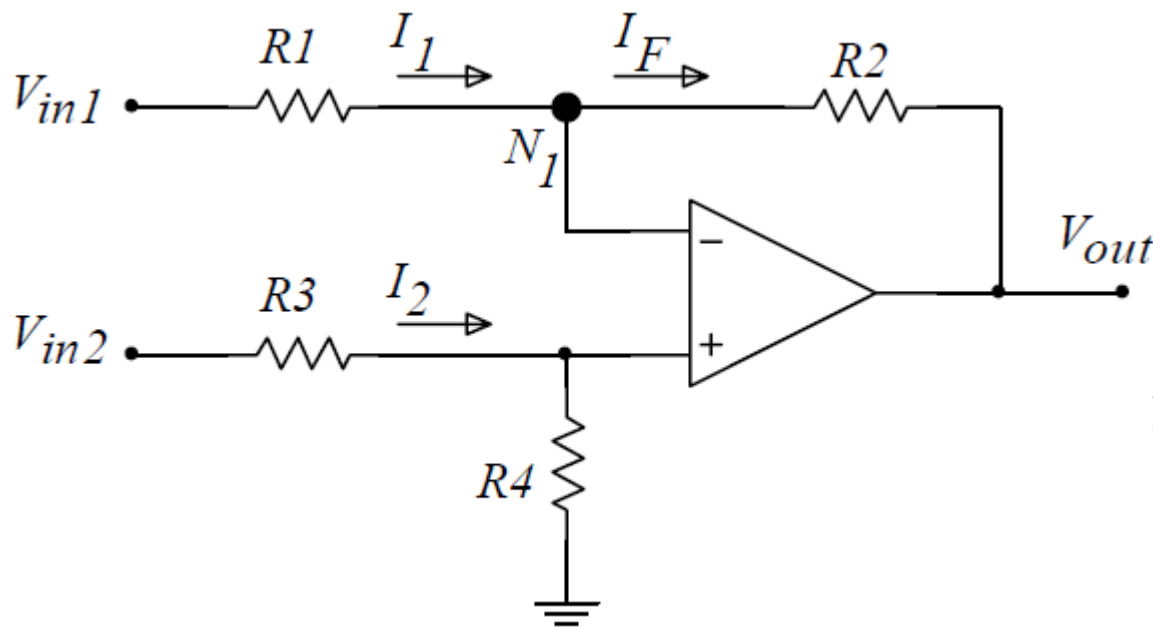
$$v_i = -R_f \sum_{k=1}^n i_k = -R_f \sum_{k=1}^n \frac{v_{uk}}{R_k}$$

Za identične ulazne otpornike:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$$

$$v_i = -R_f \sum_{k=1}^n \frac{v_{uk}}{R_k} = -\frac{R_f}{R} \sum_{k=1}^n v_{uk}$$

Diferencijalni pojačavač



Izlazni napon se računa kao superpozicija dva napona:

$$V_{out1} = -V_{in1} \left(\frac{R2}{R1} \right)$$

$$V_{out2} = V_{in2} \left(\frac{R4}{R3 + R4} \right) \left(1 + \frac{R2}{R1} \right)$$

$$V_{out} = V_{out2} + V_{out1} = V_{in2} \left(\frac{R4}{R3 + R4} \right) \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) - V_{in1} \frac{R2}{R1}$$

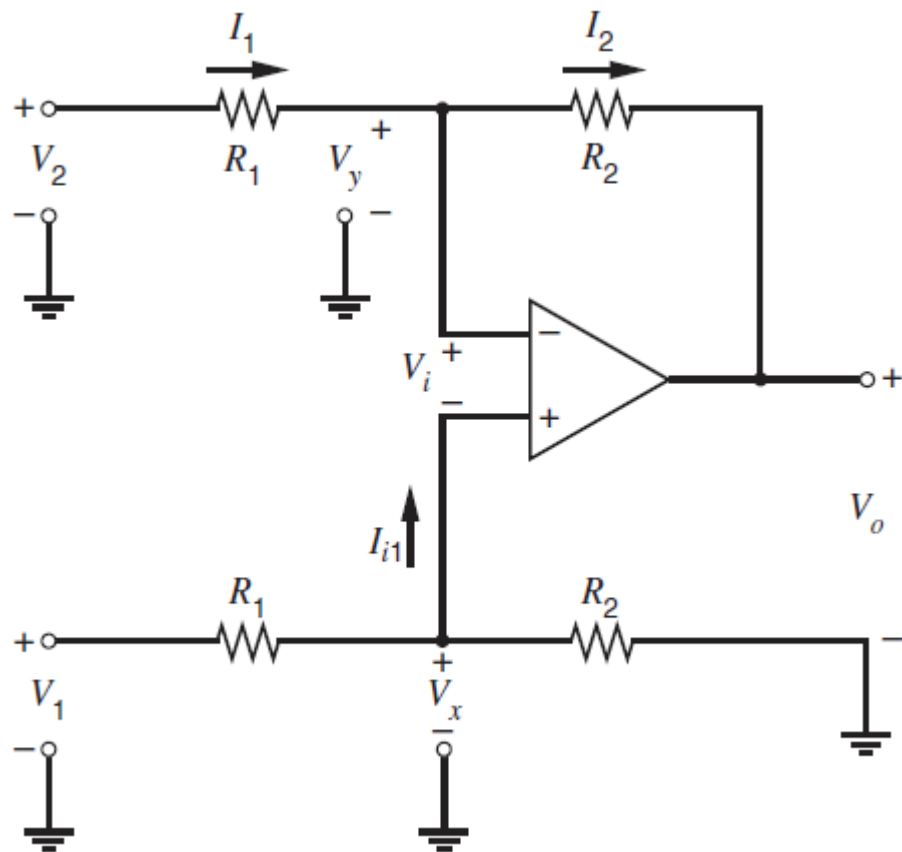
$$V_{out} = \frac{R2}{R1} (V_{in2} - V_{in1})$$

Izlazni napon je proporcionalan razlici ulaznih napona ako je:

$$\left(\frac{R4}{R3 + R4} \right) \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) = \frac{R2}{R1}$$

$$\frac{R4}{R3} = \frac{R2}{R1}$$

Diferencijalni pojačavač



$$V_x = V_1 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

$$I_1 = \left(\frac{V_2 - V_y}{R_1} \right) = I_2$$

$$V_o = V_y - I_2 R_2$$

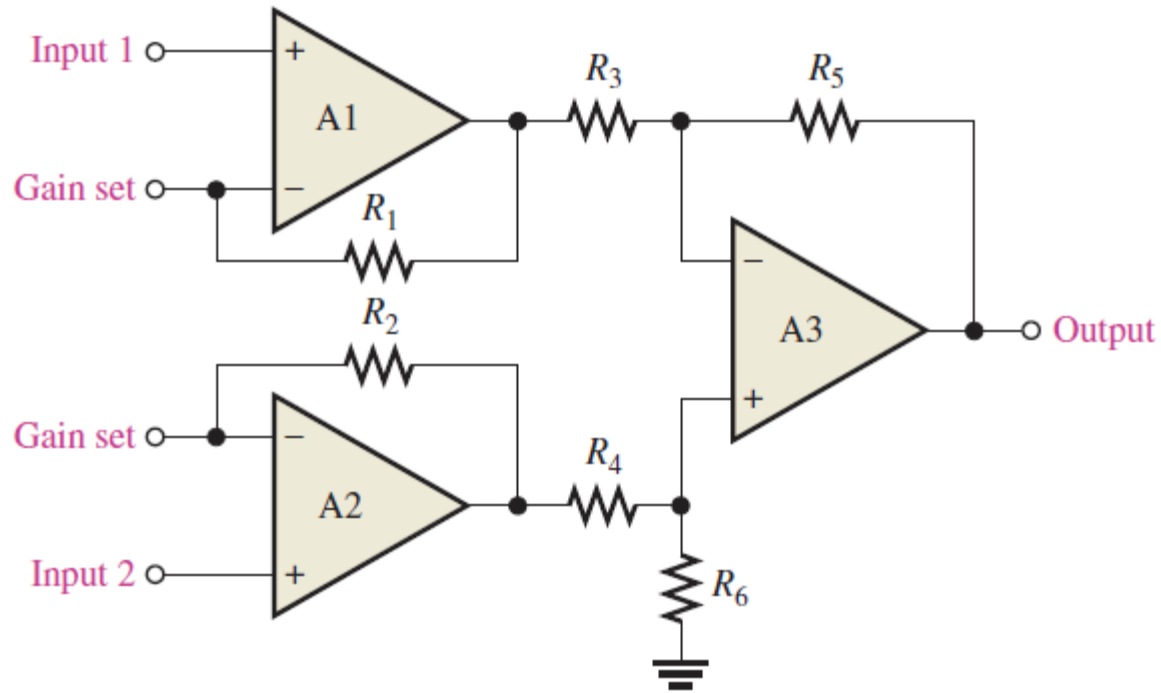
$$a \gg 1$$

$$V_i = 0$$

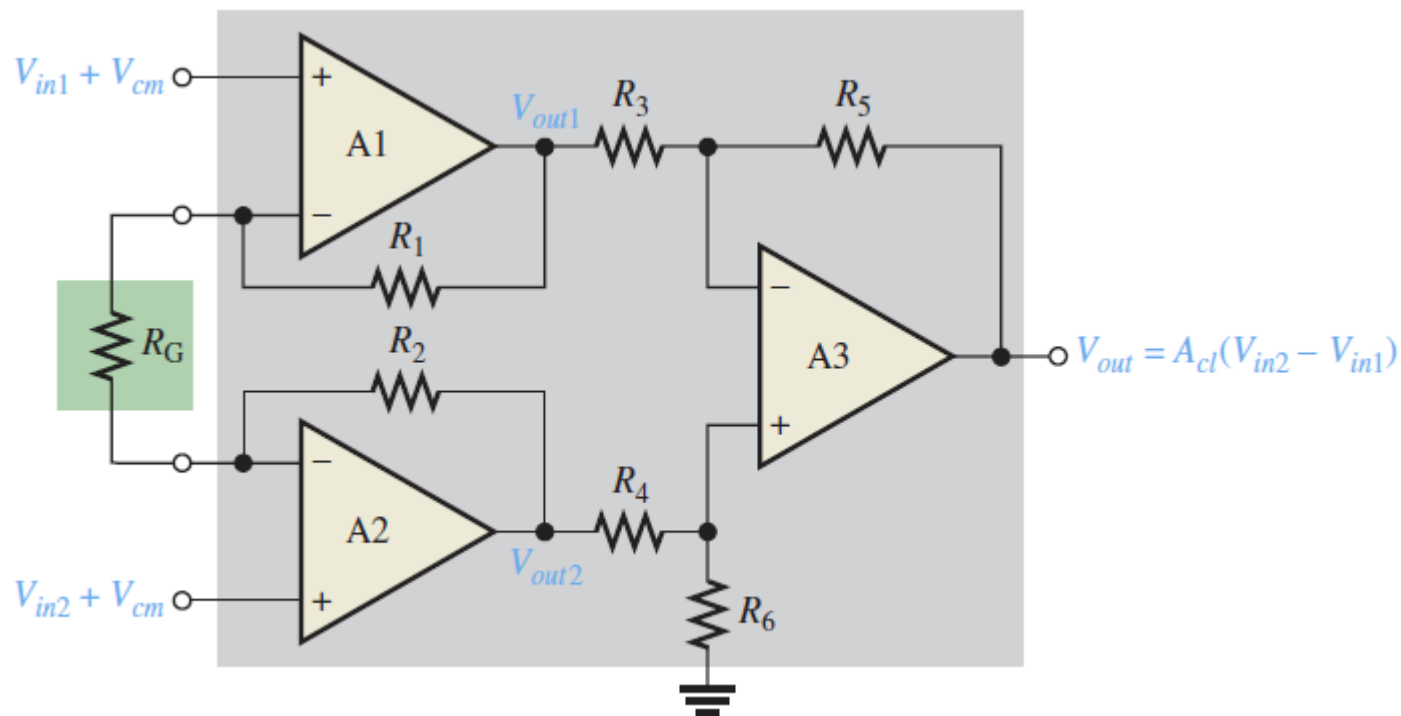
$$V_y = V_x$$

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2)$$

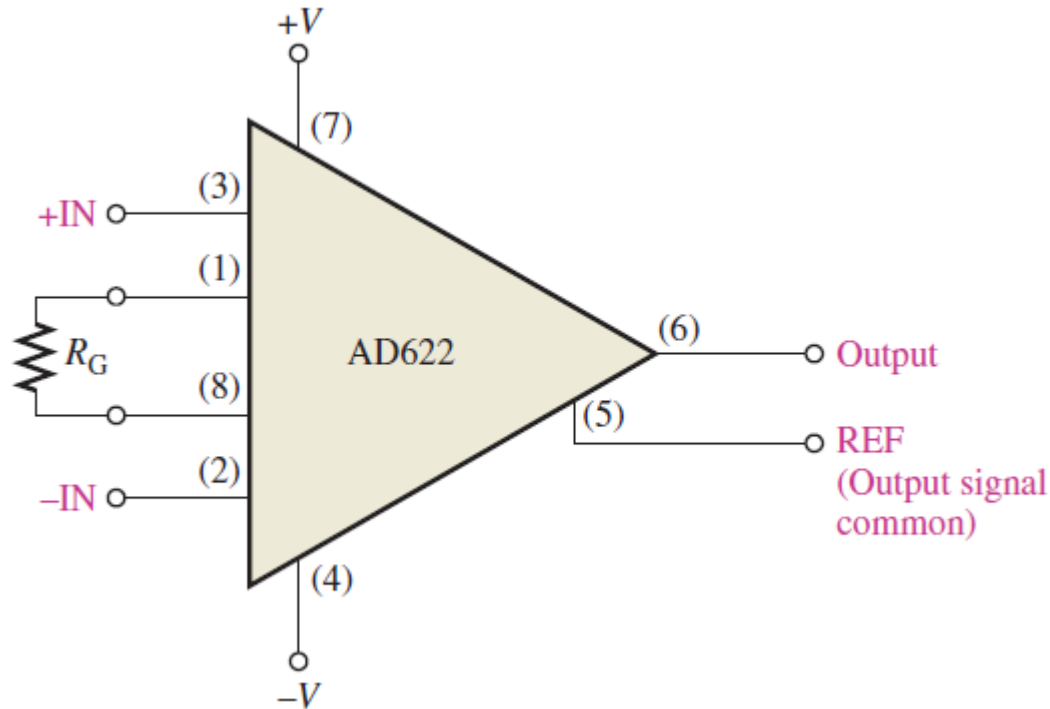
Instrumentacioni pojačavač



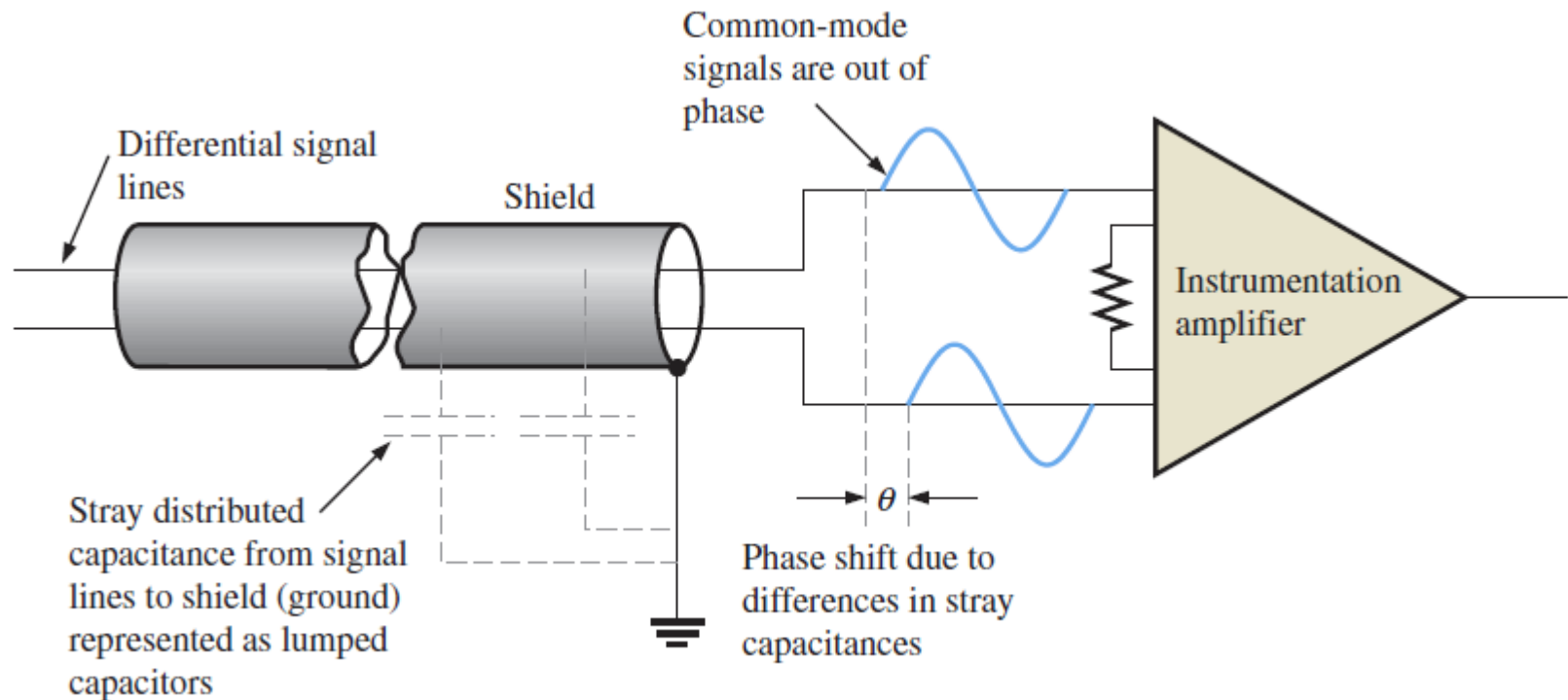
Instrumentacioni pojačavač sa otpornikom za zadavanje pojačanja



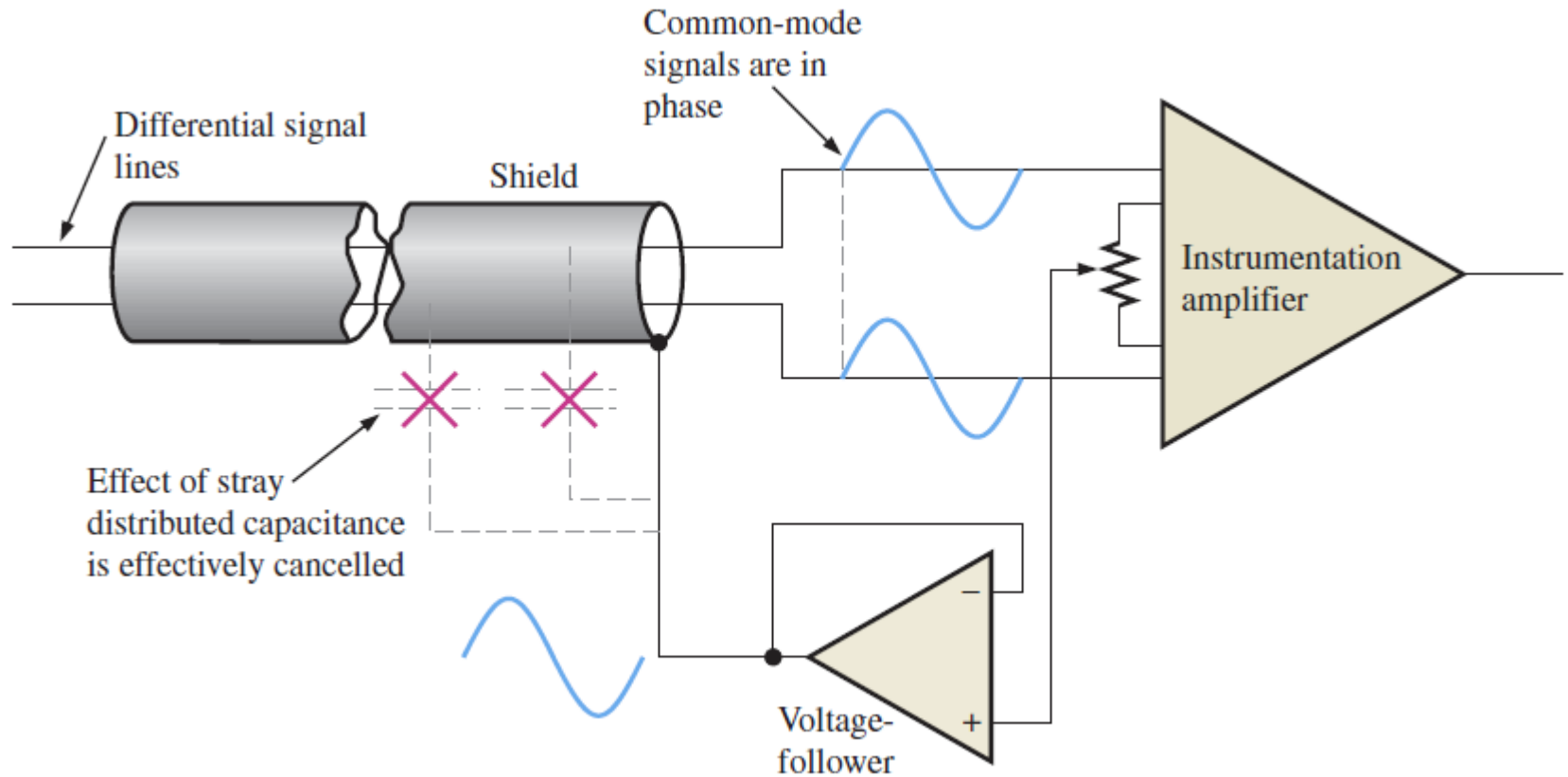
Integrirani instrumentacioni pojačavač sa otpornikom za zadavanje pojačanja



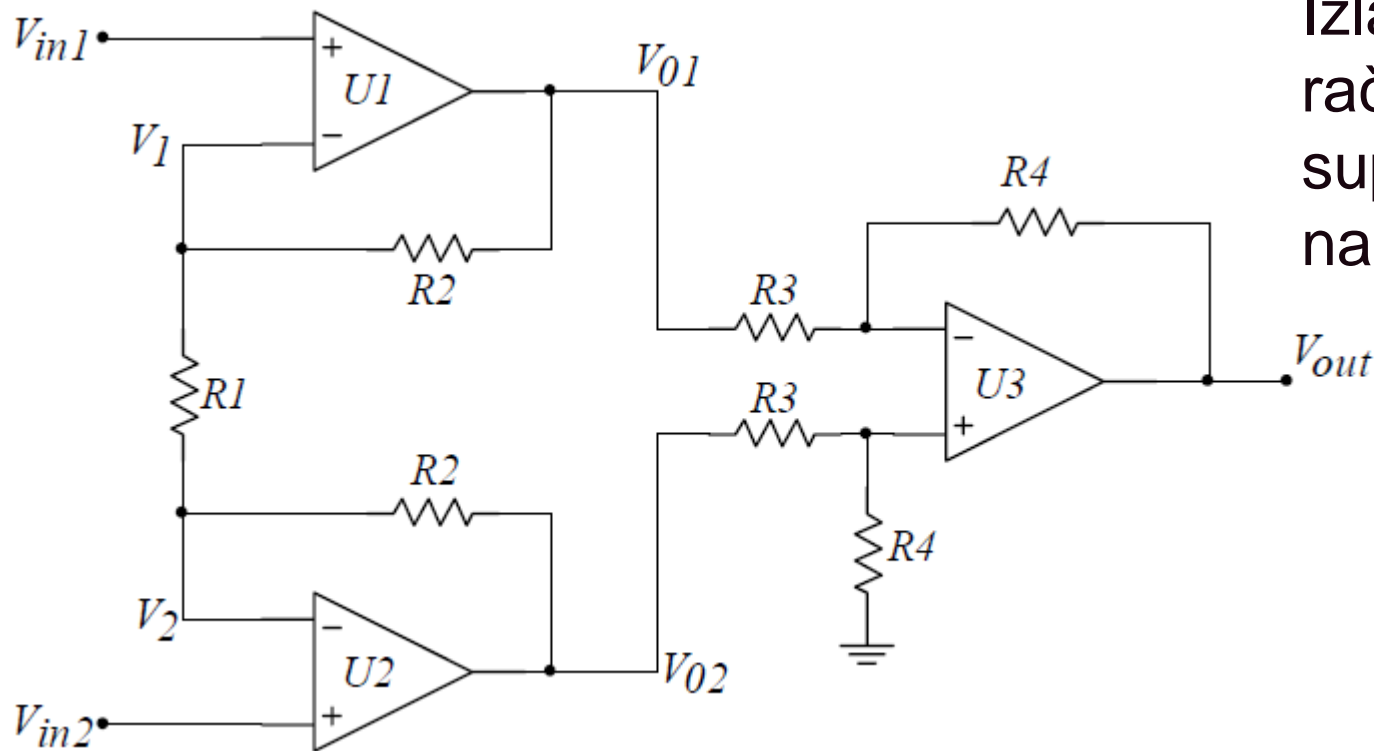
Povezivanje instrumentacionog pojačavača sa udaljenim senzorom



Povezivanje instrumentacionog pojačavača sa udaljenim senzorom



Instrumentacioni pojačavač



Izlazni napon se računa kao superpozicija dva napona:

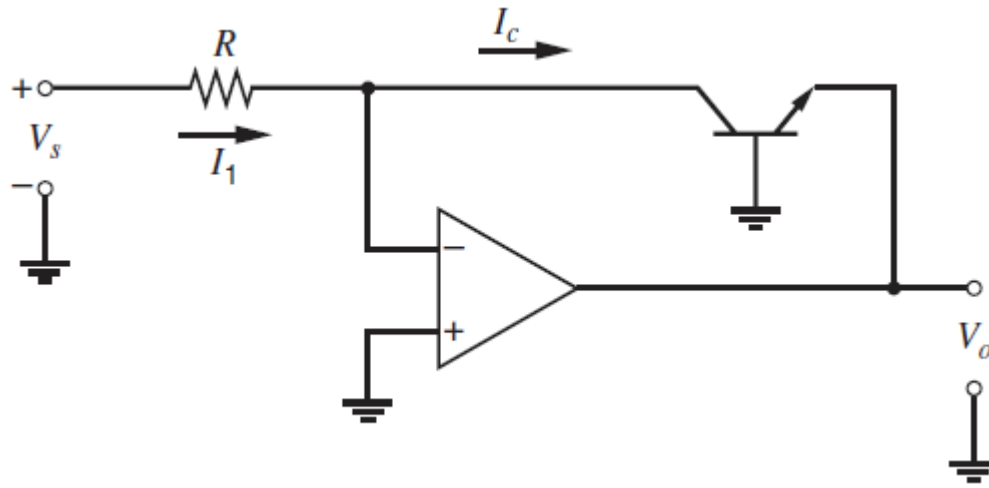
$$V_{01} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) V_{in1} - \frac{R2}{R1} V_{in2}$$

$$V_{out} = V_{01} + V_{02}$$

$$V_{02} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) V_{in2} - \frac{R2}{R1} V_{in1}$$

$$V_{out} = \frac{R4}{R3} \left(1 + \frac{2R2}{R1}\right) (V_{in2} - V_{in1})$$

Logaritamski pojačavač

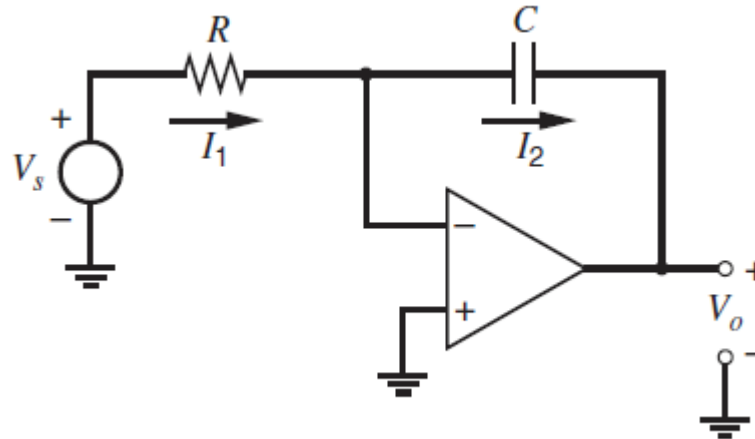


$$I_1 = \frac{V_s}{R} = I_c = I_S \left[\exp \left(\frac{V_{be}}{V_T} \right) - 1 \right] \simeq I_S \exp \left(\frac{V_{be}}{V_T} \right)$$

$$V_o = -V_{be}$$

$$V_o = -V_T \ln \left(\frac{V_s}{I_S R} \right)$$

Integrator

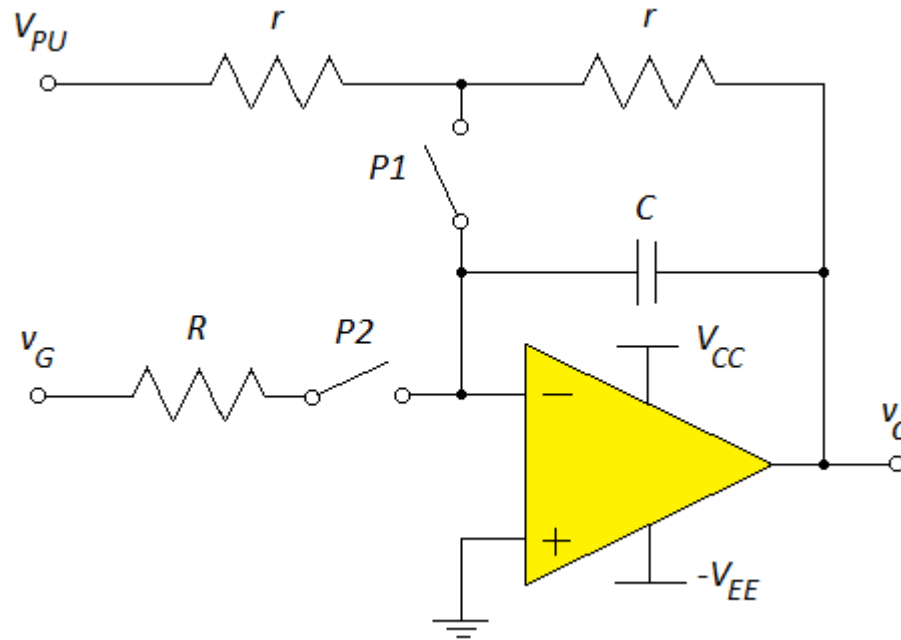


$$I_1 = \frac{V_s}{R} = I_2$$

$$V_o = -\frac{1}{C} \int_0^t I_2 d\tau + V_o(0)$$

$$V_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_s(\tau) d\tau + V_o(0)$$

Trorežimski integrator

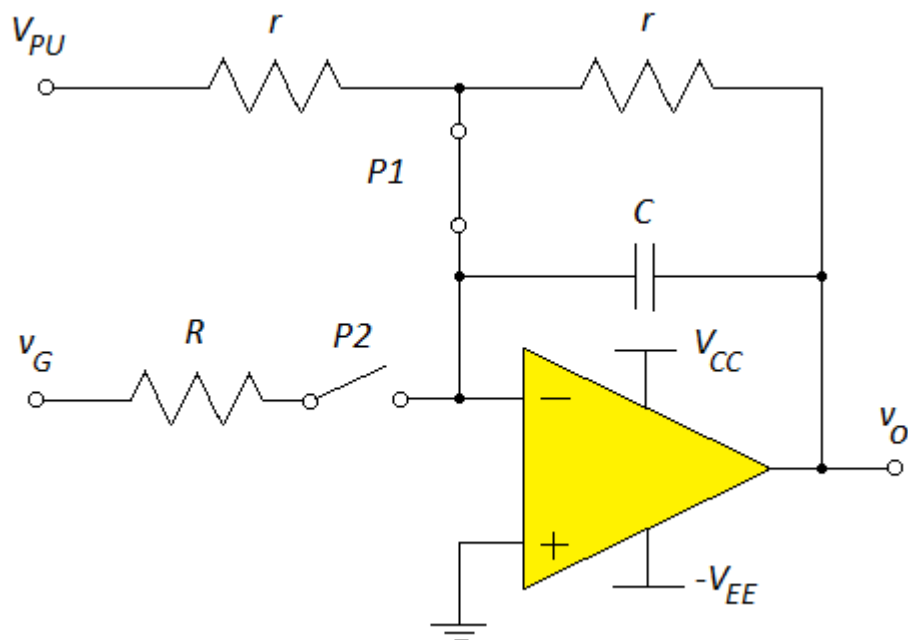


Tri režima rada u zavisnosti od položaja prekidača $P1$ i $P2$ su:

- ❖ postavljanje početnih uslova
- ❖ integracija
- ❖ pamćenje.

Otpornici r se kompromisno biraju da budu što manji za brže postavljanje početnih uslova, ali i što veći za ograničenje izlazne struje operacionog pojačavača u režimima integracije i pamćenja.

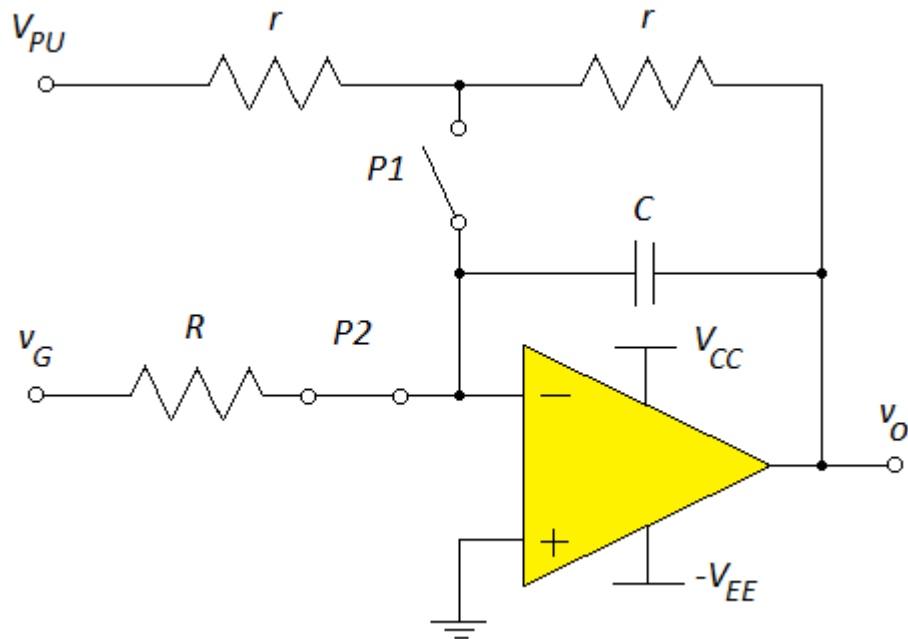
Trorežimski integrator režim postavljanja početnih uslova



Na kraju postavljanja početnih uslova, struja kroz kondenzator C je nula, tako da pojačavač radi kao invertujući pojačavač.

$$v_O = -\frac{r}{r} V_{PU} = -V_{PU}$$

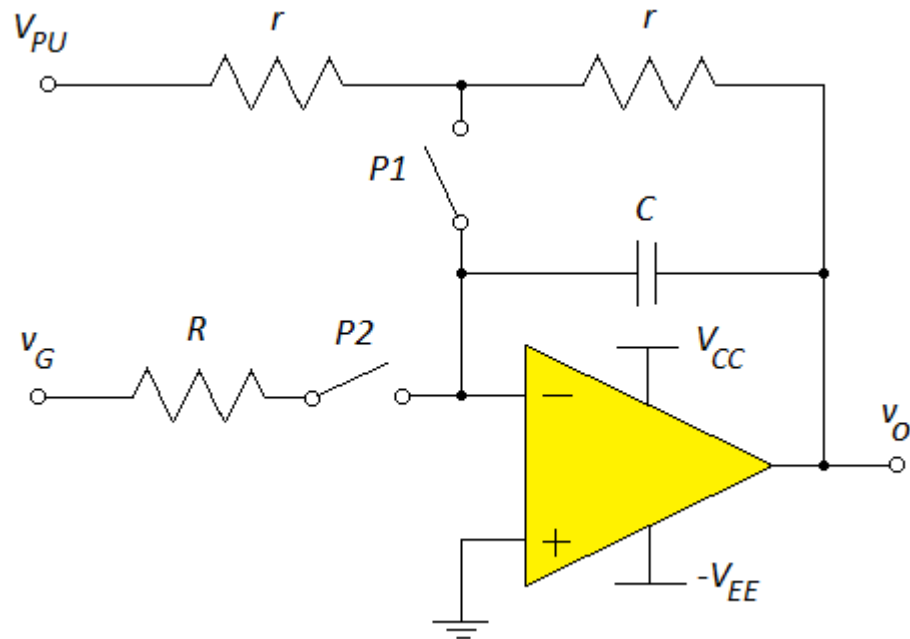
Trorežimski integrator režim integracije



Na kraju režima integracije, izlazni napon je:

$$v_O(T_{INT}) = -V_{PU} - \frac{1}{RC} \int_0^{T_{INT}} v_G(t) dt$$

Trorežimski integrator režim pamćenja

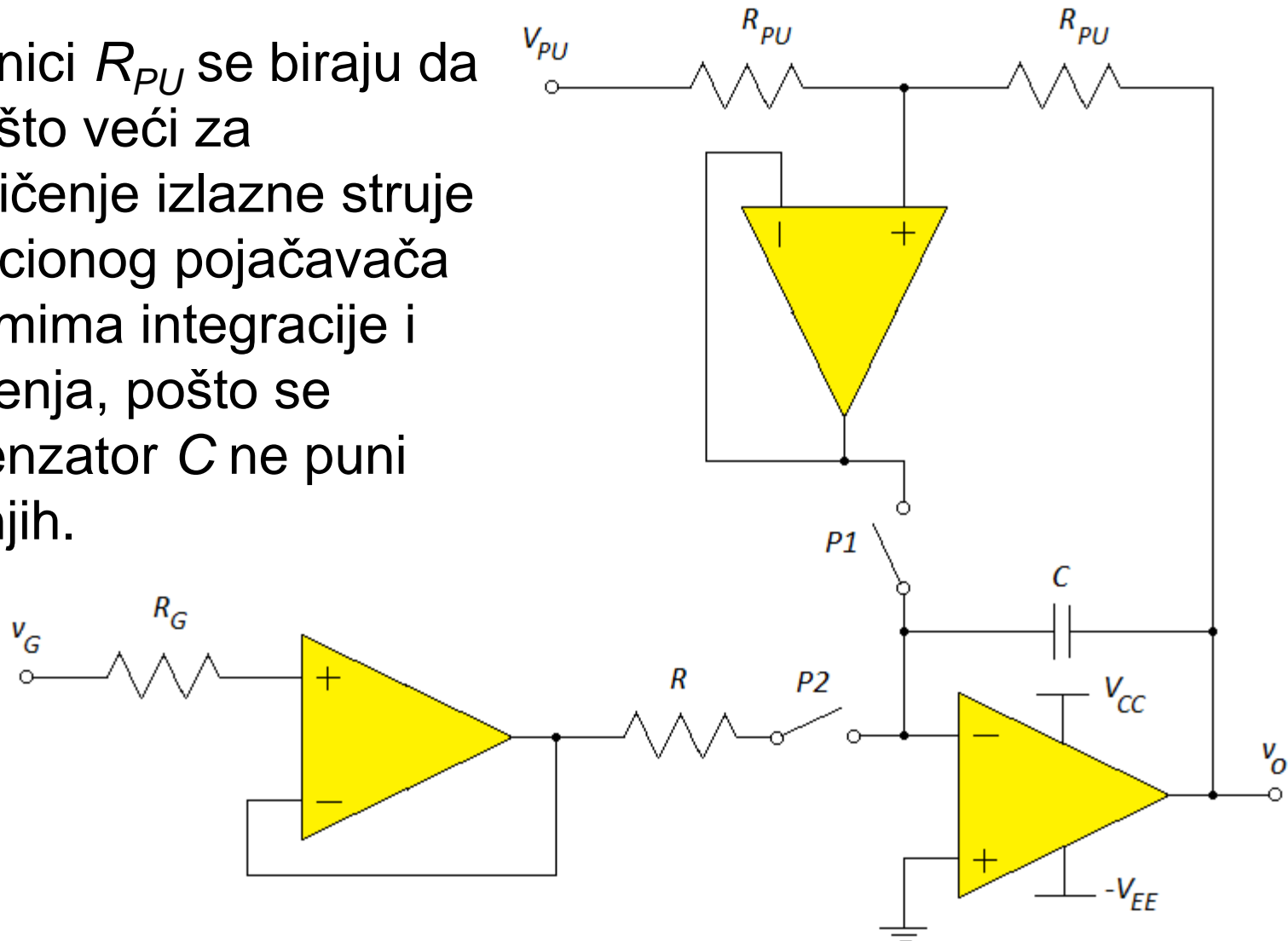


Na kraju režima pamćenja, izlazni napon je:

$$v_o(T_{PAM}) = -V_{PU} - \frac{1}{RC} \int_0^{T_{INT}} v_G(t) dt$$

Trorežimski integrator sa brzim postavljanjem početnih uslova

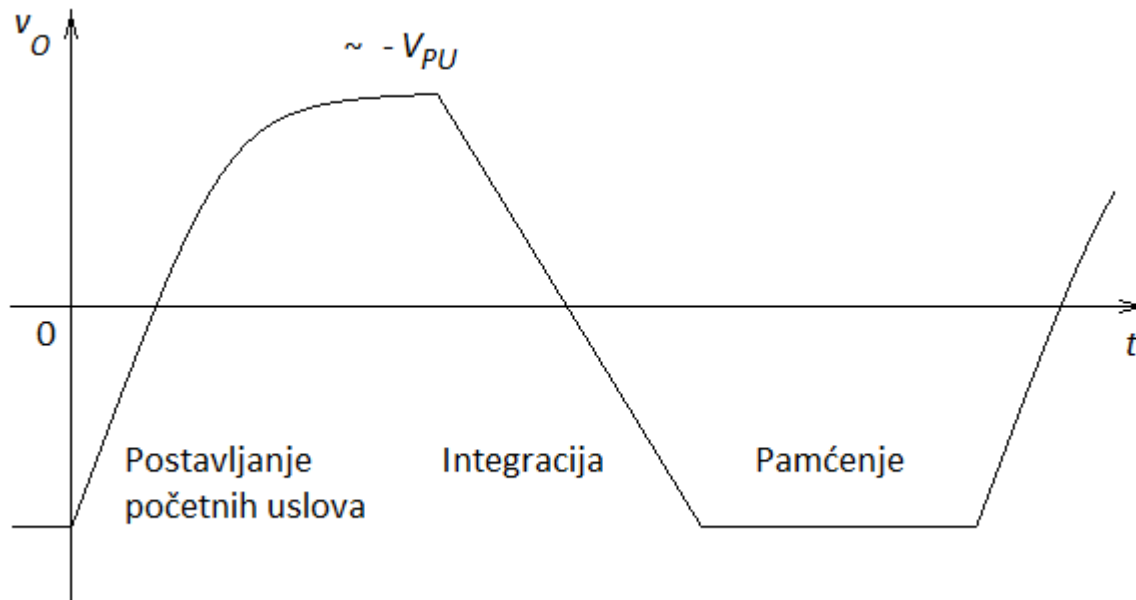
Otpornici R_{PU} se biraju da budu što veći za ograničenje izlazne struje operacionog pojačavača u režimima integracije i pamćenja, pošto se kondenzator C ne puni kroz njih.



Trorežimski integrator vremenski dijagrami

Primer: $V_{PU} < 0$ i $v_G = \text{const} > 0$

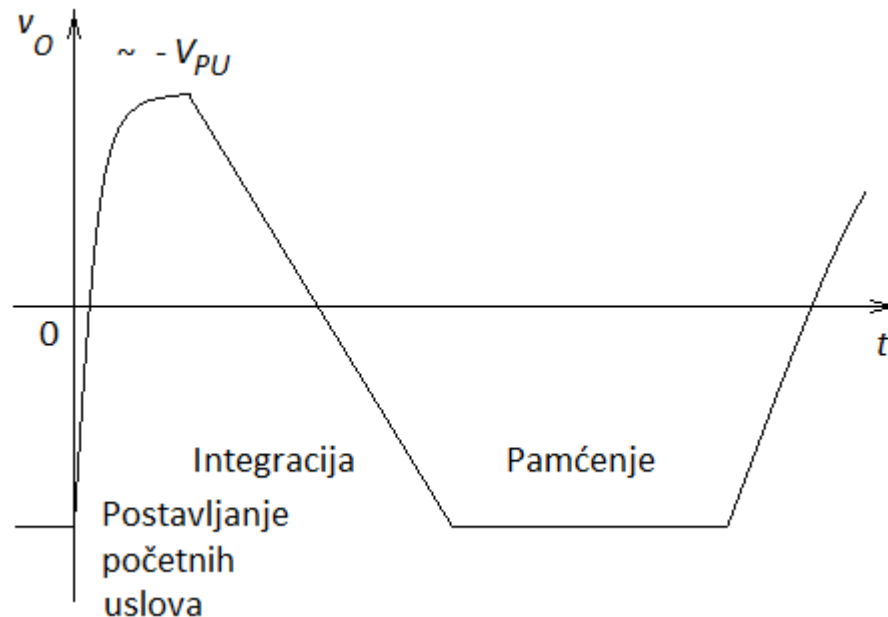
Za vreme režima integracije, izlazni napon je: $v_O(t) = -V_{PU} - \frac{V_G}{RC}t$



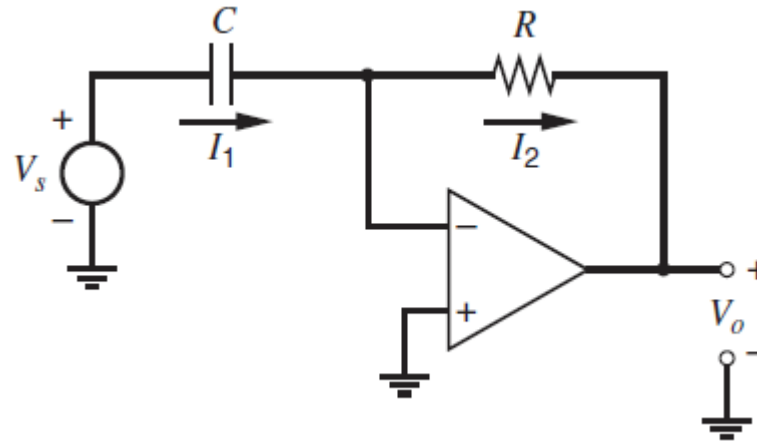
Trorežimski integrator sa brzim zadavanjem početnih uslova vremenski dijagrami

Primer: $V_{PU} < 0$ i $v_G = \text{const} > 0$

Za vreme režima integracije, izlazni napon je: $v_O(t) = -V_{PU} - \frac{V_G}{RC}t$



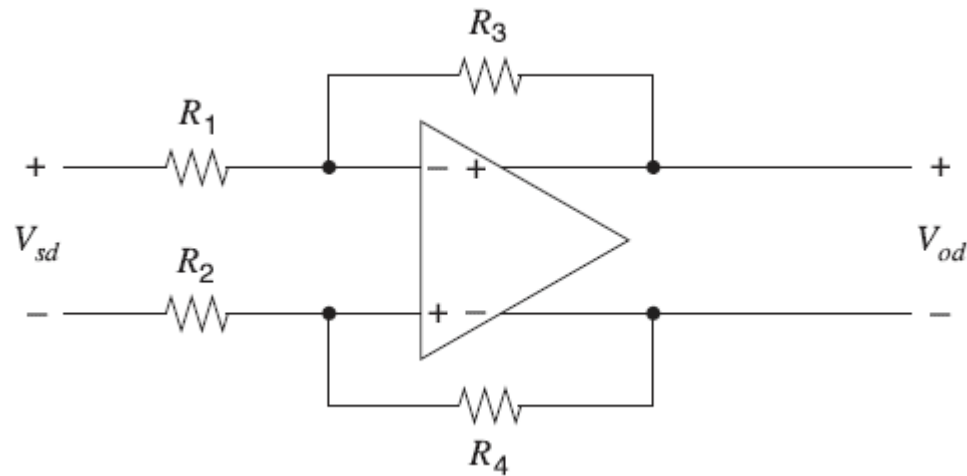
Diferencijator



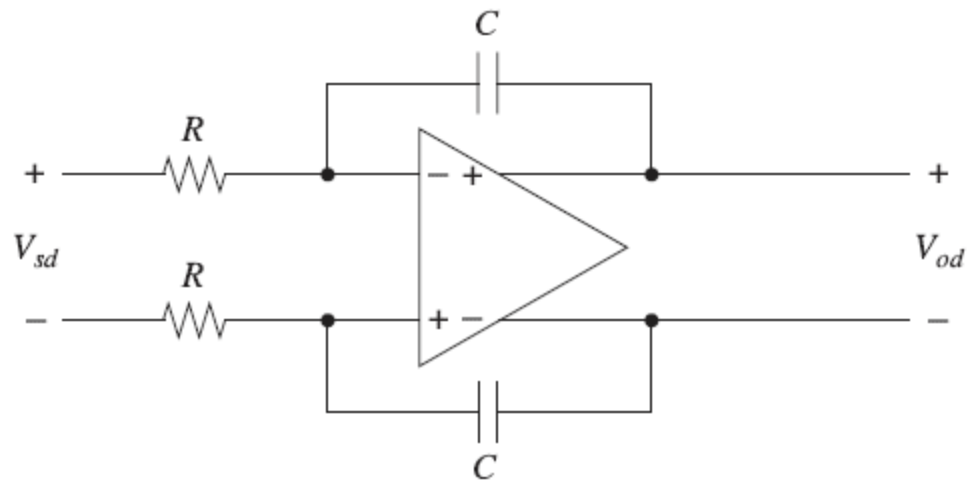
$$I_1 = C \frac{dV_s}{dt} = I_2$$

$$V_o = -RI_2 = -RC \frac{dV_s}{dt}$$

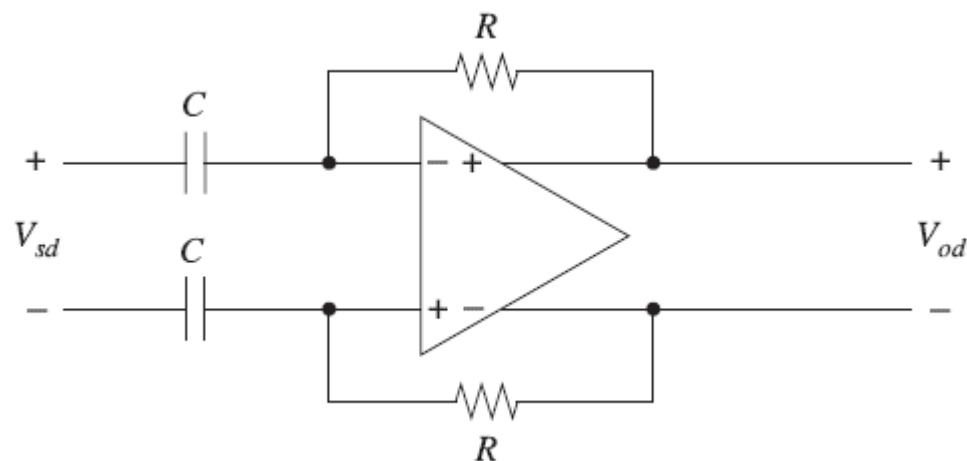
Diferencijalni invertujući pojačavač



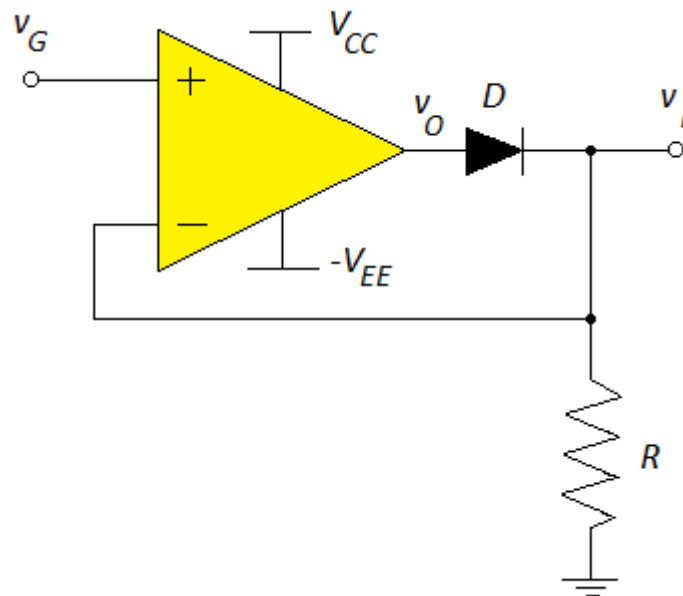
Diferencijalni integrator



Diferencijalni diferencijator



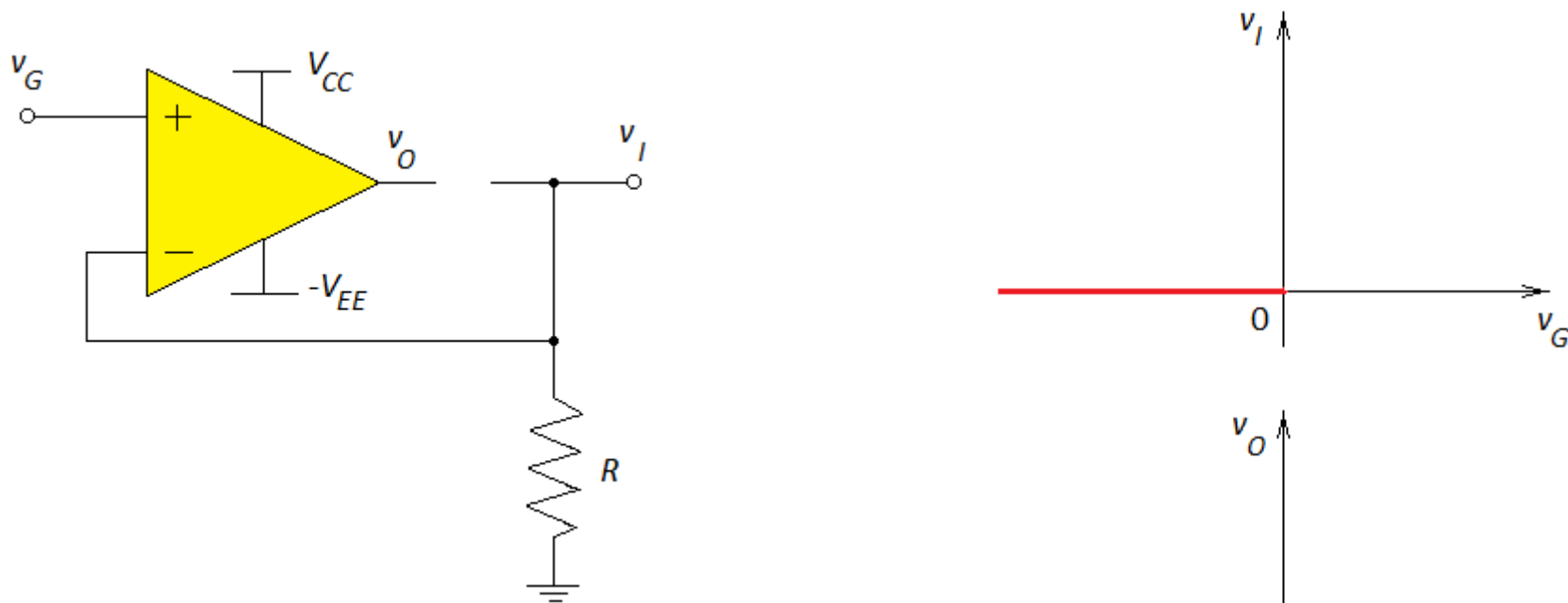
Polutalasni usmerač sa jednom diodom i operacionim pojačavačem



Ukupno postoji 8 varijanti kola u zavisnosti od:

- ❖ Smera diode D (prikazanog ili obrnutog)
- ❖ Izvora za napajanje ($V_R < 0$) umesto mase na otporniku R
- ❖ Izvora za napajanje ($V_R > 0$) umesto mase na otporniku R

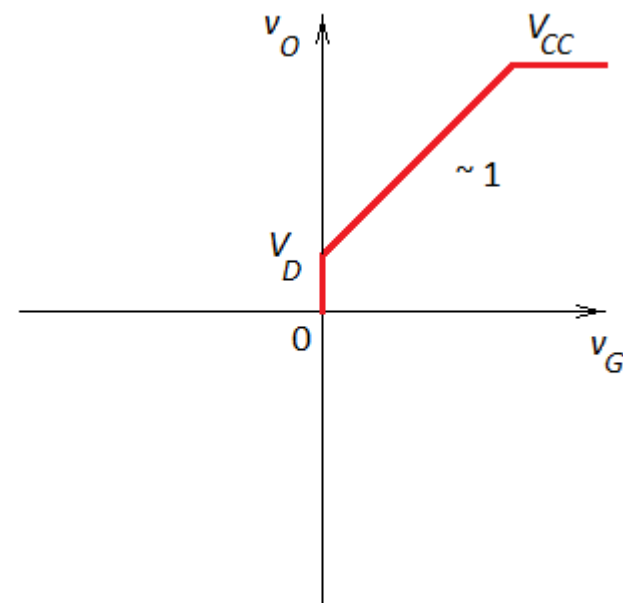
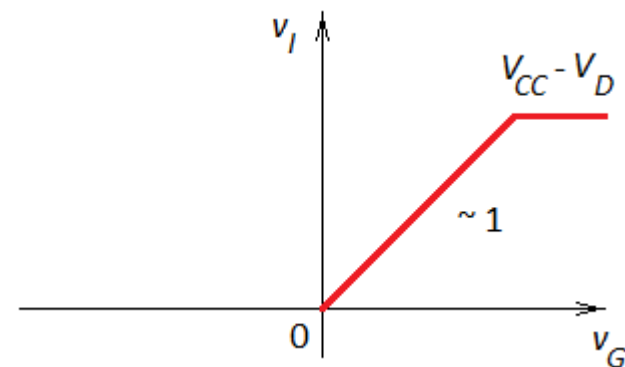
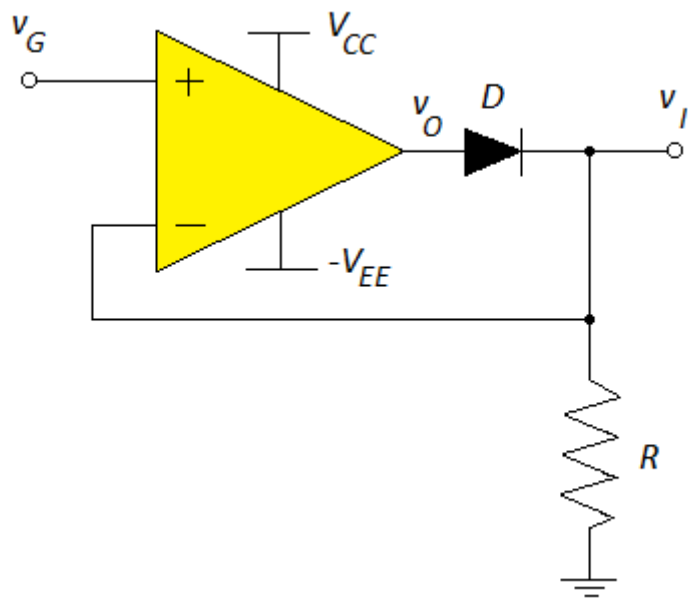
Polutalasni usmerač sa jednom diodom i beskonačnim pojačanjem



Dioda ne vodi, pa ne postoji negativna povratna sprega.

$$v_G < 0 \quad v_I = 0 \quad v_O = -V_{EE}$$

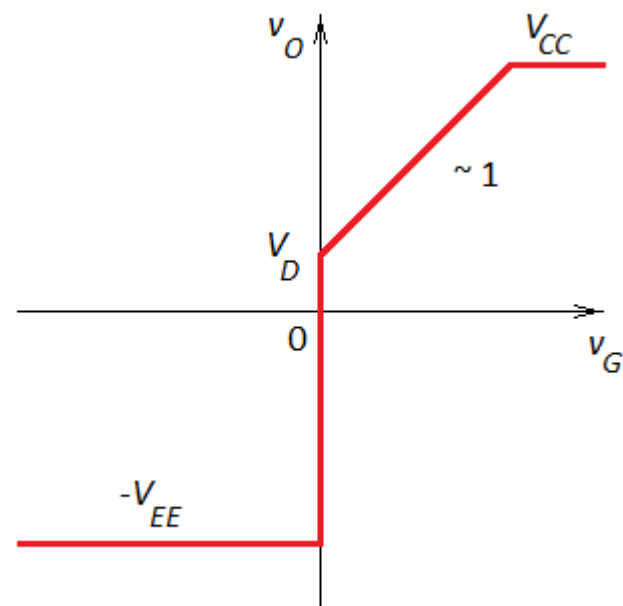
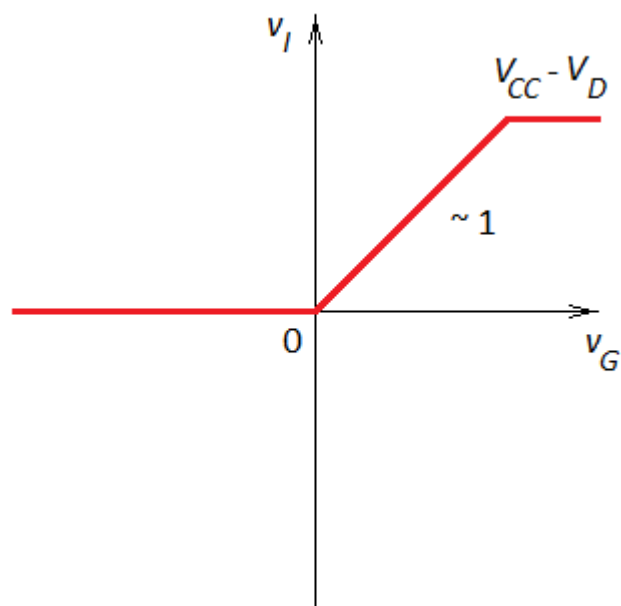
Polutalasni usmerač sa jednom diodom i beskonačnim pojačanjem



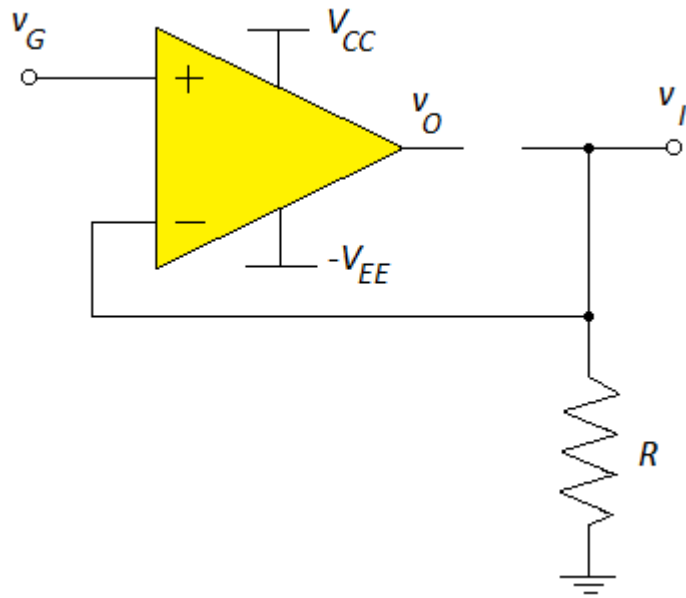
Dioda vodi, pa postoji negativna povratna sprega.

$$v_G \geq 0 \quad v_I = v_G \quad v_O = v_G + V_D$$

Polutalasni usmerač sa jednom diodom i beskonačnim pojačanjem

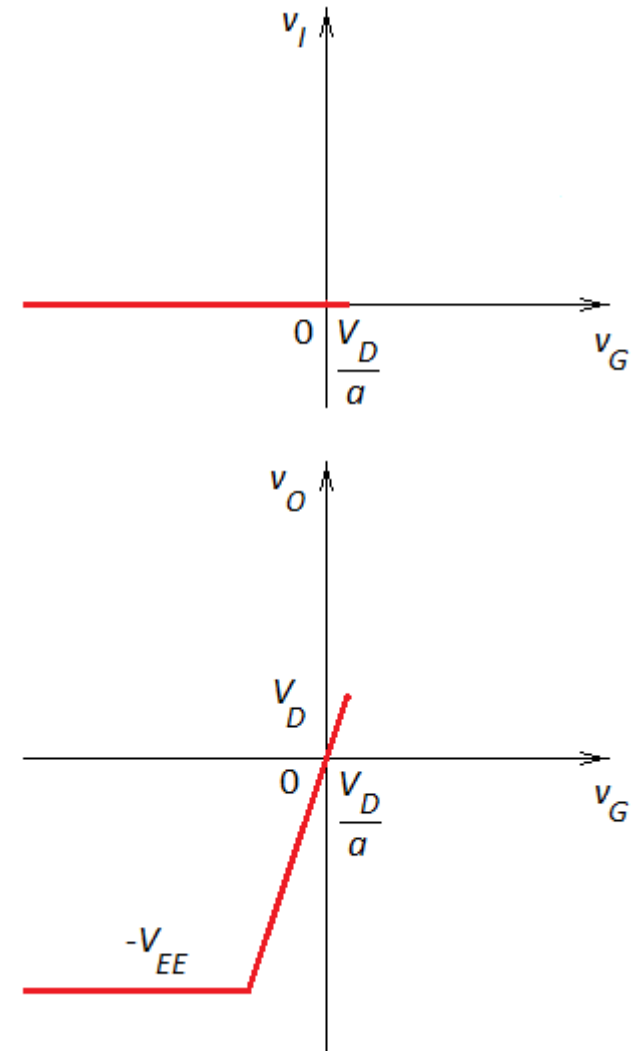


Polutalasni usmerač sa jednom diodom i konačnim pojačanjem

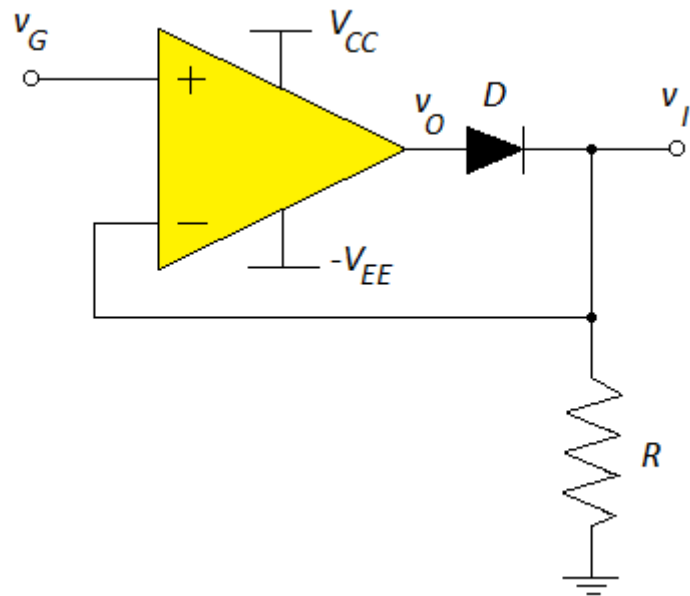


Dioda ne vodi, pa ne postoji negativna povratna sprega.

$$v_G < \frac{V_D}{a} \quad v_I = 0 \quad v_O = av_G \quad v_O = -V_{EE}$$

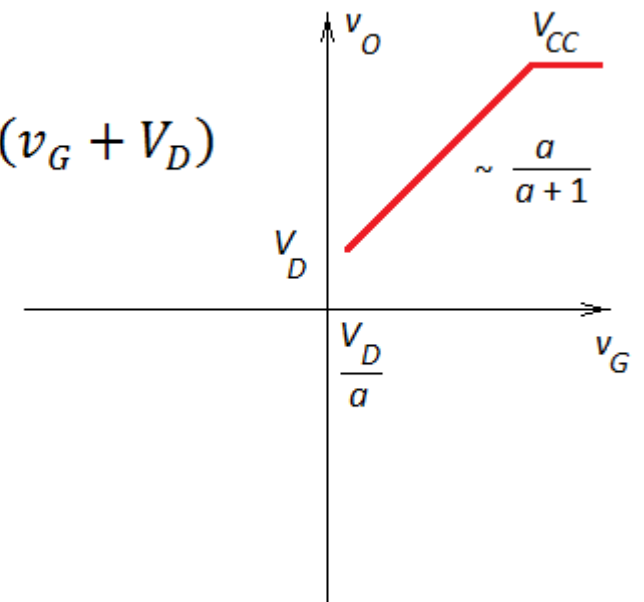
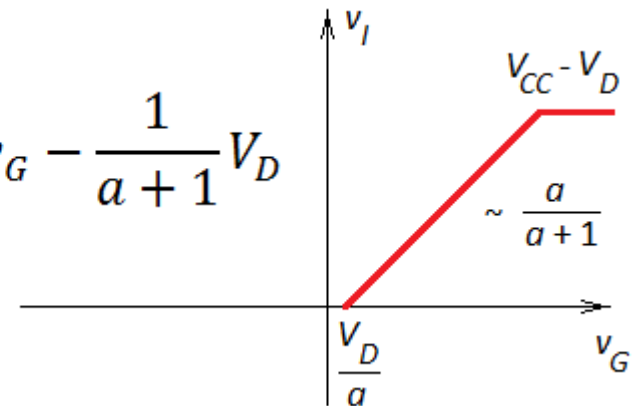


Polutalasni usmerač sa jednom diodom i konačnim pojačanjem



$$v_I = \frac{a}{a+1} v_G - \frac{1}{a+1} V_D$$

$$v_O = \frac{a}{a+1} (v_G + V_D)$$

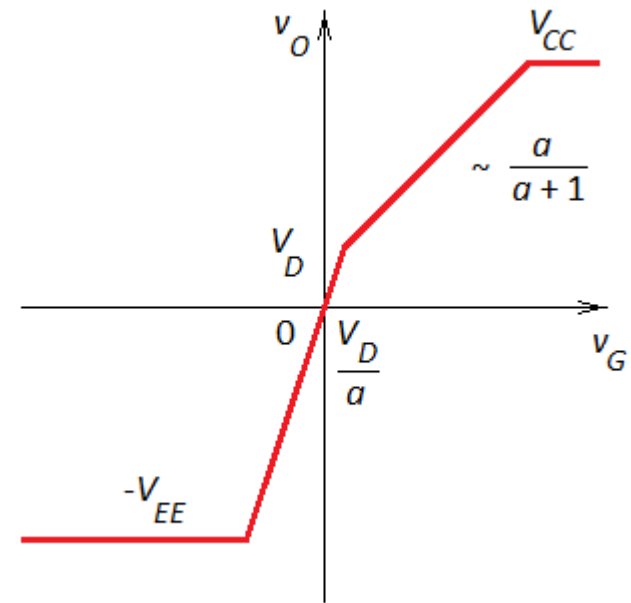
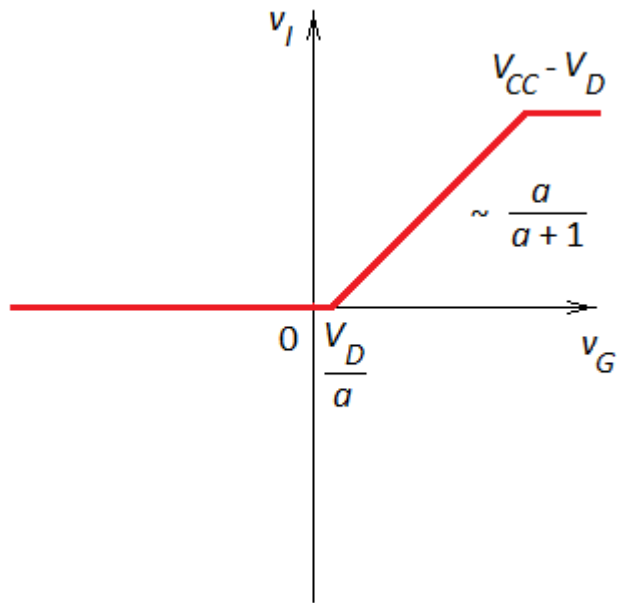


$$v_G \geq \frac{V_D}{a} \quad v_O = a(v_G - v_I)$$

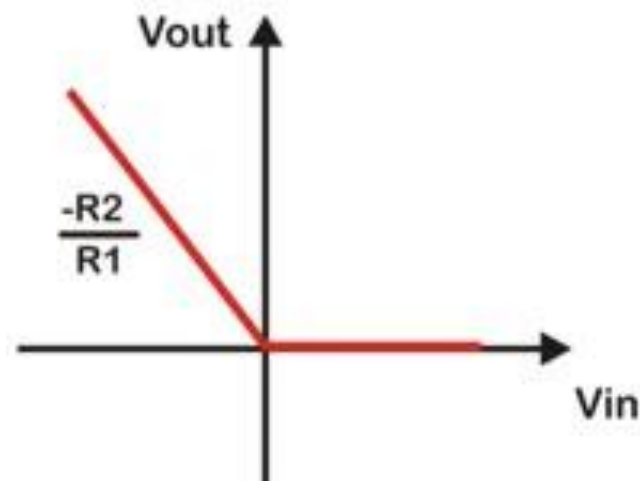
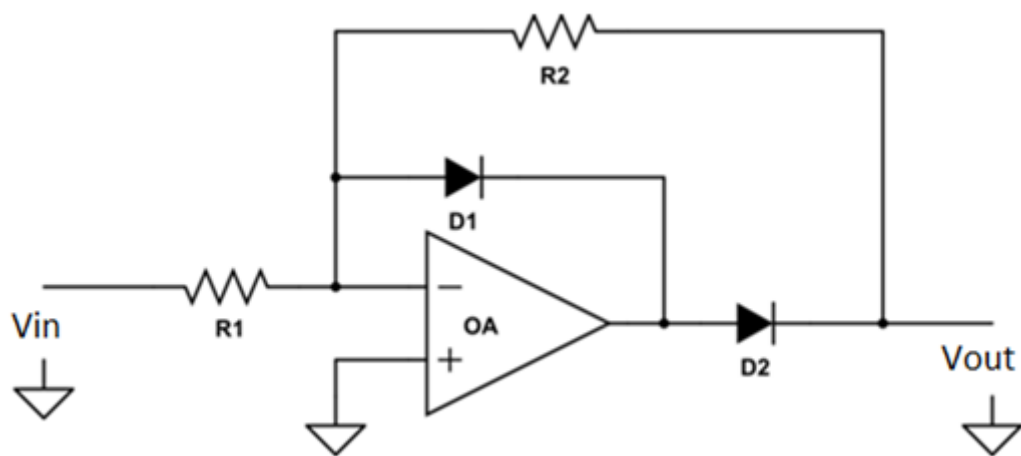
$$v_O = v_I + V_D \quad a(v_G - v_I) = v_I + V_D$$

$$av_G = (a+1)v_I + V_D$$

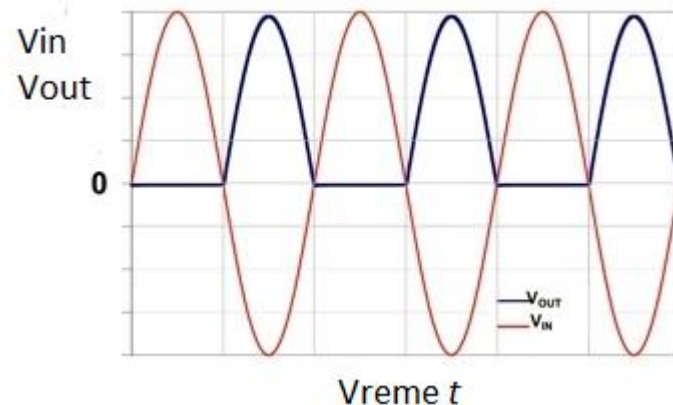
Polutalasni usmerač sa jednom diodom i konačnim pojačanjem



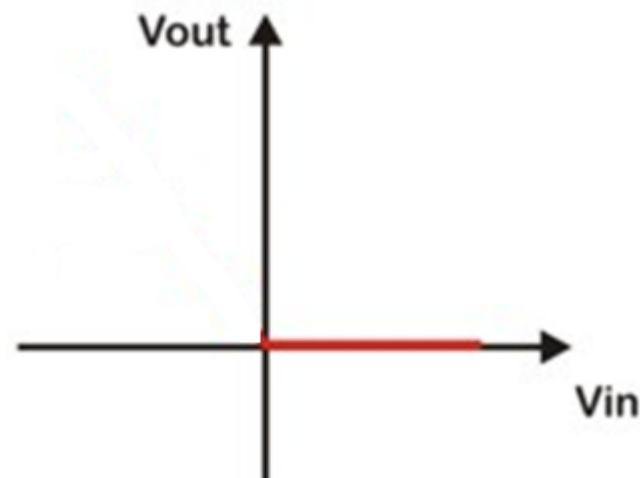
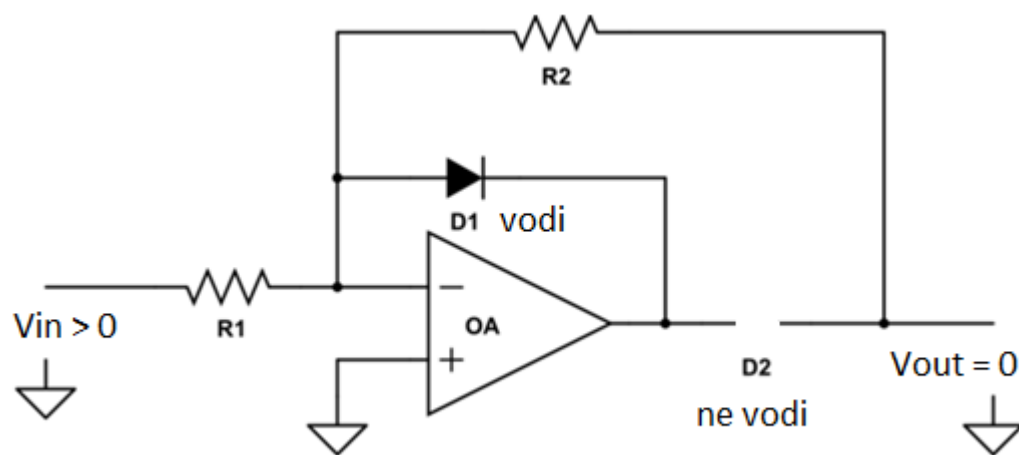
Polutalasni usmerač sa dve diode (šema, prenosna funkcija i vremenski dijagrami)



Negativna povratna sprega ne menja polaritet signala na ulazu pojačavača, tako da je ulaz na invertujućem (-) priključku pozitivan za pozitivan V_{in} , i negativan za negativno V_{in} .



Polutalasni usmerač sa dve diode (šema, prenosna funkcija i vremenski dijagrami)

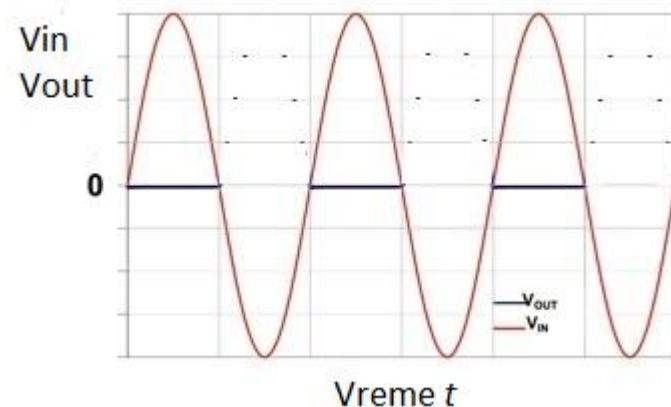


$$v^+ = 0$$

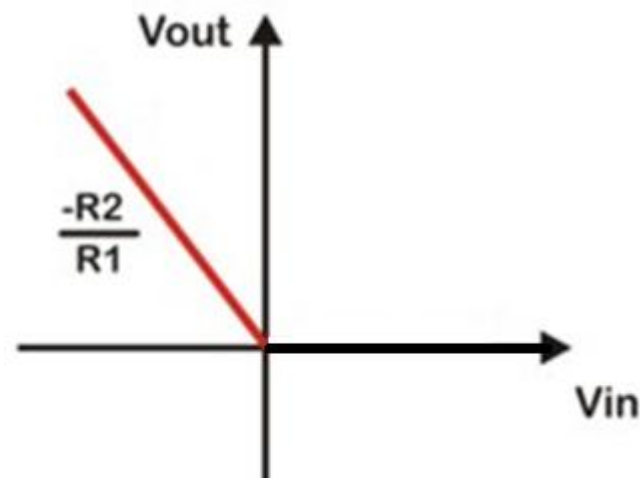
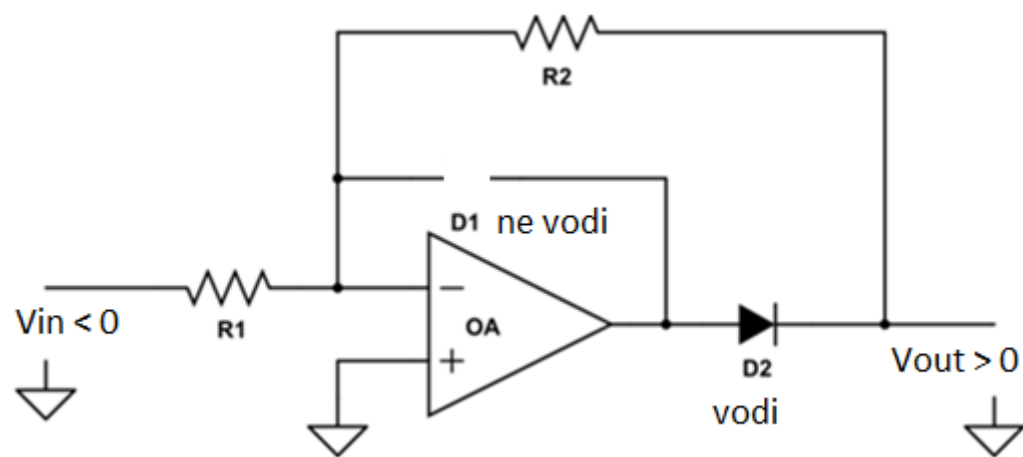
$$v^- = 0^+ = 0 + \varepsilon, \varepsilon > 0, \varepsilon \rightarrow 0$$

$$v_{OA} = a(v^+ - v^-) = -av^- = -a\varepsilon < 0, a \rightarrow \infty$$

$$v_{OA} = -V_{D1} < 0$$



Polutalasni usmerač sa dve diode (šema, prenosna funkcija i vremenski dijagrami)

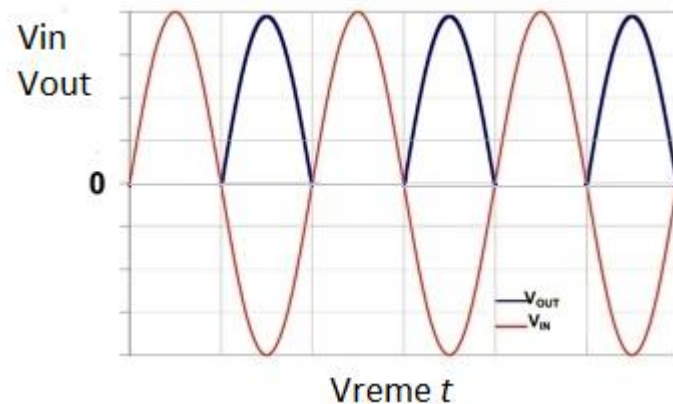


$$v^+ = 0$$

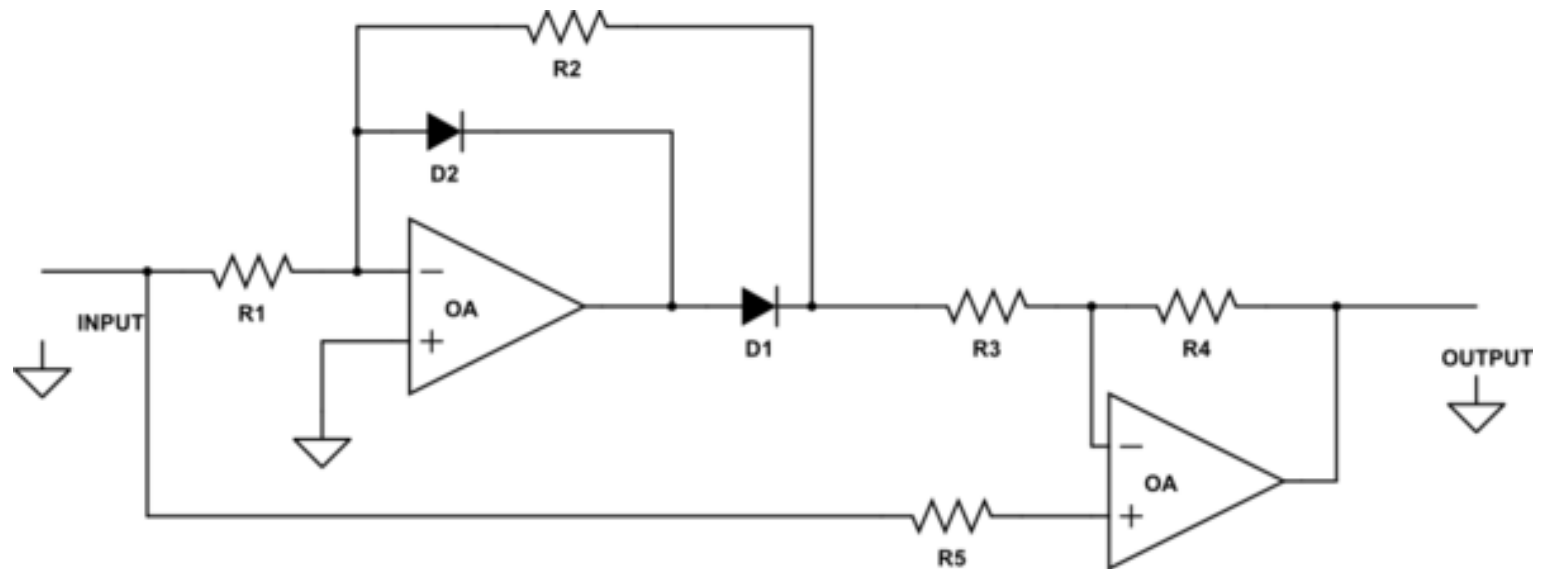
$$v^- = 0^- = 0 - \varepsilon, \varepsilon > 0, \varepsilon \rightarrow 0$$

$$v_{OA} = a(v^+ - v^-) = -av^- = a\varepsilon > 0, a \rightarrow \infty$$

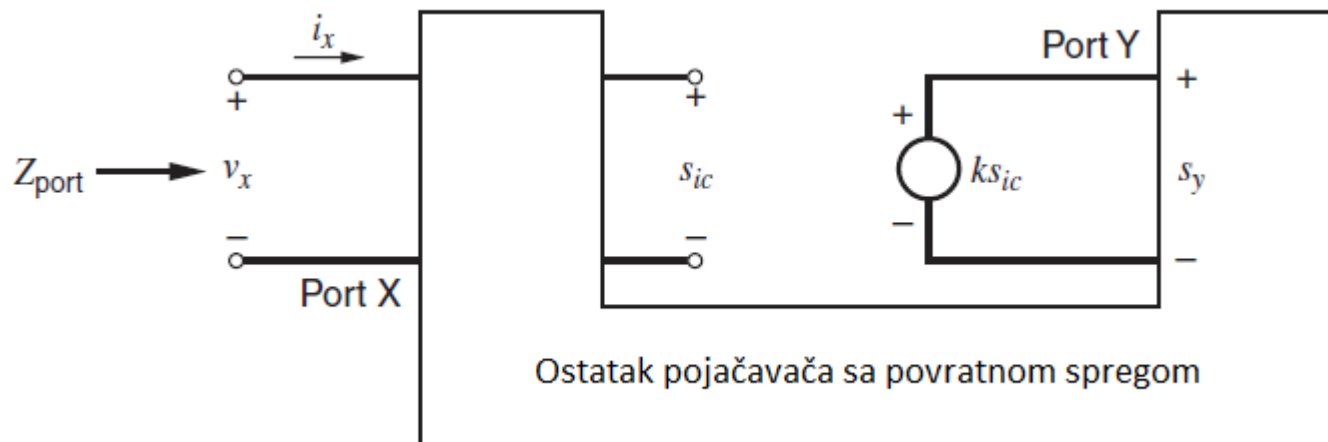
$$v_{OA} = V_{D2} - \frac{R_2}{R_1} V_{in} > 0$$



Punotalasni usmerač sa dve diode

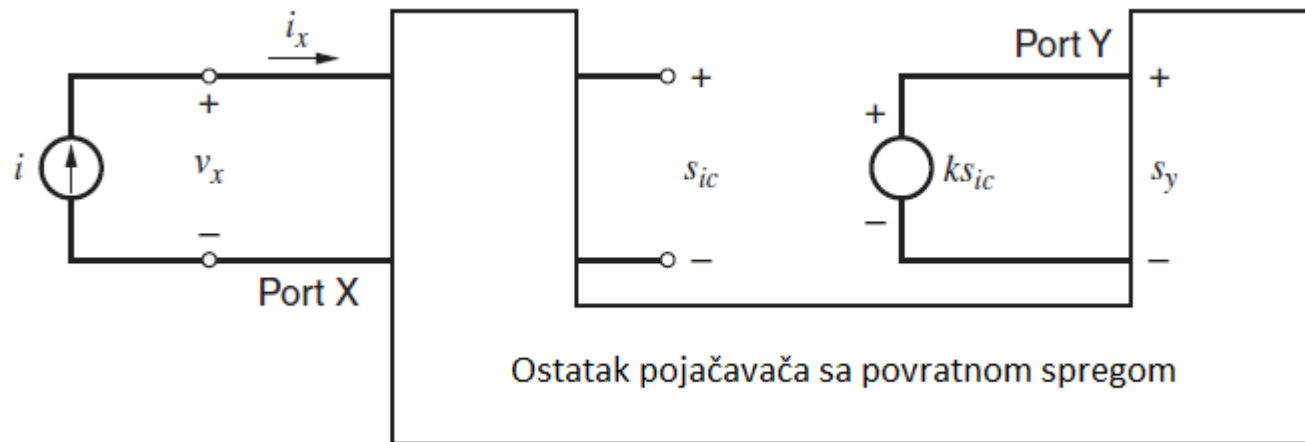


Blackman-ova formula za impedansu Između bilo koje dve tačke u kolu



$$Z_{port} = \frac{v_x}{i_x}$$

Blackman-ova formula za impedansu Između bilo koje dve tačke u kolu



Naponi u kolu odgovaraju superpoziciji napona i struja generatora:

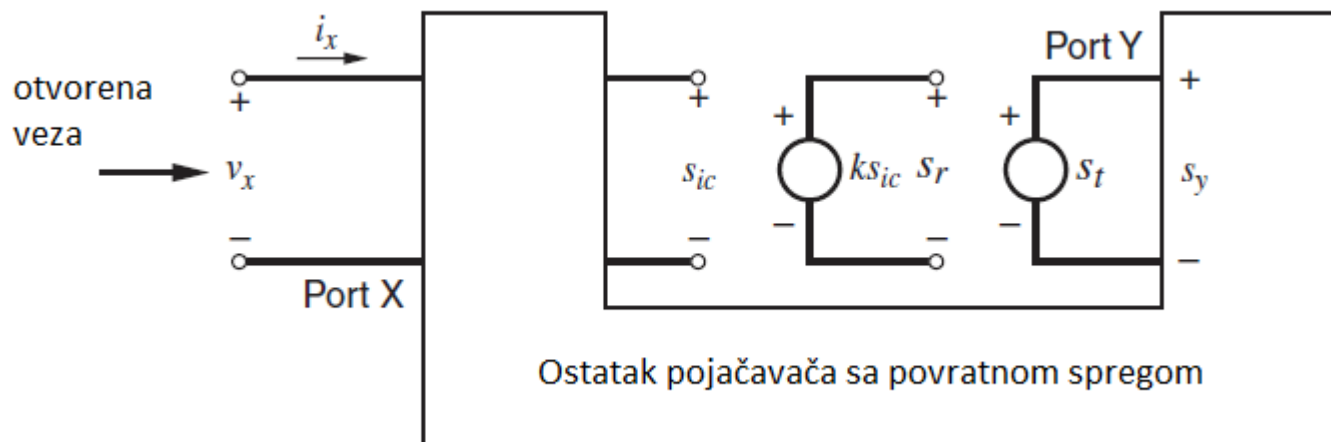
$$v_x = a_1 i_x + a_2 s_y$$

$$s_{ic} = a_3 i_x + a_4 s_y$$

$$s_y = k s_{ic}$$

$$Z_{\text{port}} = \frac{v_x}{i_x} = a_1 \left(\frac{1 - k \left(a_4 - \frac{a_2 a_3}{a_1} \right)}{1 - k a_4} \right)$$

Blackman-ova formula za impedansu između bilo koje dve tačke u kolu



Otvorena veza na portu X, presečena povratna sprega na krajevima izvora ks_{ic} i dodat test izvor s_t . Impedansa koju vidi s_t ne utiče na napon s_r , pa nije ni prikazana.

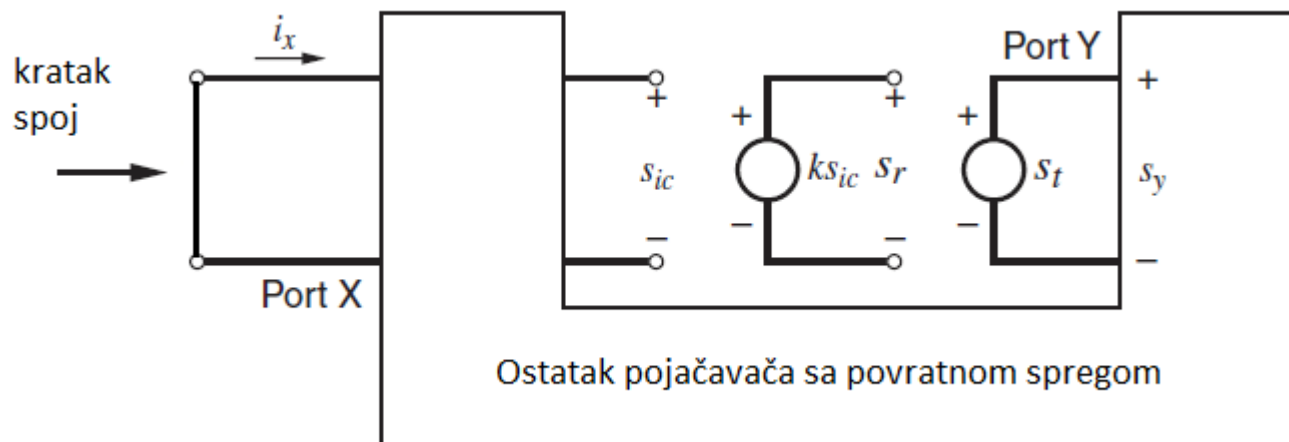
$$s_y = s_t$$

$$s_{ic} = a_4 s_t$$

$$s_r = ks_{ic}$$

$$\mathcal{R}(\text{otvorena veza}) = \frac{s_r}{s_t} = ka_4$$

Blackman-ova formula za impedansu između bilo koje dve tačke u kolu



Kratak spoj na portu X, presečena povratna sprega na krajevima izvora ks_{ic} i dodat test izvor s_t . Impedansa koju vidi s_t ne utiče na napon s_r , pa nije ni prikazana.

$$s_y = s_t$$

$$0 = a_1 i_x + a_2 s_y$$

$$i_x = -\frac{a_2}{a_1} s_t$$

$$s_{ic} = a_3 i_x + a_4 s_y$$

$$s_{ic} = \left(a_4 - \frac{a_2 a_3}{a_1} \right) s_t$$

$$s_r = k s_{ic}$$

$$\mathcal{R}(\text{kratak spoj}) = \frac{s_r}{s_t} = k \left(a_4 - \frac{a_2 a_3}{a_1} \right)$$

Blackman-ova formula za impedansu između bilo koje dve tačke u kolu

Ulazna impedansa za anulirano pojačanje i povratnu spregu je:

$$k = 0$$

$$s_y = ks_{ic} = 0$$

$$v_x = a_1 i_x$$

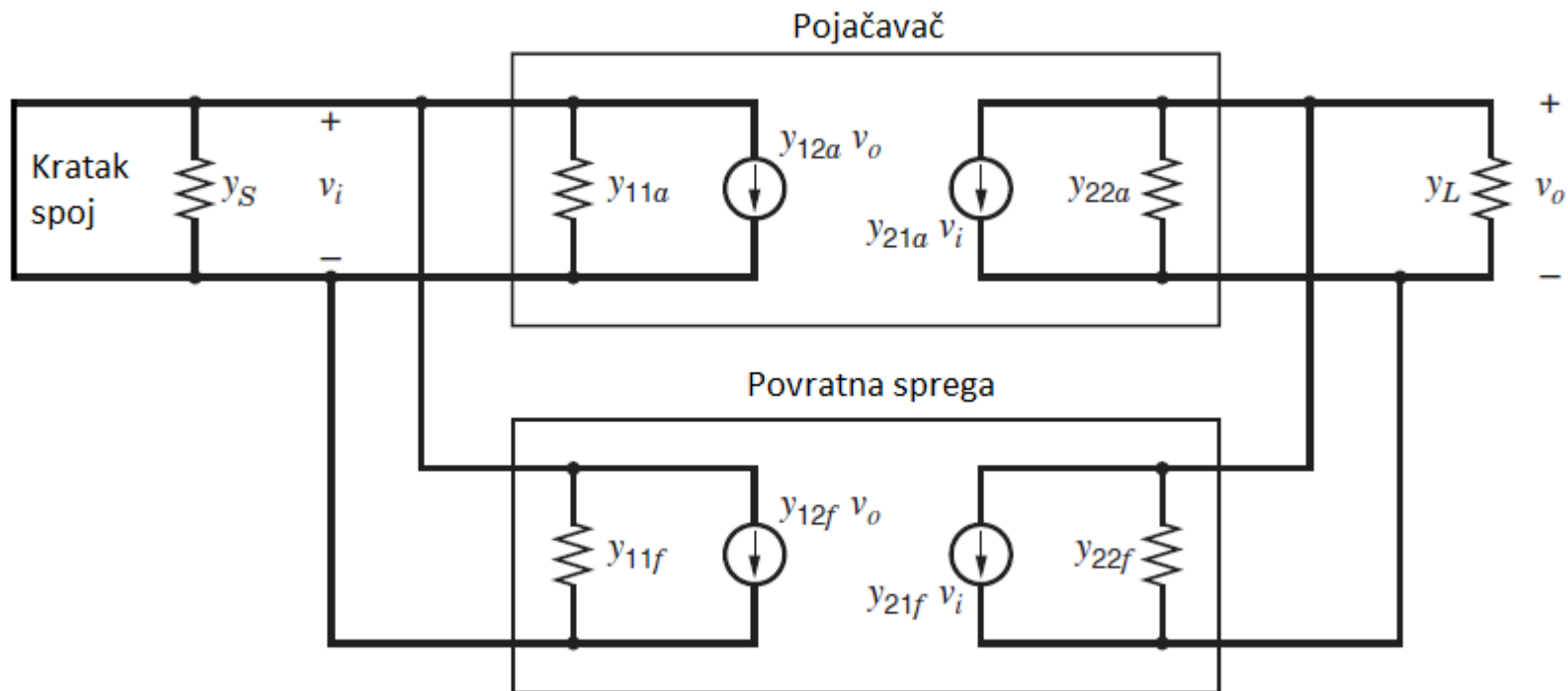
$$Z_{\text{port}}(k = 0) = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{k=0} = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{s_y=0} = a_1$$

Konačna Blackman-ova formula na osnovu svih prethodnih izvedenih formula je:

$$Z_{\text{port}} = Z_{\text{port}}(k = 0) \left[\frac{1 - \mathcal{R}(\text{kratak spoj})}{1 - \mathcal{R}(\text{otvorena veza})} \right]$$

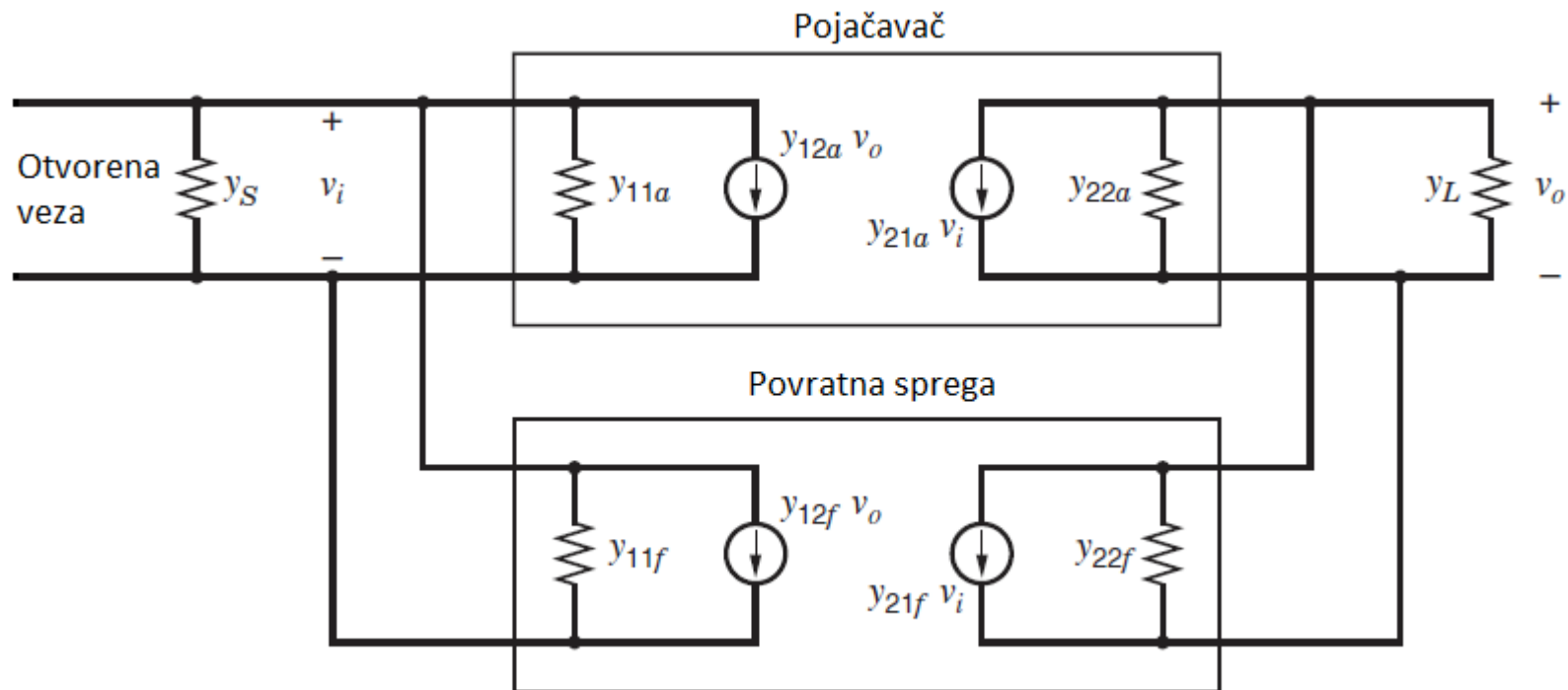
$$Z_{\text{port}} = Z_{\text{port}}(k = 0) \frac{1 - \beta A_{\text{KS}}}{1 - \beta A_{\text{OV}}}$$

Blackman-ova formula za ulaznu Z_i impedansu paralelno-naponske NPS



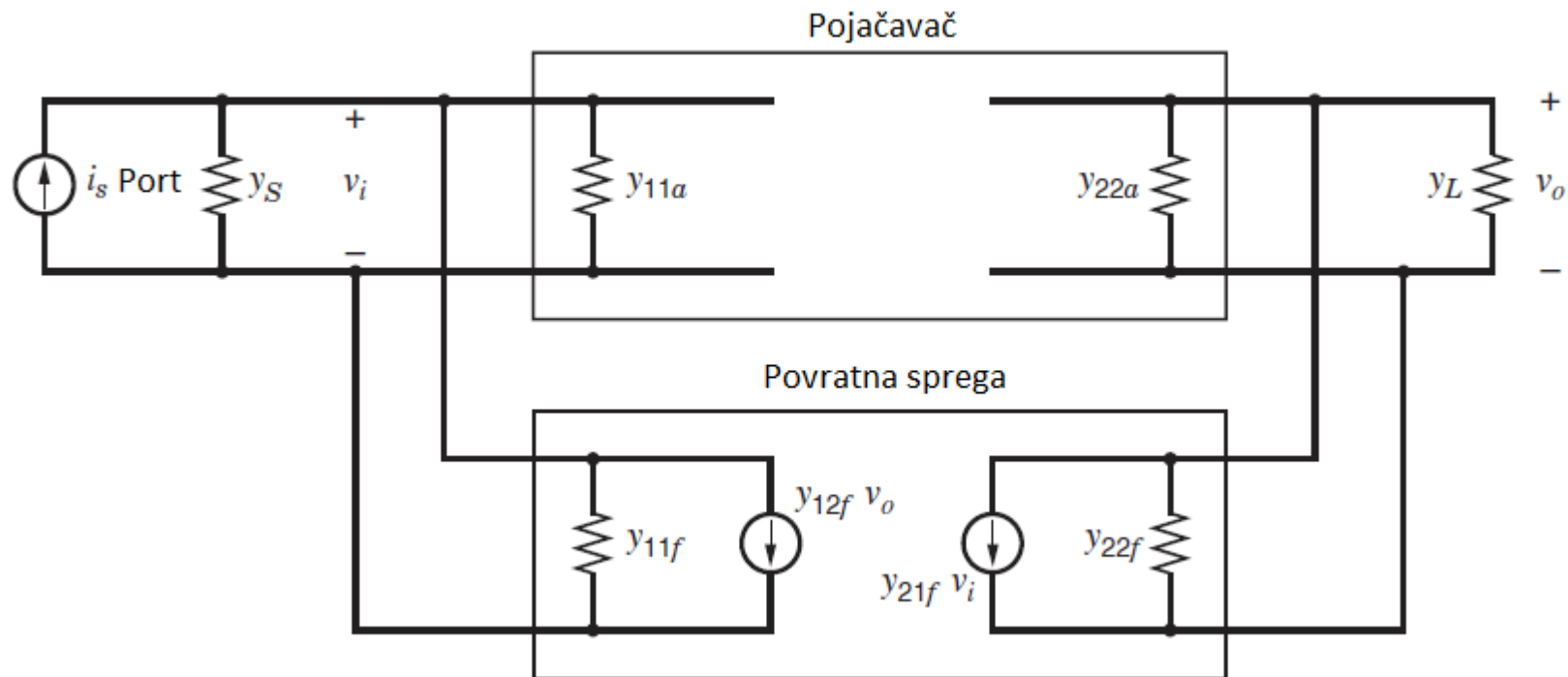
$$\beta A_{KS} = 0$$

Blackman-ova formula za ulaznu Z_i impedansu paralelno-naponske NPS



$$\beta A_{OV} = \beta A$$

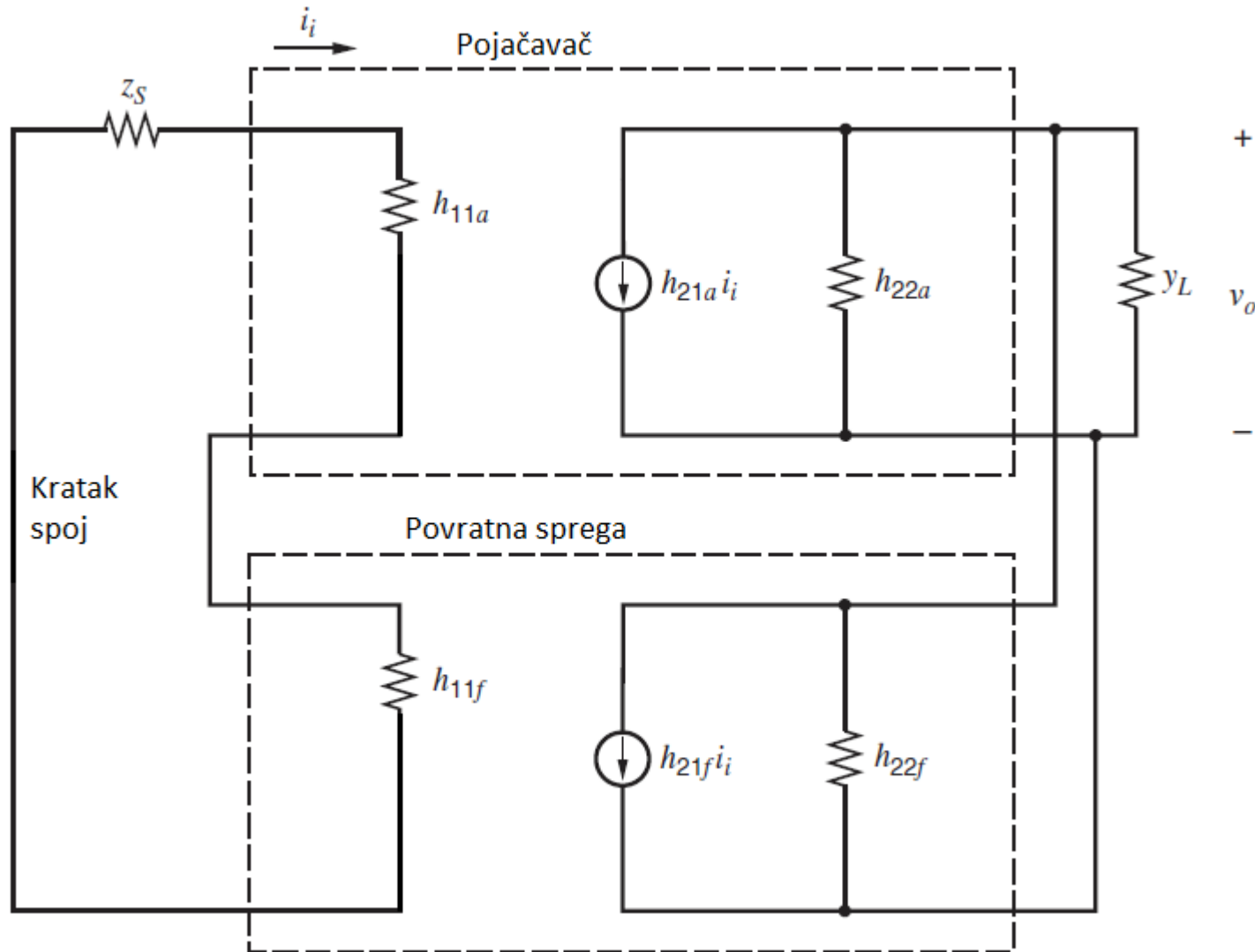
Blackman-ova formula za ulaznu Z_i impedansu paralelno-naponske NPS



$$Z_{\text{port}}(k = 0) = \frac{v_i}{i_s}$$

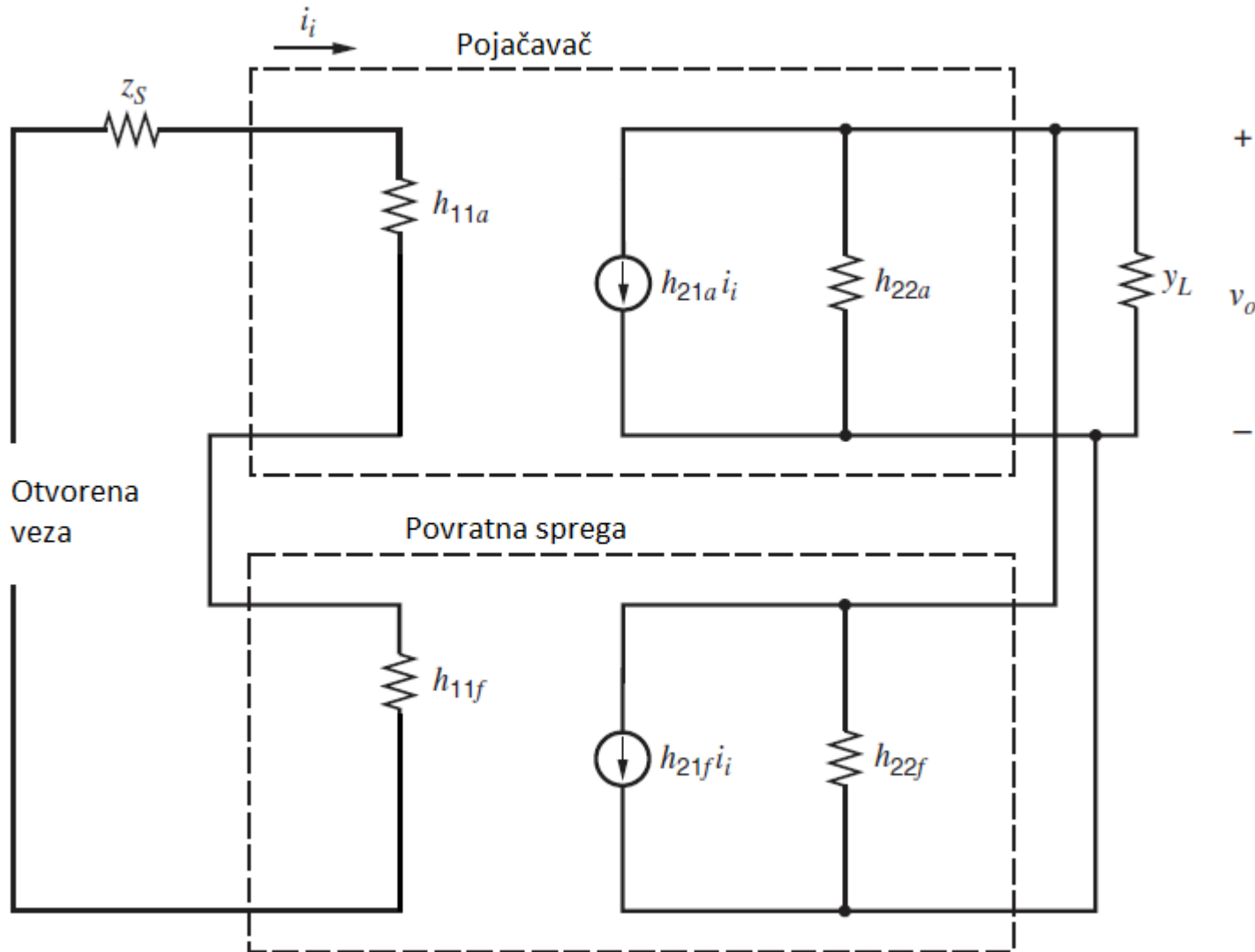
$$Z_{\text{port}} = Z_{\text{port}}(k = 0) \frac{1}{1 - \beta A}$$

Blackman-ova formula za ulaznu Z_i impedansu redno-naponske NPS



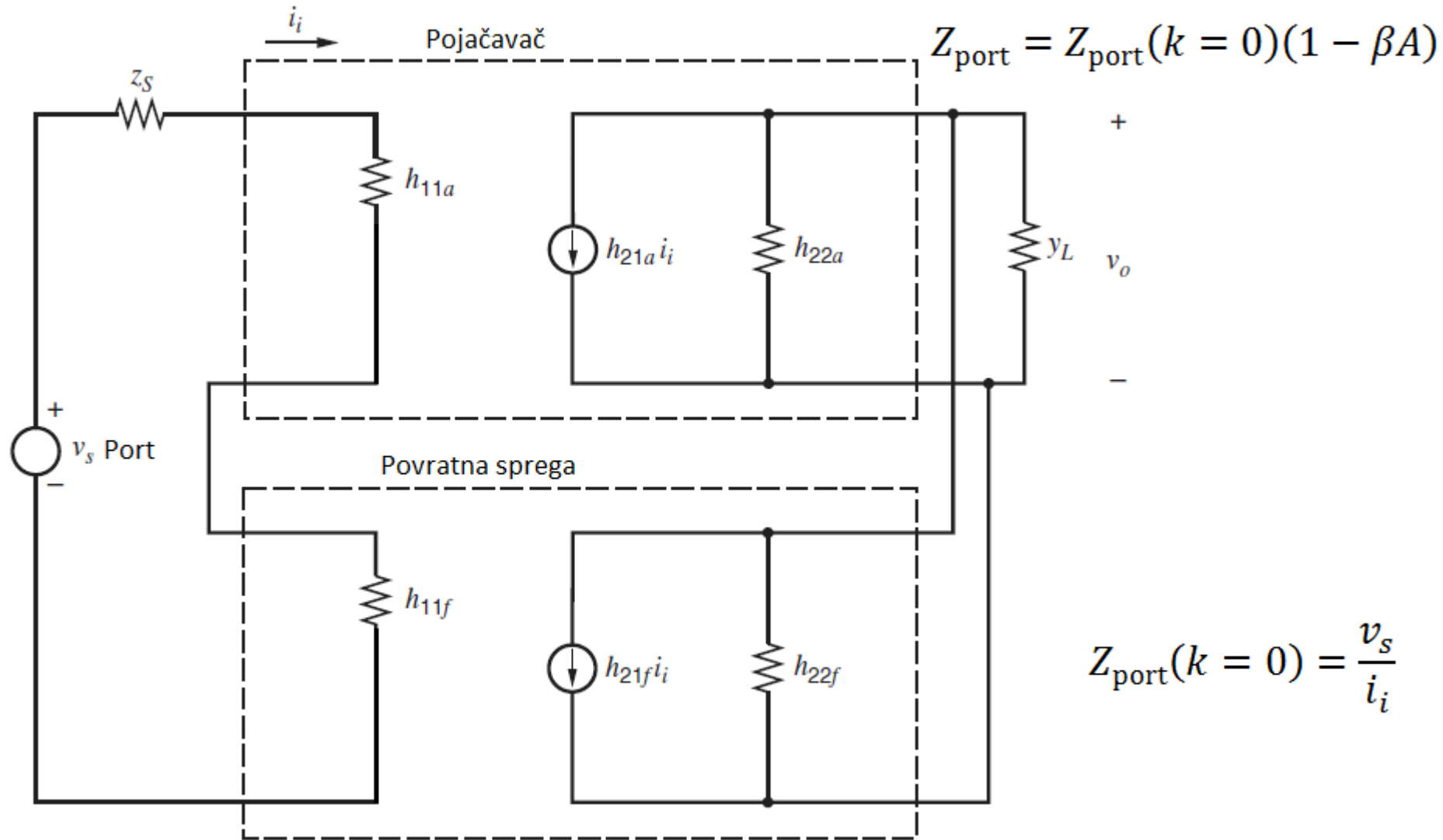
$$\beta A_{KS} = \beta A$$

Blackman-ova formula za ulaznu Z_i impedansu redno-naponske NPS

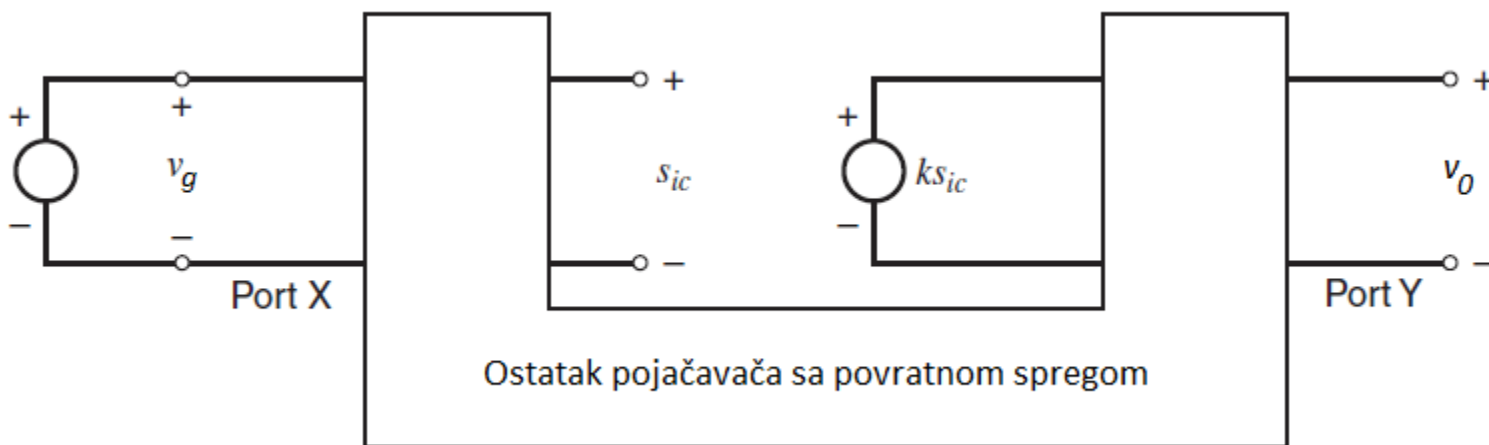


$$\beta A_{OV} = 0$$

Blackman-ova formula za ulaznu Z_i impedansu redno-naponske NPS



Asimptotska formula za pojačanje sa reakcijom



Naponi u kolu odgovaraju superpoziciji napona u kolu:

$$v_o = a_1 v_g + a_2 k s_{ic}$$

$$s_{ic} = a_3 v_g + a_4 k s_{ic}$$

$$s_{ic} = \frac{a_3 v_g}{1 - a_4 k}$$

$$v_o = a_1 v_g + \frac{a_2 a_3 k v_g}{1 - a_4 k}$$

Asimptotska formula za pojačanje sa reakcijom

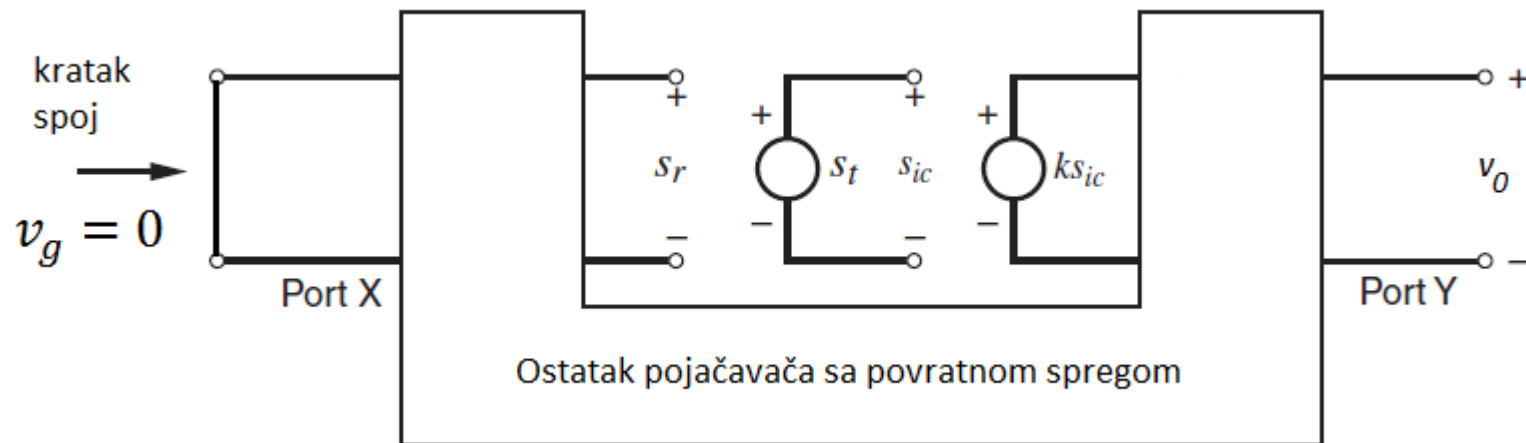
Pojačanje sa reakcijom se definiše kao:

$$A_r = \frac{v_o}{v_g} = a_1 + \frac{a_2 a_3 k}{1 - a_4 k}$$

$$A_r = \frac{a_1 - a_1 a_4 k + a_2 a_3 k}{1 - a_4 k}$$

$$A_r = \frac{(-a_4 k) \left(a_1 - \frac{a_2 a_3}{a_4} \right) + a_1}{1 - a_4 k}$$

Asimptotska formula za pojačanje sa reakcijom



Za izračunavanje kružnog pojačanja βA se anulira pobudni generator (kratak spoj na ulazu), preseca povratna sprega na krajevima s_{ic} i dodaje test izvor s_t . Beskonačna impedansa koju vidi s_t ne utiče na napon s_r .

Opšta formula $s_{ic} = a_3 v_g + a_4 k s_{ic}$ postaje: $s_r = a_4 k s_t$

$$\beta A = \frac{s_r}{s_t} = a_4 k$$

Asimptotska formula za pojačanje sa reakcijom

Tumačenje ostalih faktora u asimptotskoj formuli je:

$$A_r(\beta A \rightarrow \infty) = A_r(a_4 k \rightarrow \infty) = a_1 - \frac{a_2 a_3}{a_4}$$

$$A_r(\beta A = 0) = A_r(a_4 k = 0) = a_1$$

Konačna asimptotska formula na osnovu svih prethodnih izvedenih formula se sastoji od prvog člana koji predstavlja prenos signala kroz pojačavač i drugog člana koji predstavlja prenos signala kroz povratnu spregu:

$$A_r = \frac{(-\beta A)A_r(\beta A \rightarrow \infty) + A_r(\beta A = 0)}{1 - \beta A}$$

$$A_r = A_r(\beta A \rightarrow \infty) \frac{-\beta A}{1 - \beta A} + A_r(\beta A = 0) \frac{1}{1 - \beta A}$$

Osnove elektronike

III semestar

NEGATIVNA POVRATNA SPREGA