

Osnovi analogne elektronike

IV 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 .

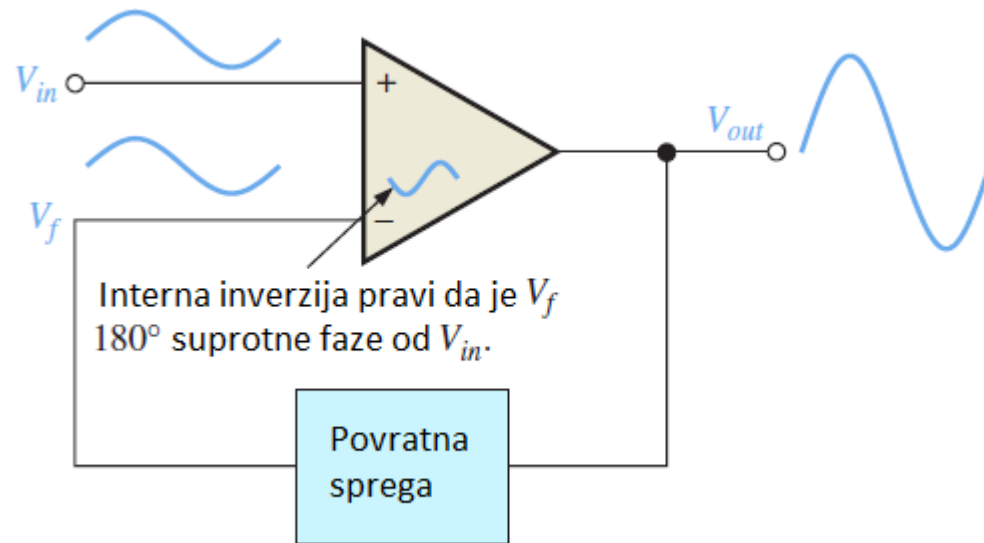
Povratna sprega može biti:

- ❖ 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:

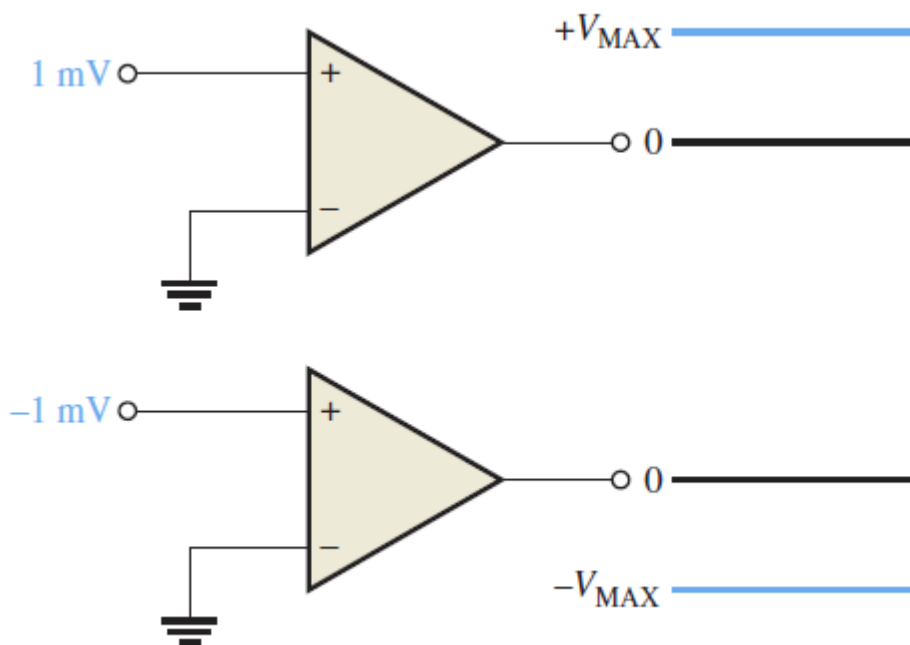
- ❖ paralelno-naponska (vraćena veličina u β kolo je napon)
- ❖ redno-naponska (vraćena veličina u β kolo je napon)
- ❖ paralelno-strujna (vraćena veličina u β kolo je struja)
- ❖ redno-strujna (vraćena veličina u β kolo je struja)

Princip negativne povratne sprege

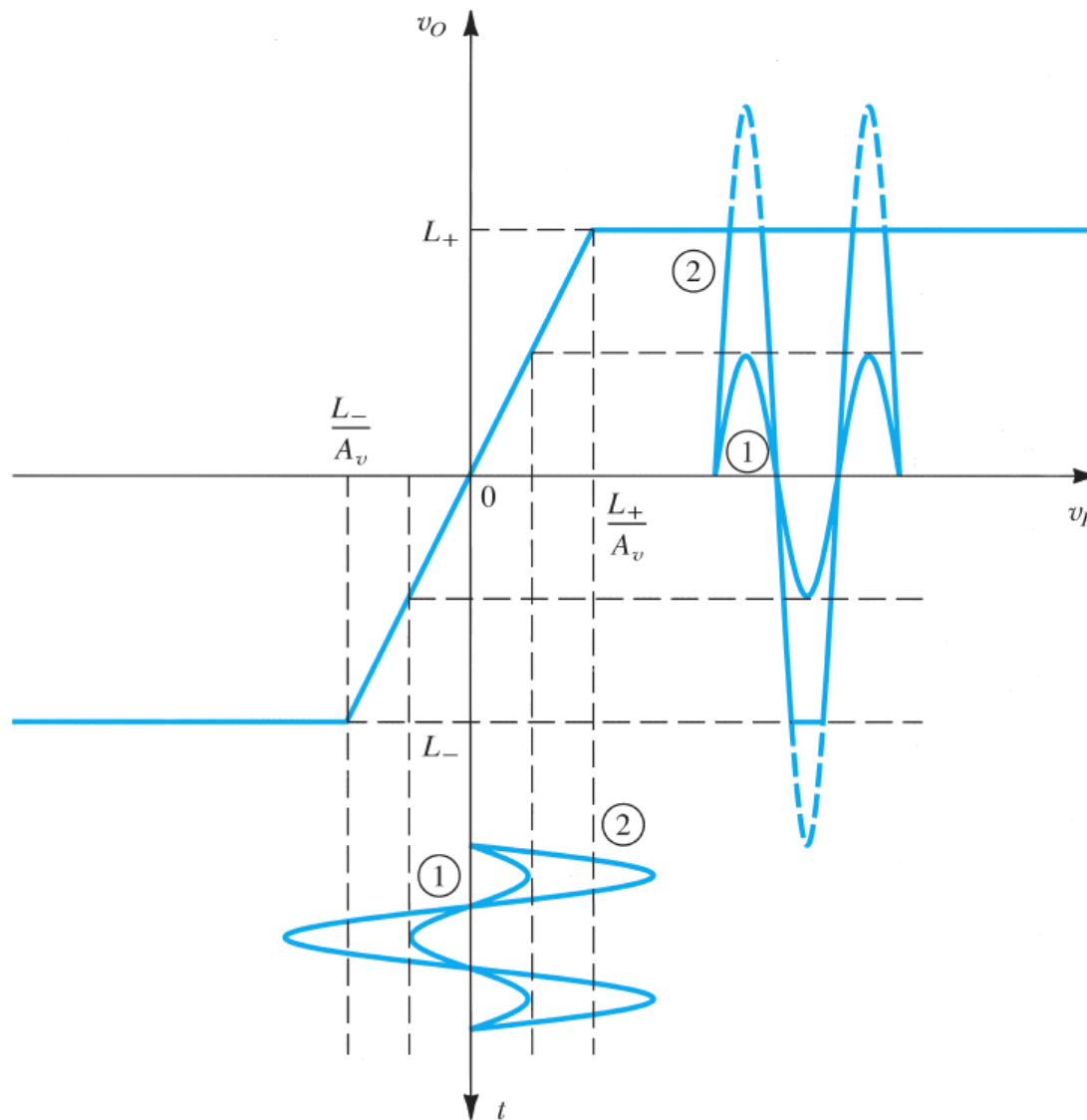


Svrha negativne povratne sprege

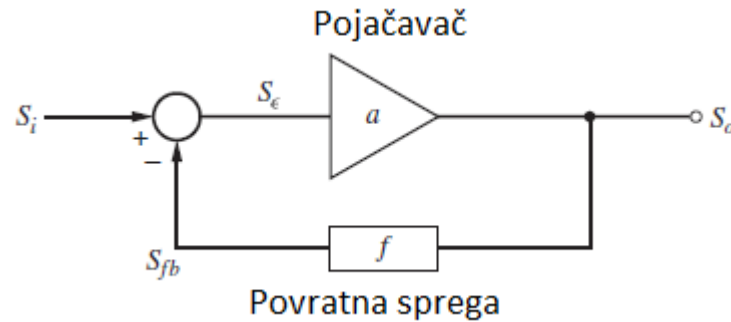
Bez negativne povratne sprege, mali ulazni napon bi odveo izlaz operacionog pojačavača u pozitivno ili negativno zasićenje, u zavisnosti od polariteta ulaznog napona.



Izbegavanje rada u zasićenju smanjenjem pojačanja



Opšta negativna povratna sprega



$$S_o = aS_\epsilon$$

$$S_{fb} = fS_o$$

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

$$S_\epsilon = S_i - fS_o$$

$$S_o = aS_i - afS_o$$

$$T = af$$

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

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

$$T \gg 1$$

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

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

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

$$T \gg 1$$

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

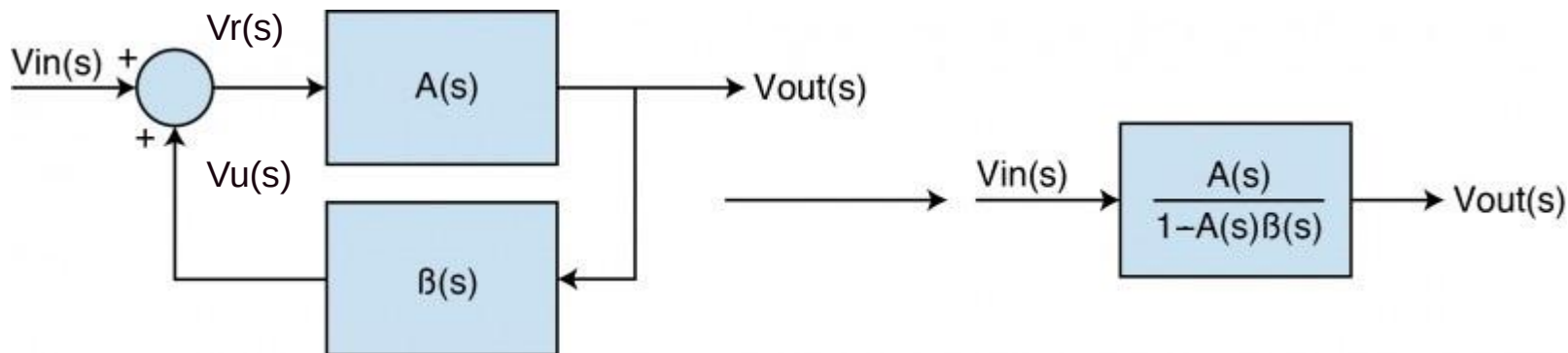
$$S_{fb} = fS_i \frac{a}{1 + af}$$

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

$$T \gg 1$$

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

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 Kirhofovим 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:

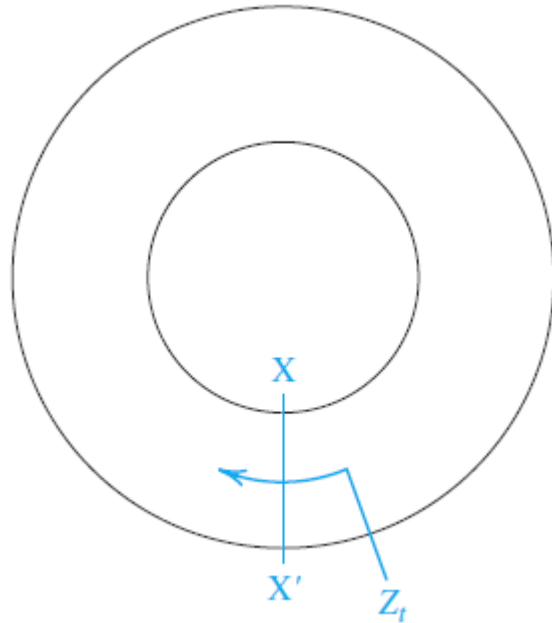
- ❖ izračunavanjem kružnog pojačanja βA
- ❖ izračunavanjem izlazne impedanse “bez reakcije”
- ❖ zamenom izračunatih veličina u formulu za izlaznu impedansu

Izračunavanje kružnog pojačanja

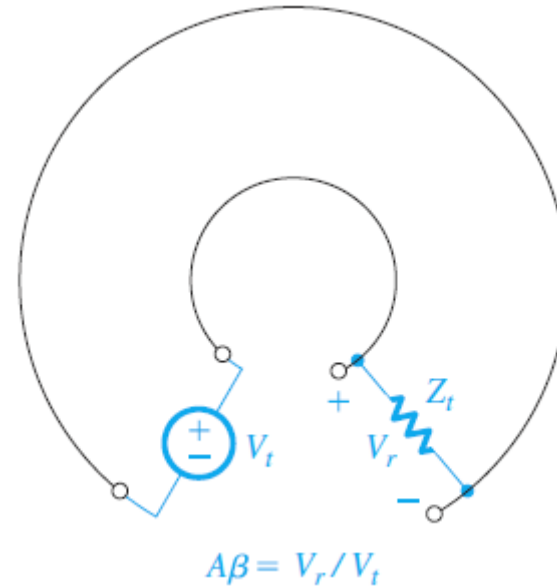
Izračunavanje kružnog pojačanja βA obuhvata:

- ❖ 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



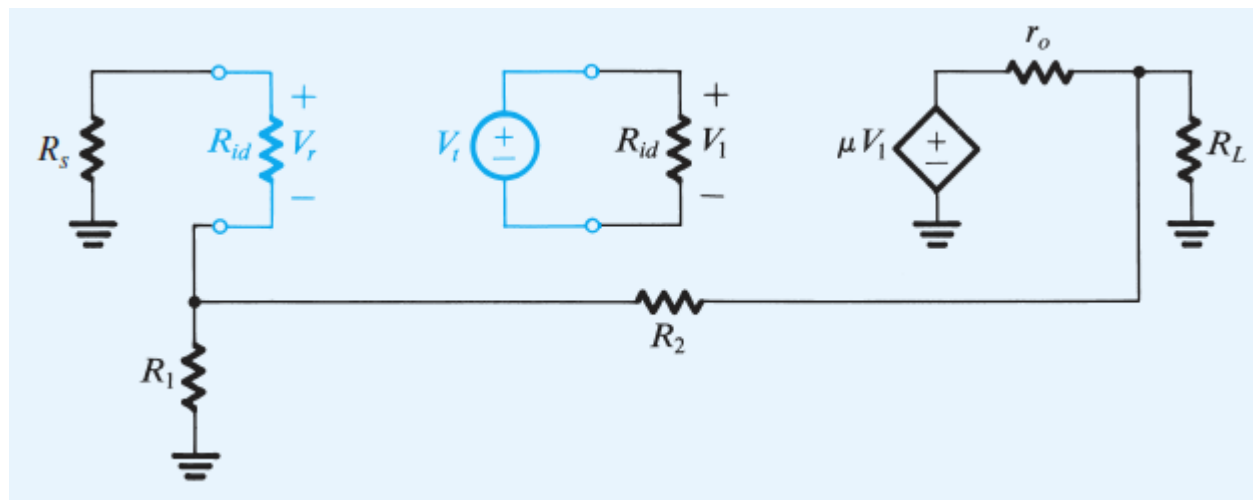
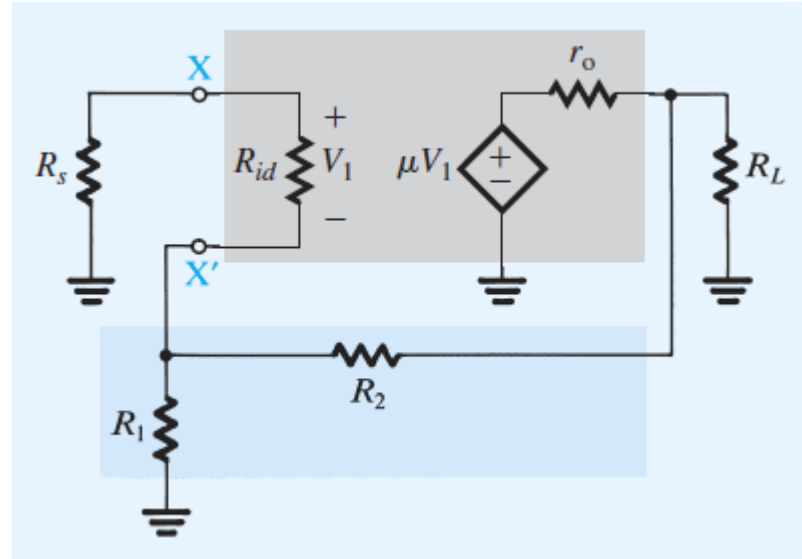
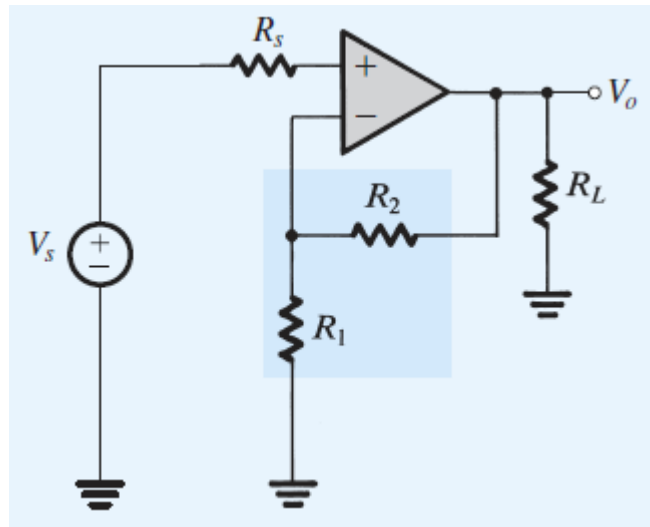
$$A\beta = \frac{V_r}{V_t}$$



Pogodna mesta za presecanje βA kruga su:

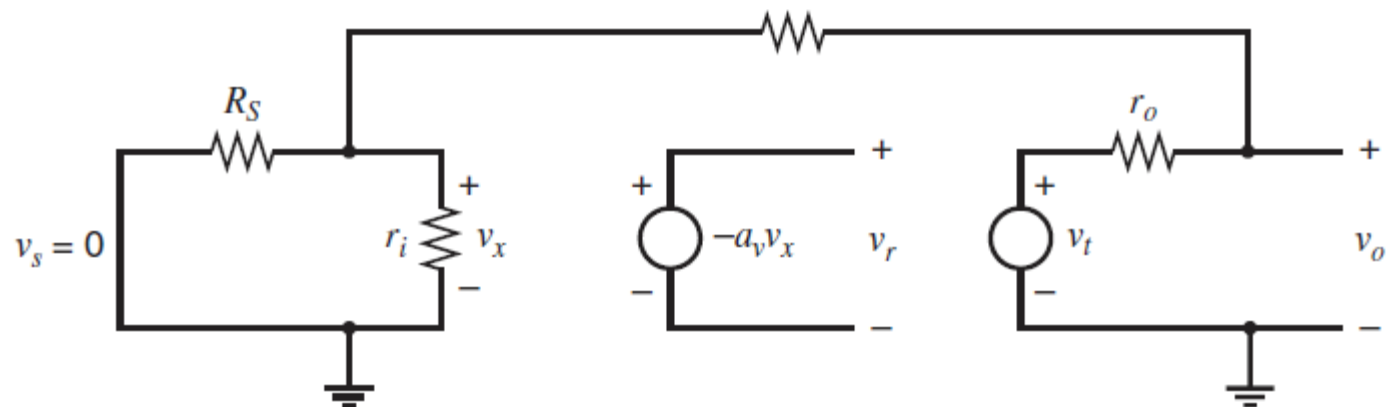
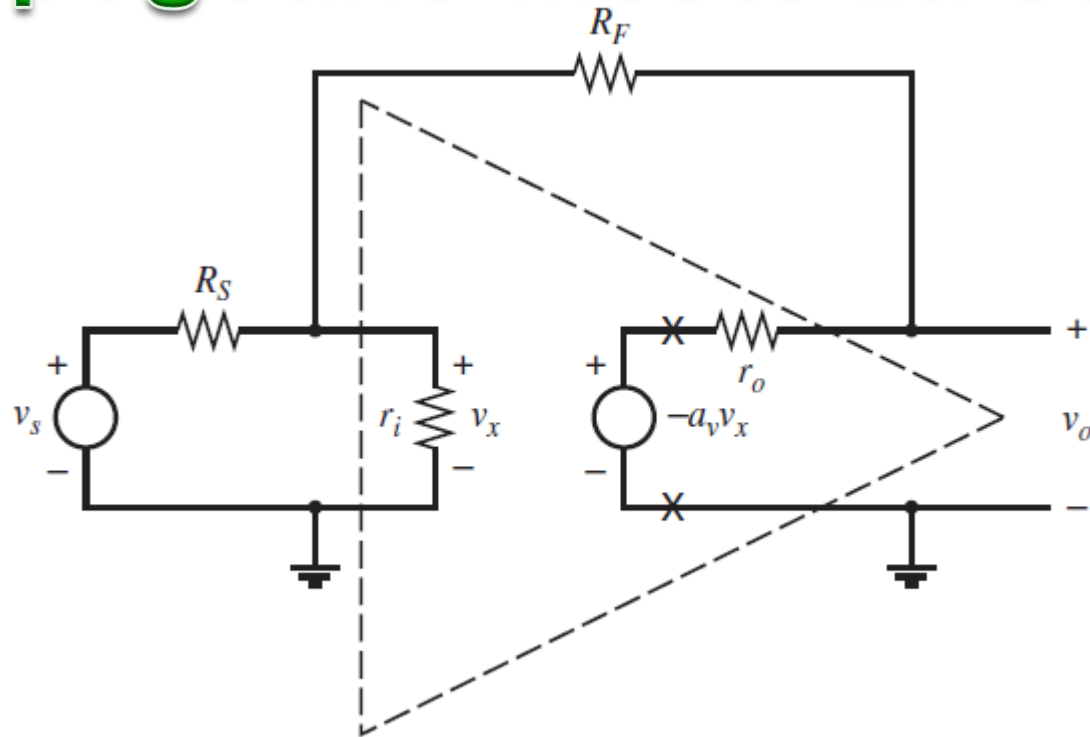
- ❖ ulaz pojačavača pre ulazne otpornosti $Z_t = R_u$
- ❖ ulaz pojačavača posle ulazne otpornosti $Z_t \rightarrow \infty$
- ❖ izlaz pojačavača posle kontrolisanog naponskog generatora jer je Z_t nebitan pošto je na krajevima naponskog generatora.

Izračunavanje kružnog pojačanja prvo pogodno mesto za sečenje

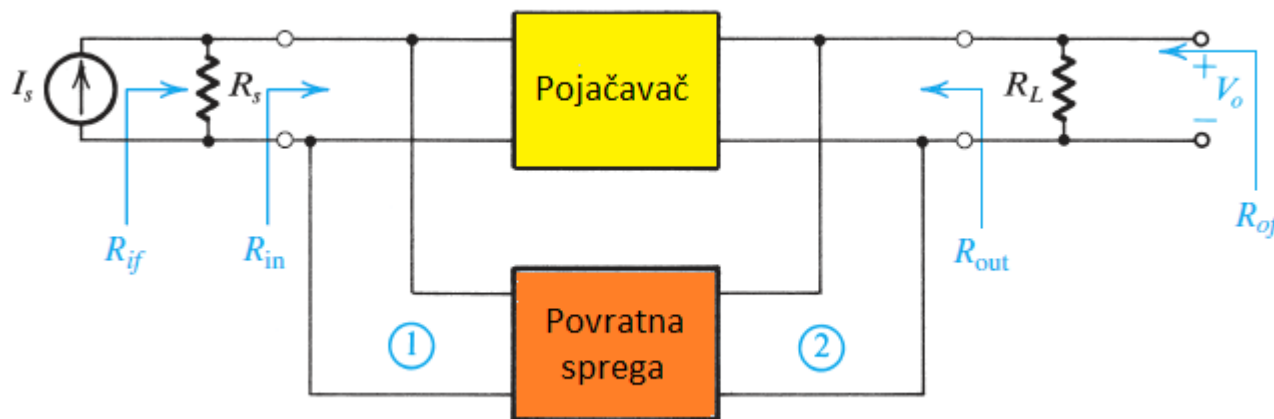


$$A\beta = \mu \frac{\{R_L \parallel [R_2 + R_1 \parallel (R_{id} + R_s)]\}}{\{R_L \parallel [R_2 + R_1 \parallel (R_{id} + R_s)]\} + r_o} \times \frac{[R_1 \parallel (R_{id} + R_s)]}{[R_1 \parallel (R_{id} + R_s)] + R_2} \times \frac{R_{id}}{R_{id} + R_s}$$

Izračunavanje kružnog pojačanja treće pogodno mesto za sečenje



Paralelno-naponska negativna povratna sprega

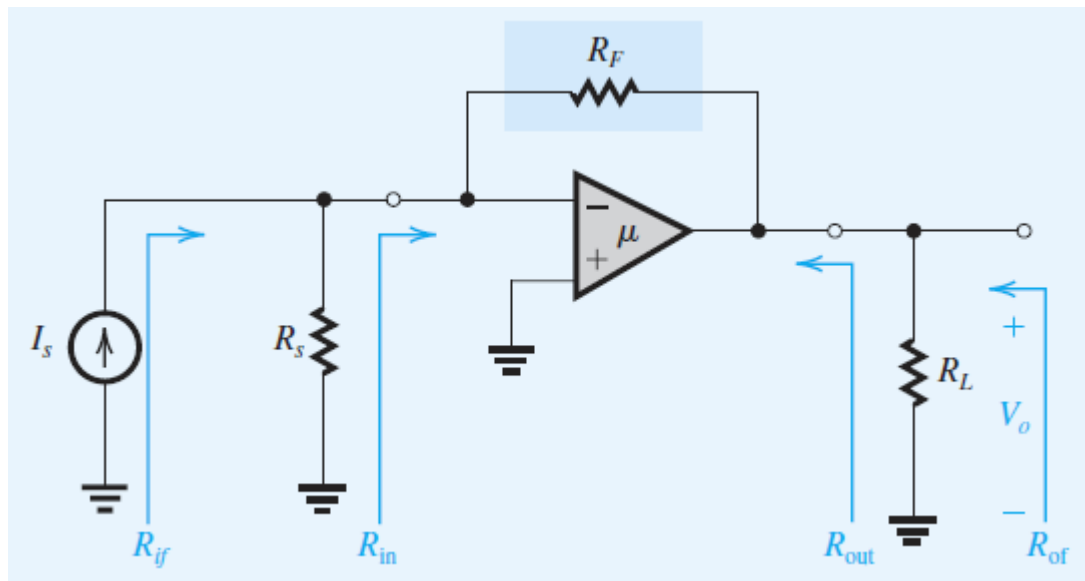


Paralelna sprega generatora, pojačavača i povratne sprege na ulazu (2 tačke koje pripadaju svakom elementu).

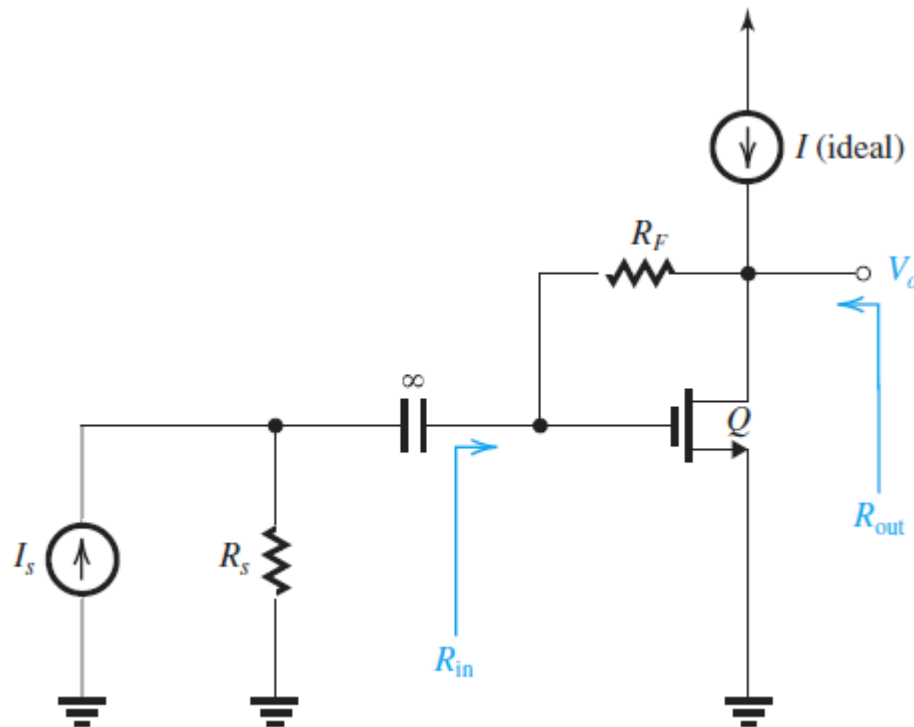
Naponska sprega potrošača, pojačavača i povratne sprege na izlazu (2 tačke koje pripadaju svakom elementu).

Vraćena veličina u kolo povratne sprege je napon.

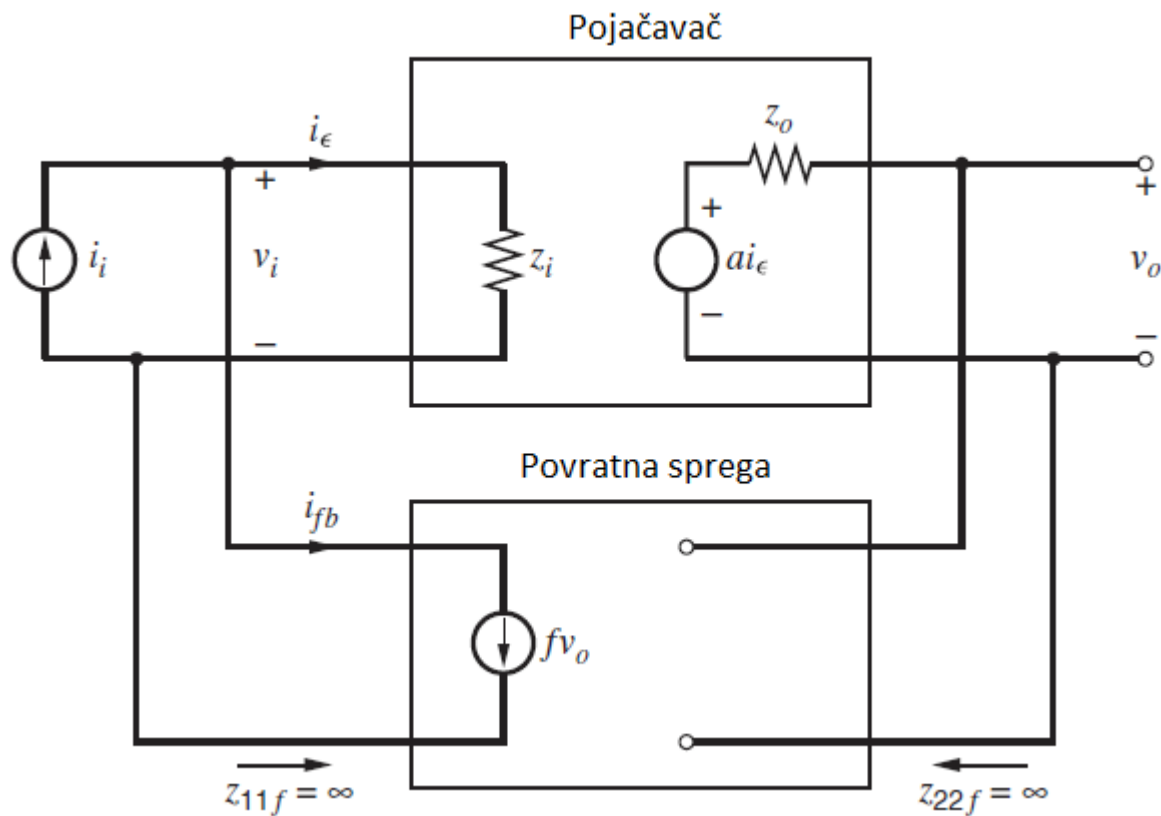
Paralelno-naponska negativna povratna sprega primer



Paralelno-naponska negativna povratna sprega primer



Pojačanje v_o/v_i paralelno-naponske NPS



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

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

$$v_o = a i_\epsilon$$

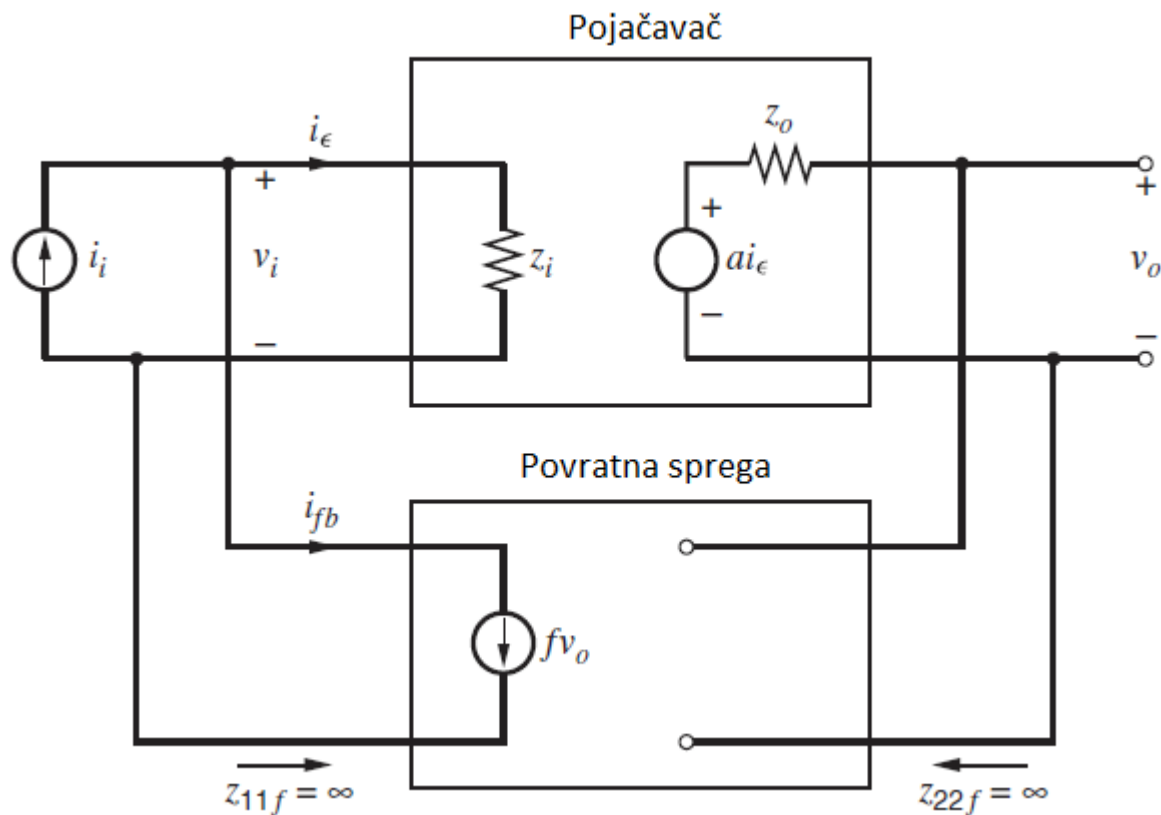
$$i_\epsilon = i_i - i_{fb}$$

$$i_\epsilon = i_i - f v_o$$

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

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

Ulazna Z_i i izlazna Z_o impedansa paralelno-naponske NPS



$$v_o = ai_\epsilon$$

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

$$i_\epsilon = \frac{i_i}{1 + af}$$

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

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

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

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

Ekvivalentni četvoropol za pojačavač i povratnu spregu



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

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

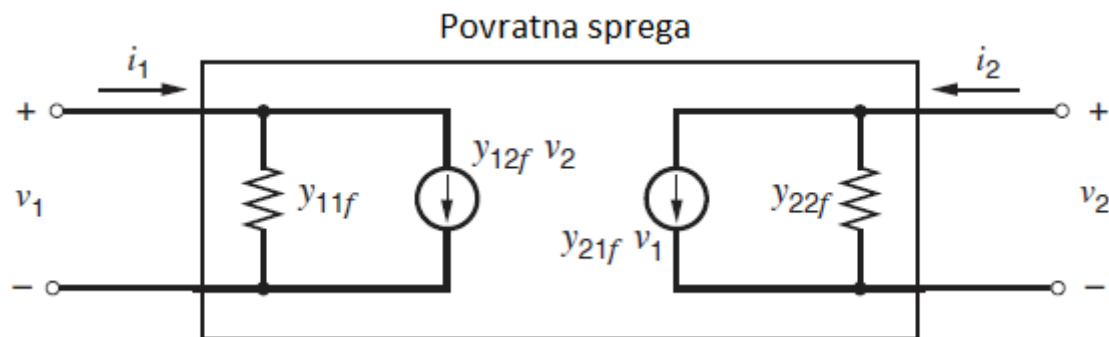
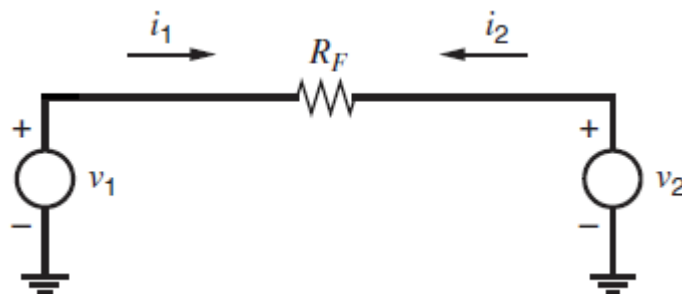
$$y_{11} = \left. \frac{i_1}{v_1} \right|_{v_2 = 0}$$

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

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

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

Ekvivalentni četvoropol za kolo povratne sprege



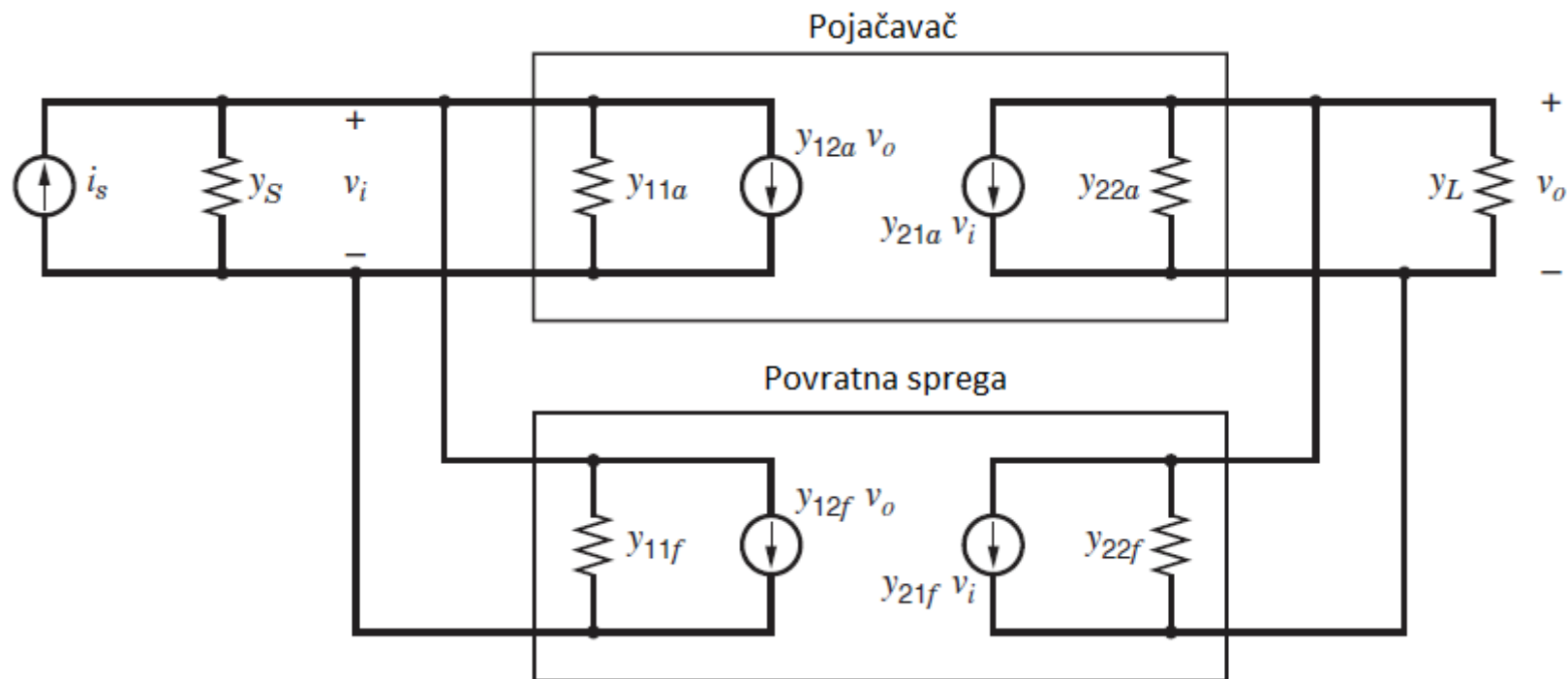
$$y_{11f} = \left. \frac{i_1}{v_1} \right|_{v_2=0} = \frac{1}{R_F}$$

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

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

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

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

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

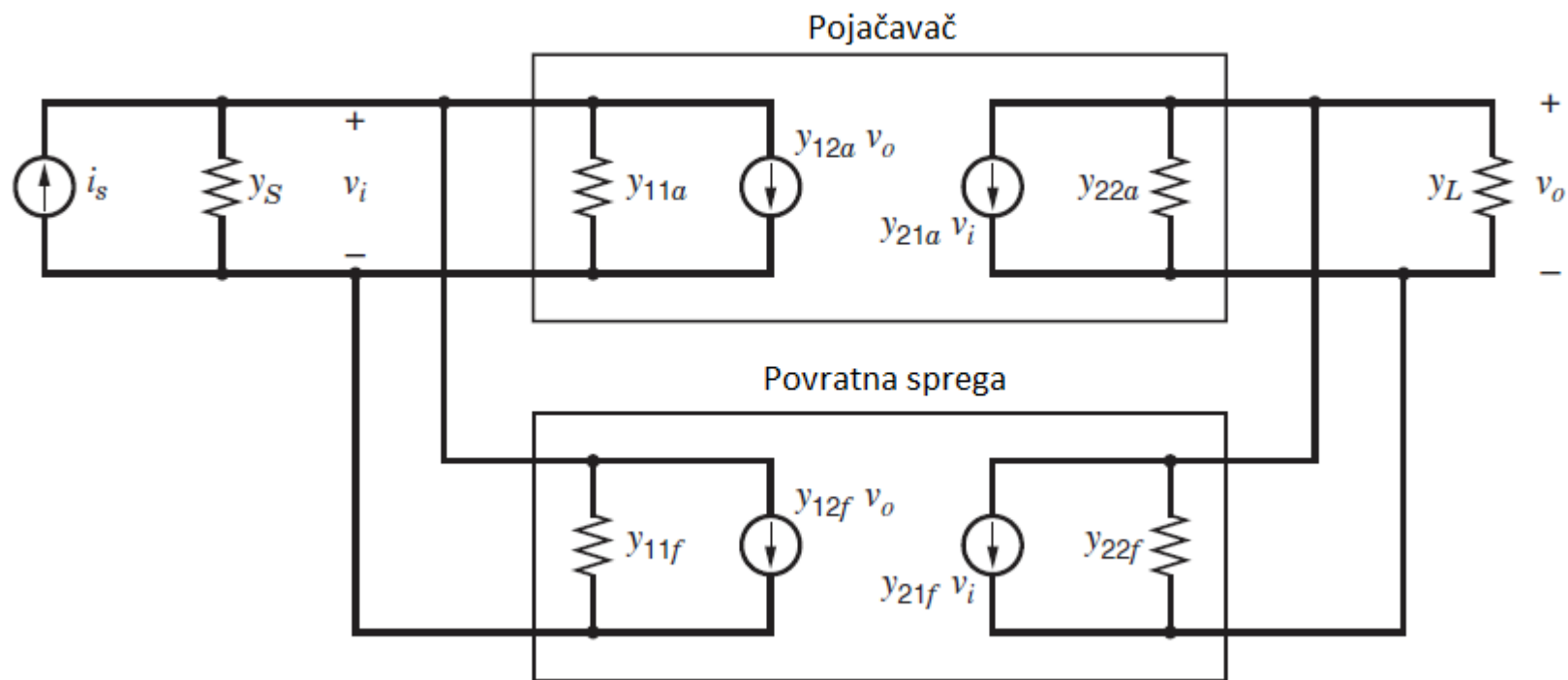
$$\frac{v_o}{i_s} = \frac{\frac{-(y_{21a} + y_{21f})}{y_i y_o}}{1 + \frac{-(y_{21a} + y_{21f})}{y_i y_o}(y_{12a} + y_{12f})}$$

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

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

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

Izračunavanje pojačanja paralelno-naponske NPS



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

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

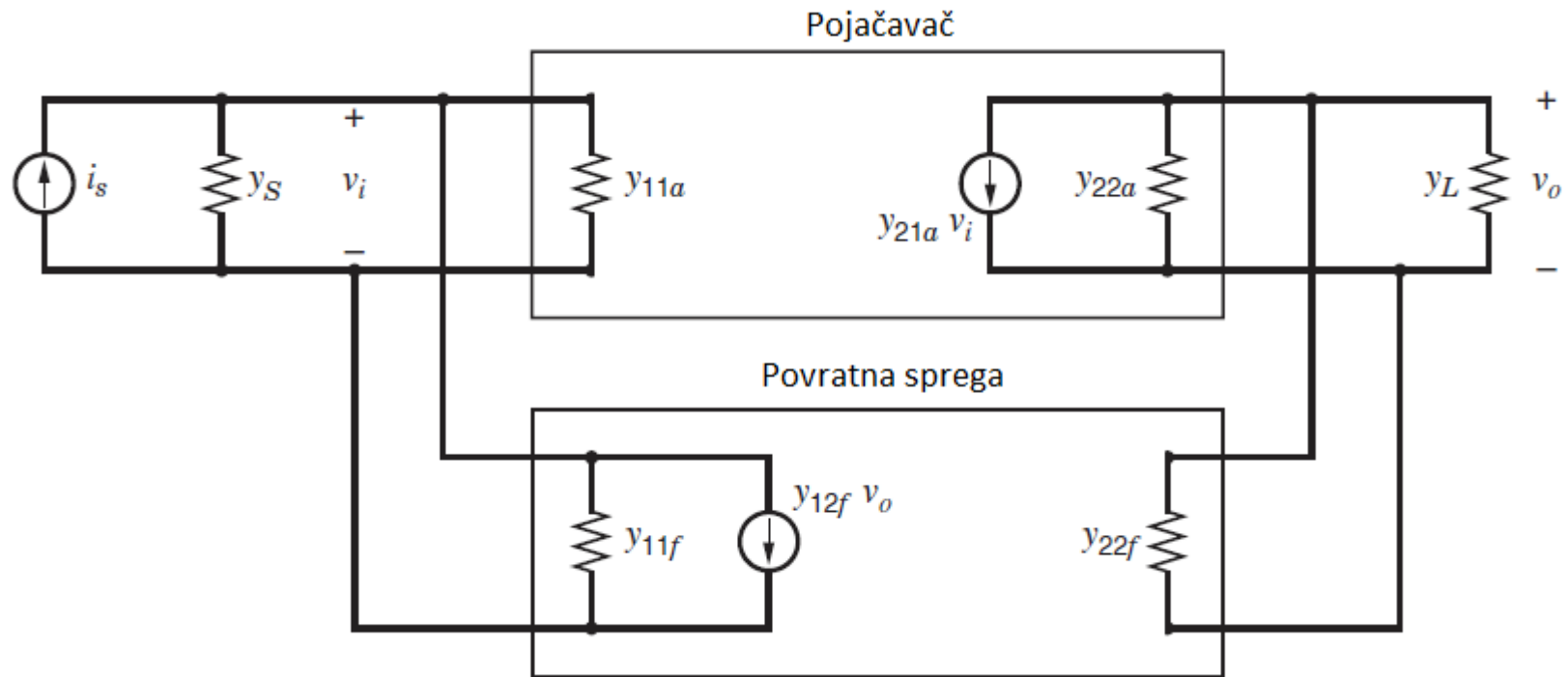
$$\frac{v_o}{i_s} = A \simeq \frac{\frac{-y_{21a}}{y_i y_o}}{1 + \left(\frac{-y_{21a}}{y_i y_o} \right) y_{12f}}$$

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

$$f = y_{12f}$$

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

Izračunavanje približnog pojačanja paralelno-naponske NPS



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

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

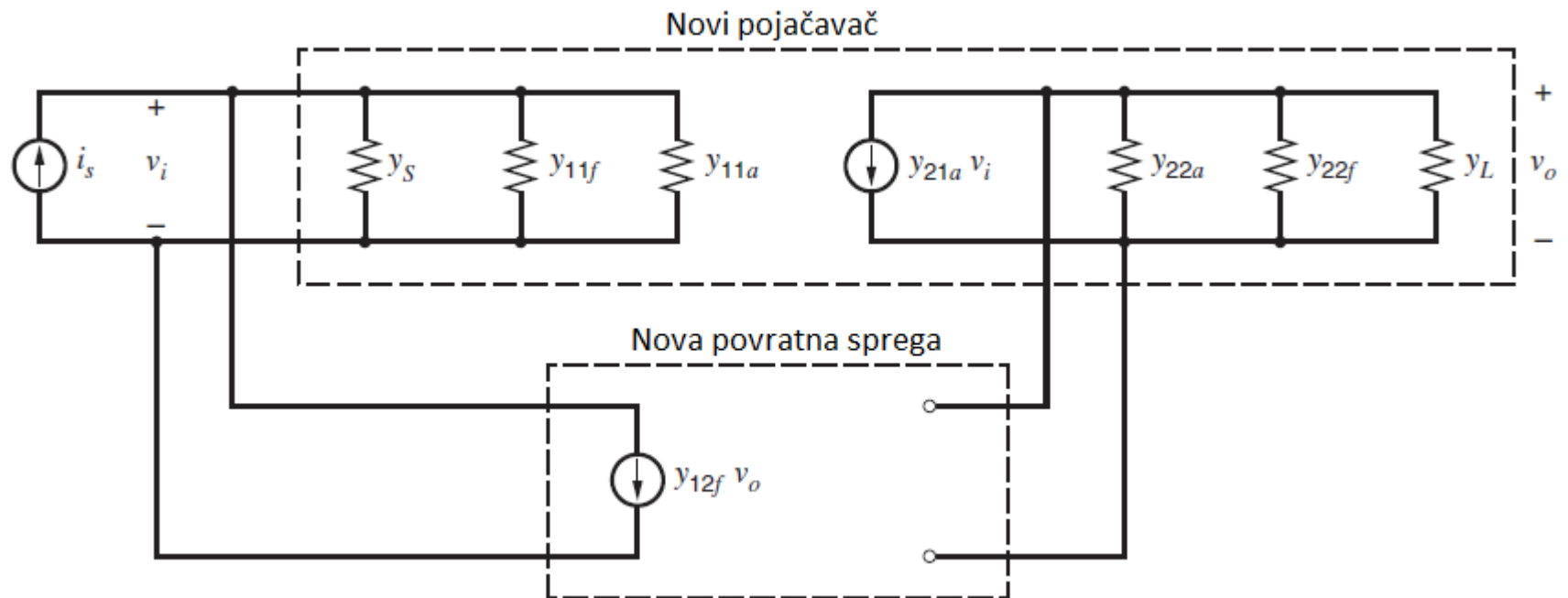
$$\frac{v_o}{i_s} = A \simeq \frac{\frac{-y_{21a}}{y_i y_o}}{1 + \left(\frac{-y_{21a}}{y_i y_o} \right) y_{12f}}$$

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

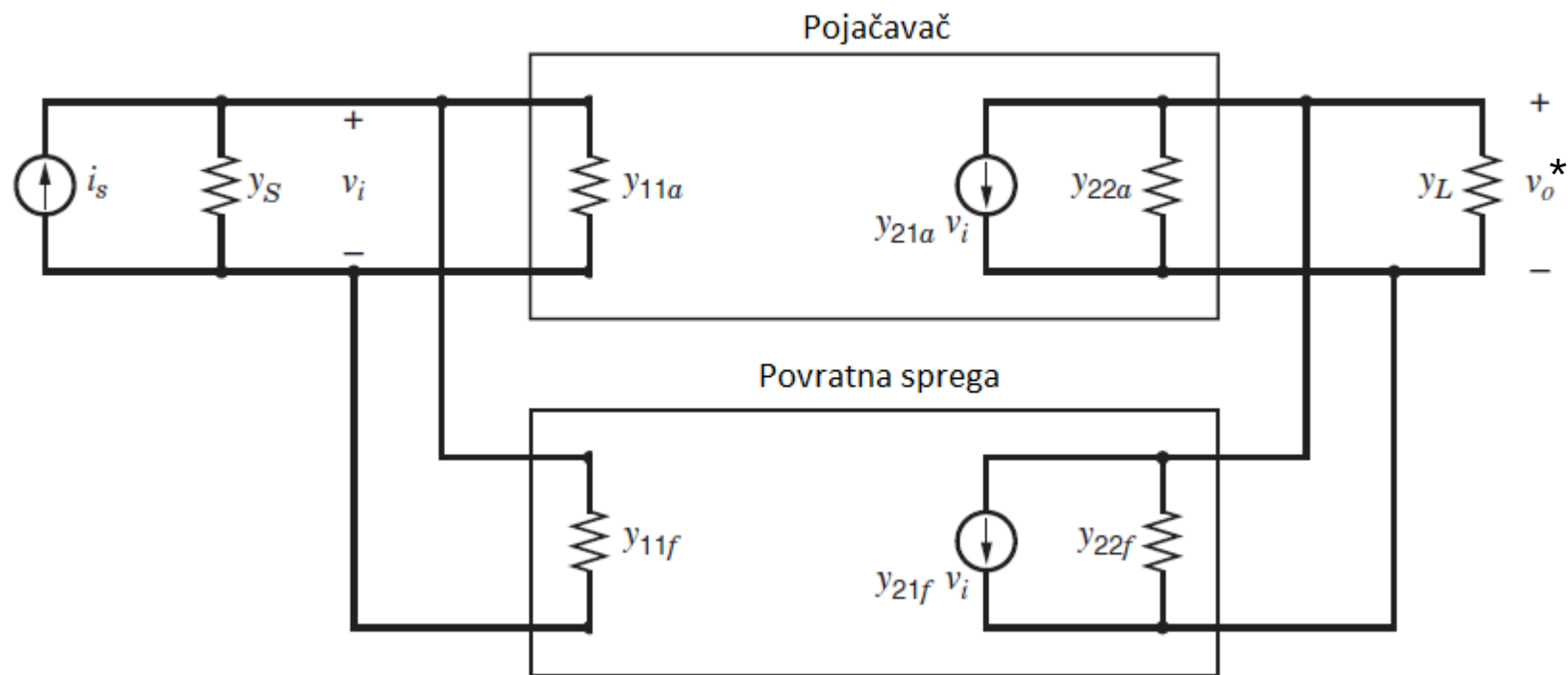
$$f = y_{12f}$$

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

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 $\beta A = -af$.

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

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

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

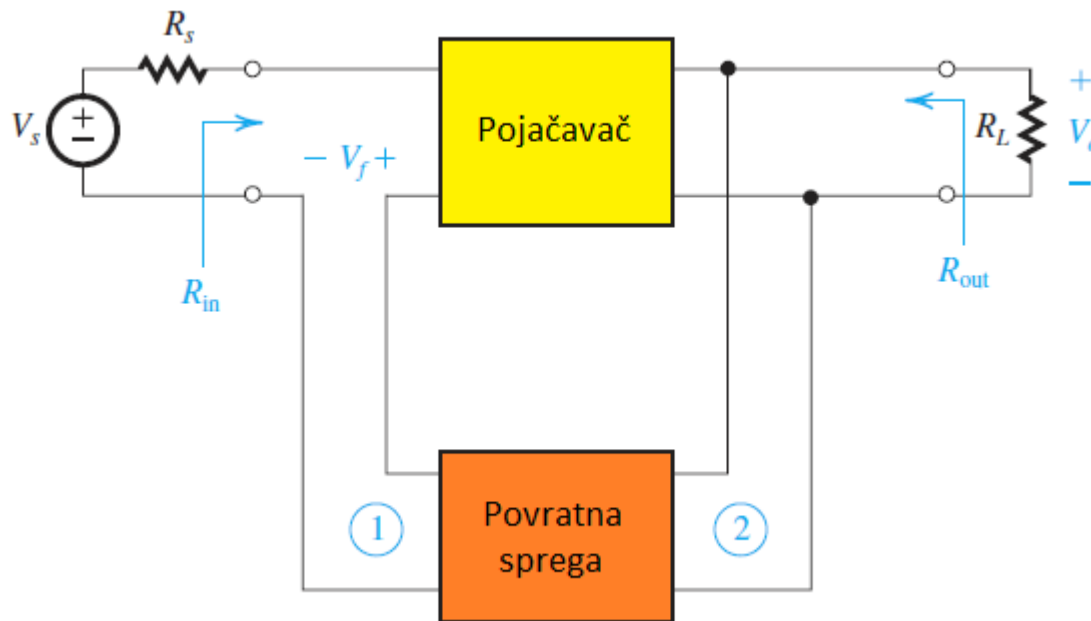
$$y_o = y_L + y_{22a} + y_{22f}$$

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

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

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

Redno-naponska negativna povratna sprega

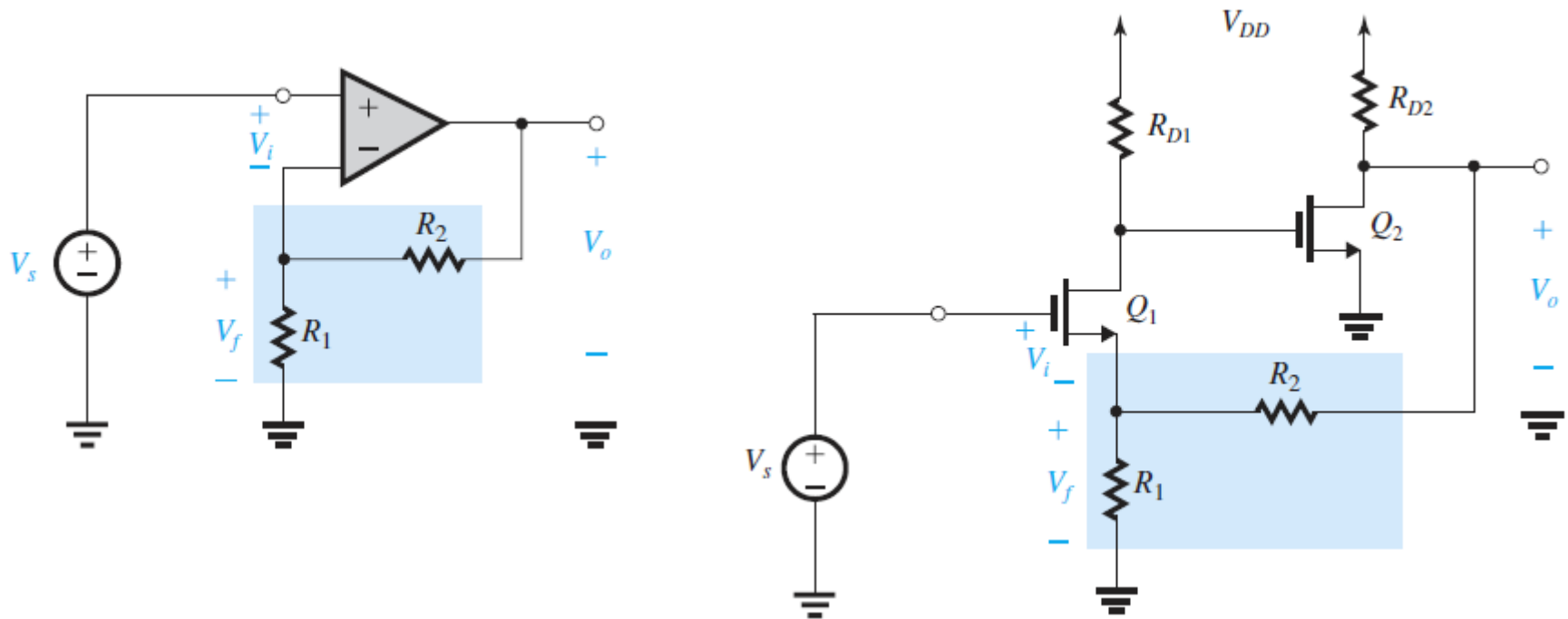


Redna sprega generatora, pojačavača i povratne sprega na ulazu (3 tačke, od kojih dve pripadaju jednom elementu).

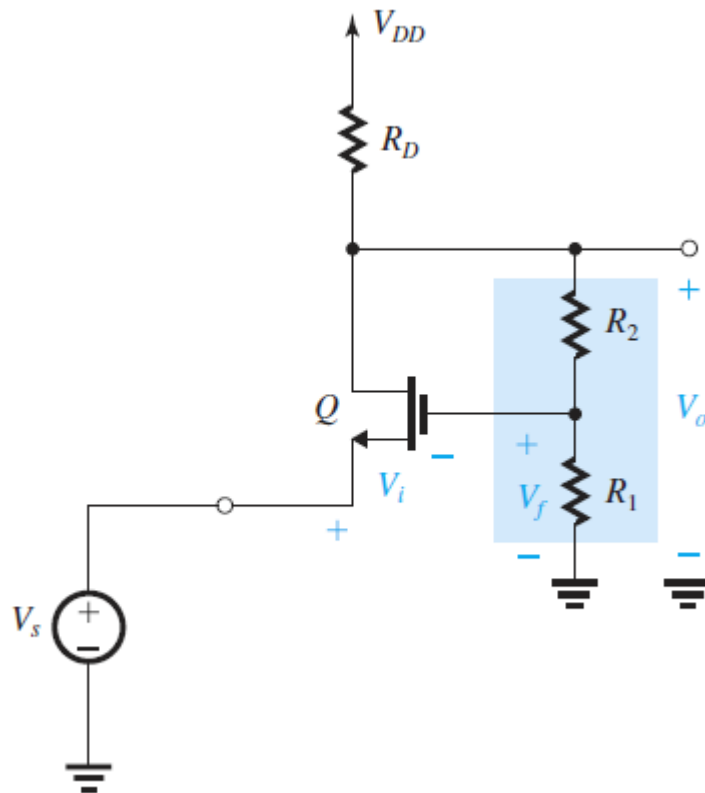
Naponska sprega potrošača, pojačavača i povratne sprega na izlazu (2 tačke koje pripadaju svakom elementu).

Vraćena veličina u kolo povratne sprega je napon.

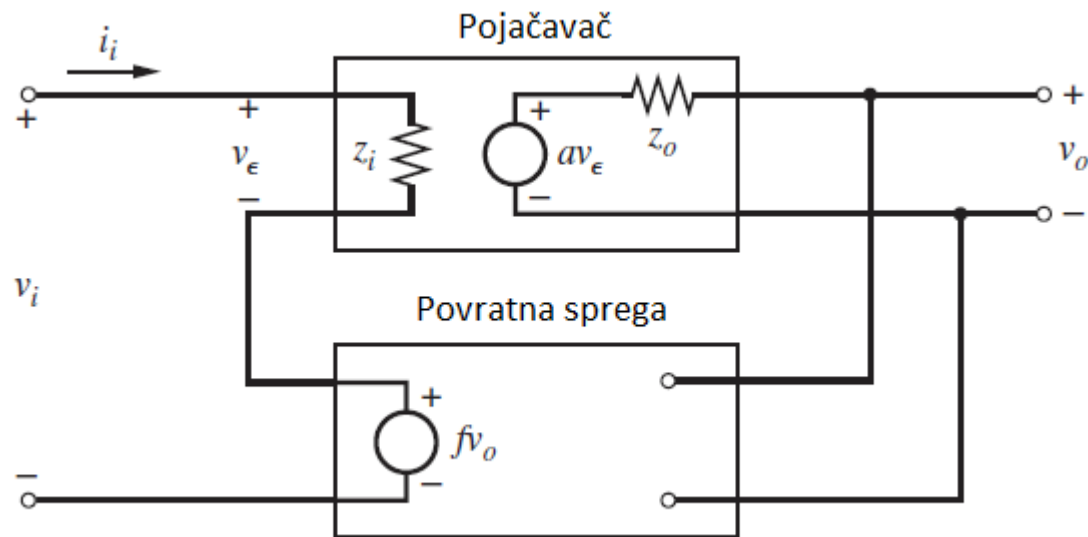
Redno-naponska negativna povratna sprega primeri



Redno-naponska negativna povratna sprega primer



Pojačanje v_o/v_i redno-naponske NPS



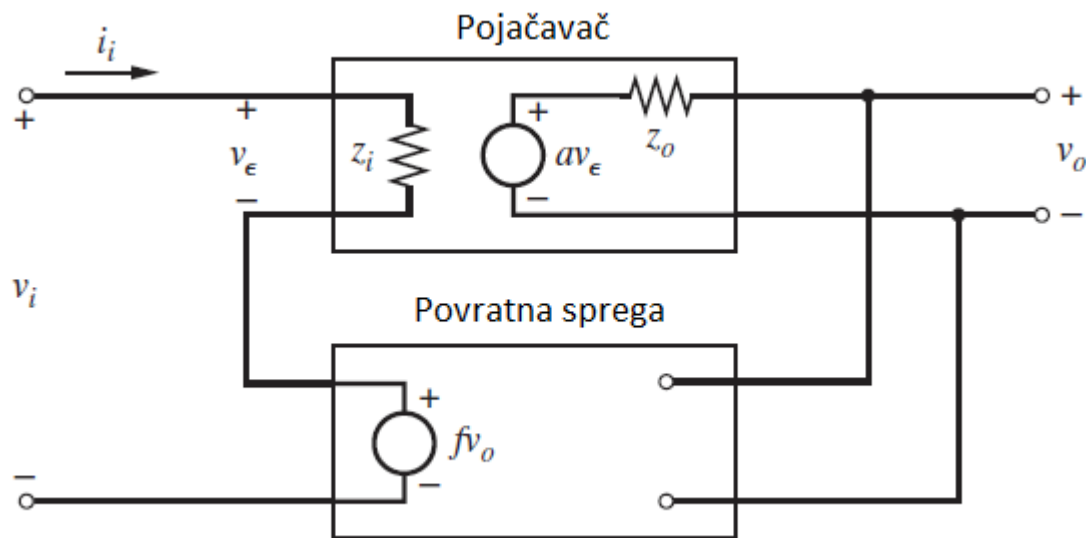
$$v_o = av_\epsilon$$

$$v_{fb} = fv_o$$

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

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

Ulazna impedansa Z_i redno-naponske NPS



$$v_o = av_\epsilon$$

$$v_i = v_\epsilon + fv_o$$

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

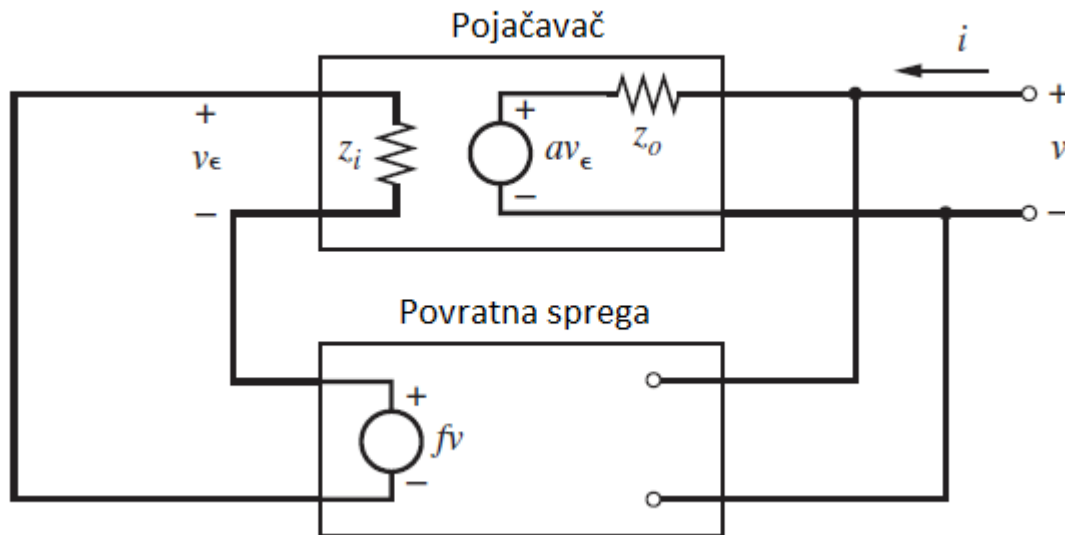
$$v_i = v_\epsilon(1 + af)$$

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

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

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

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



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

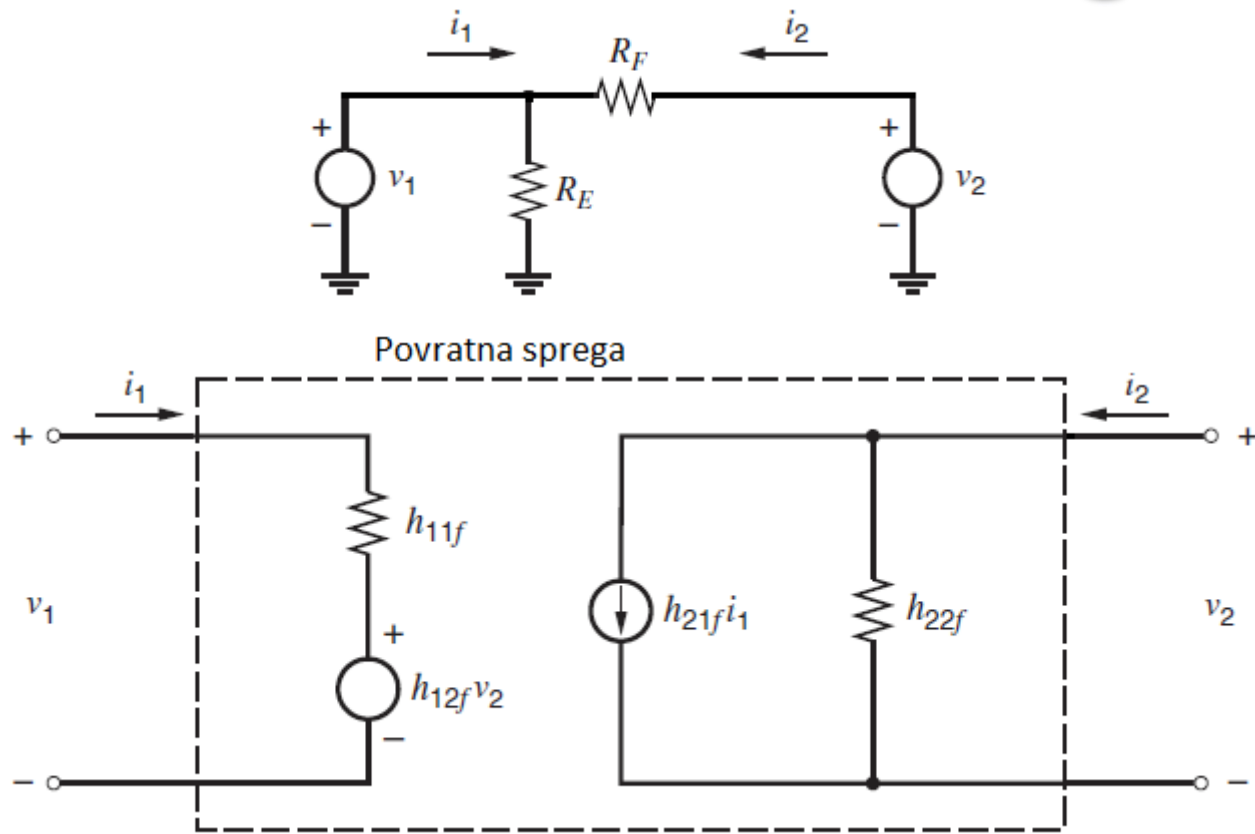
$$h_{11} = \left. \frac{v_1}{i_1} \right|_{v_2 = 0}$$

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

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

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

Ekvivalentni četvoropol za kolo povratne sprege



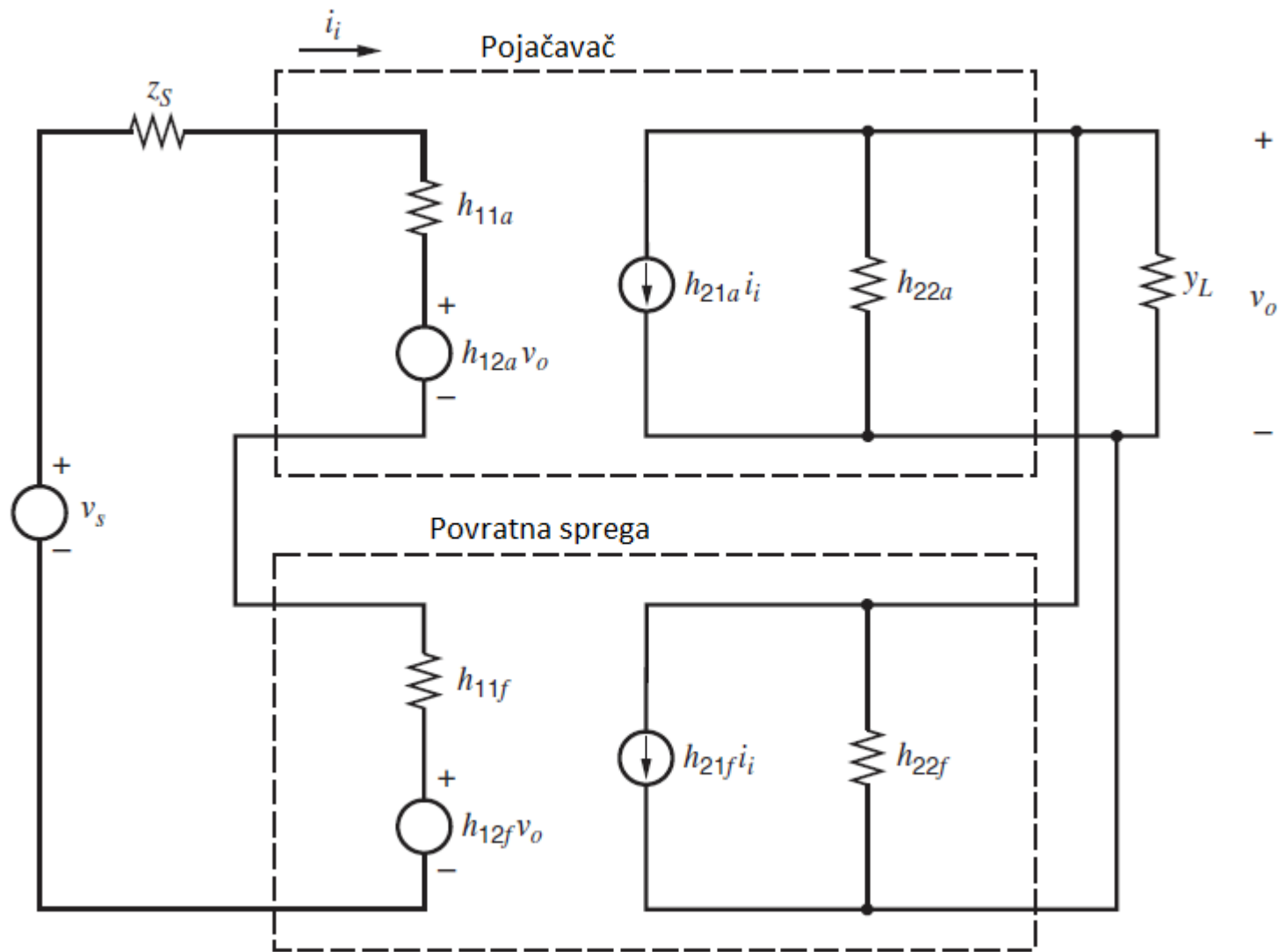
$$h_{11f} = \left. \frac{v_1}{i_1} \right|_{v_2=0} = R_E || R_F$$

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

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

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

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

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

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

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

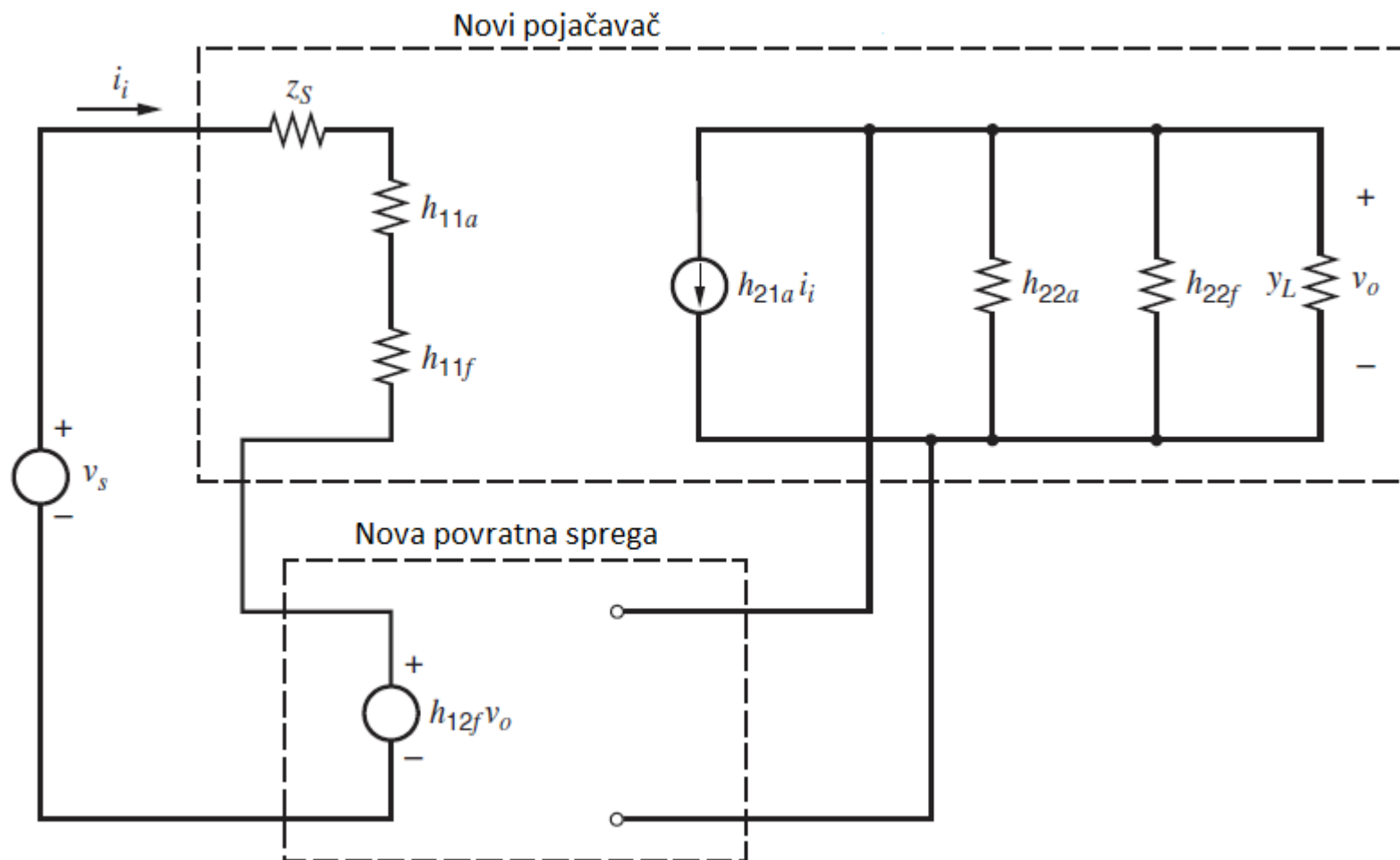
$$|h_{21a}| \gg |h_{21f}|$$

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

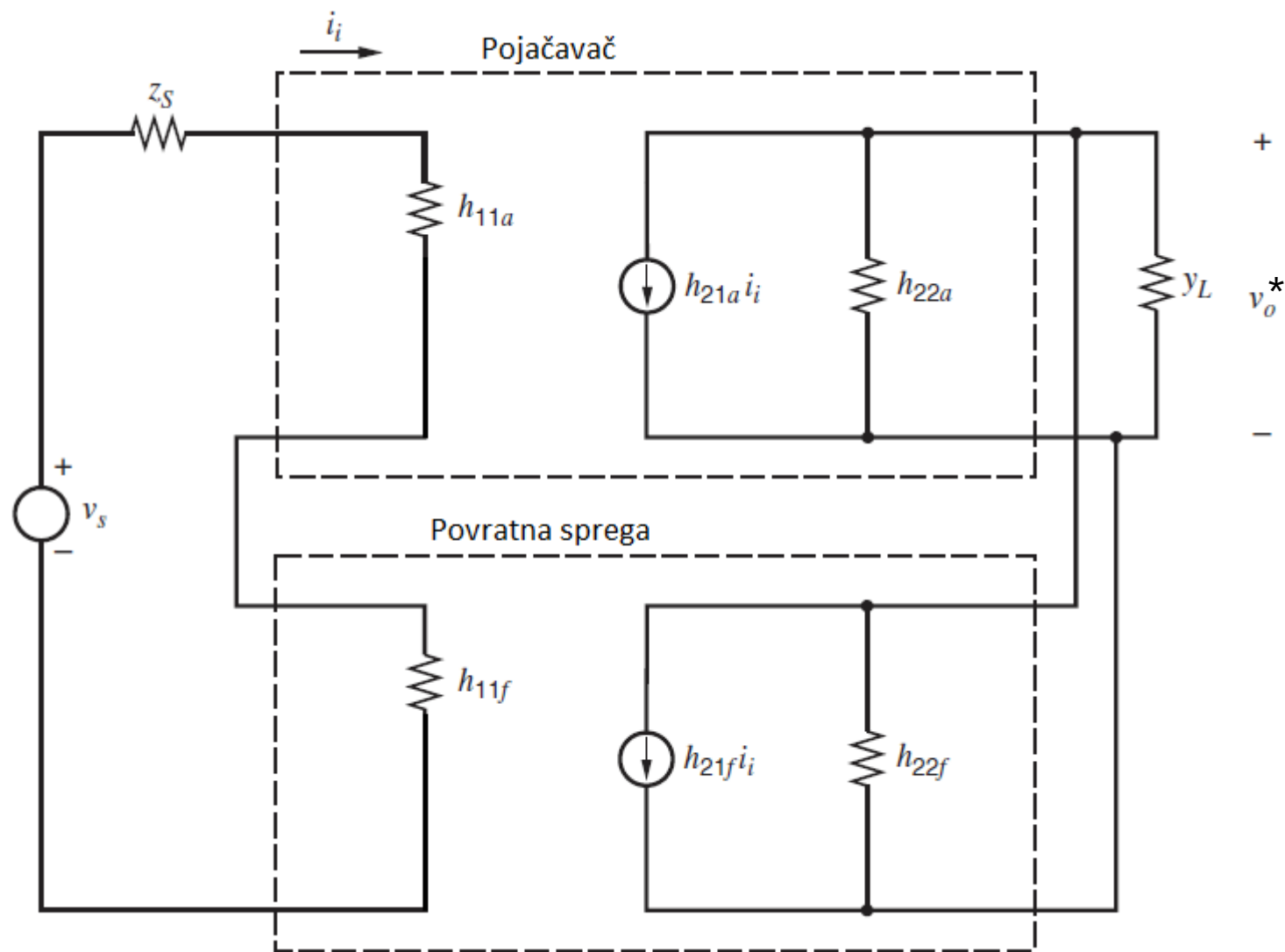
$$a = -\frac{h_{21a}}{z_i y_o}$$

$$f = h_{12f}$$

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 $\beta A = -af$.

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

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

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

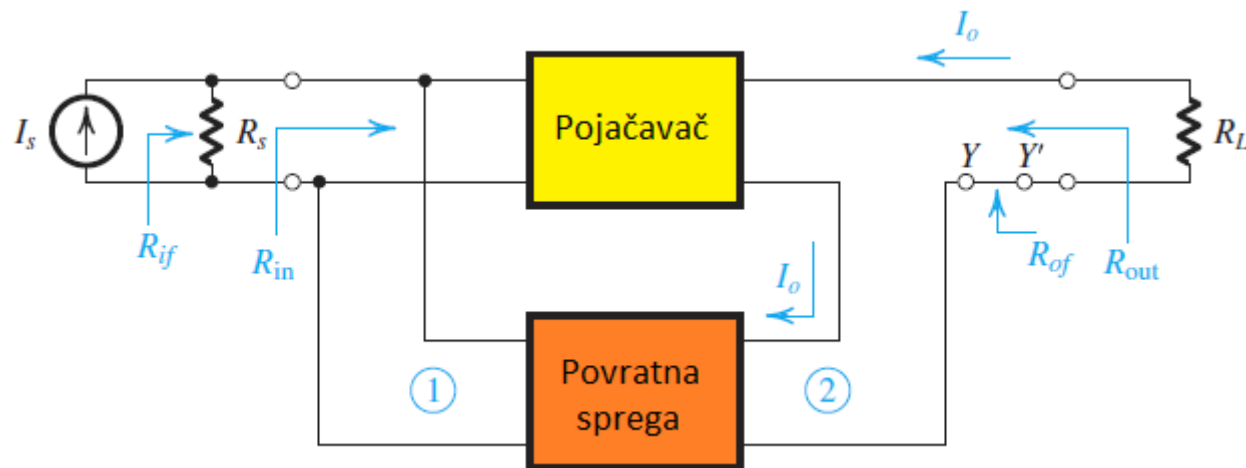
$$y_o = y_L + h_{22a} + h_{22f}$$

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

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

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

Paralelno-strujna negativna povratna sprega

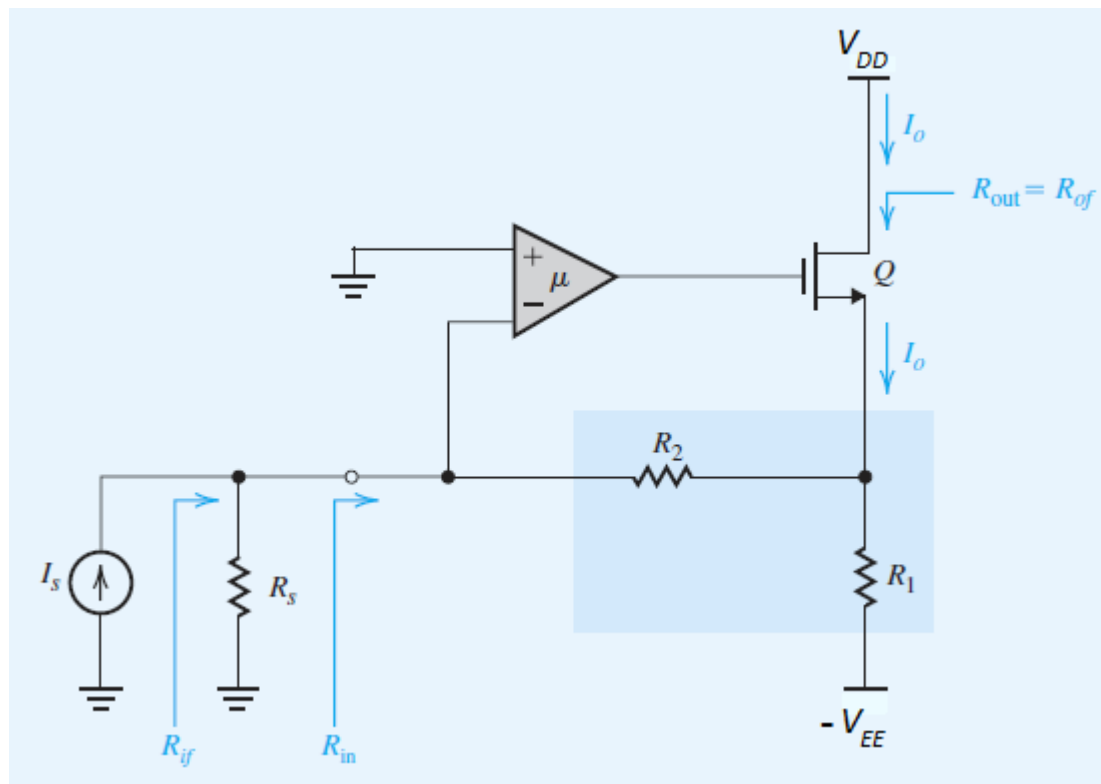


Paralelna sprega generatora, pojačavača i povratne sprege na ulazu (2 tačke koje pripadaju svakom elementu).

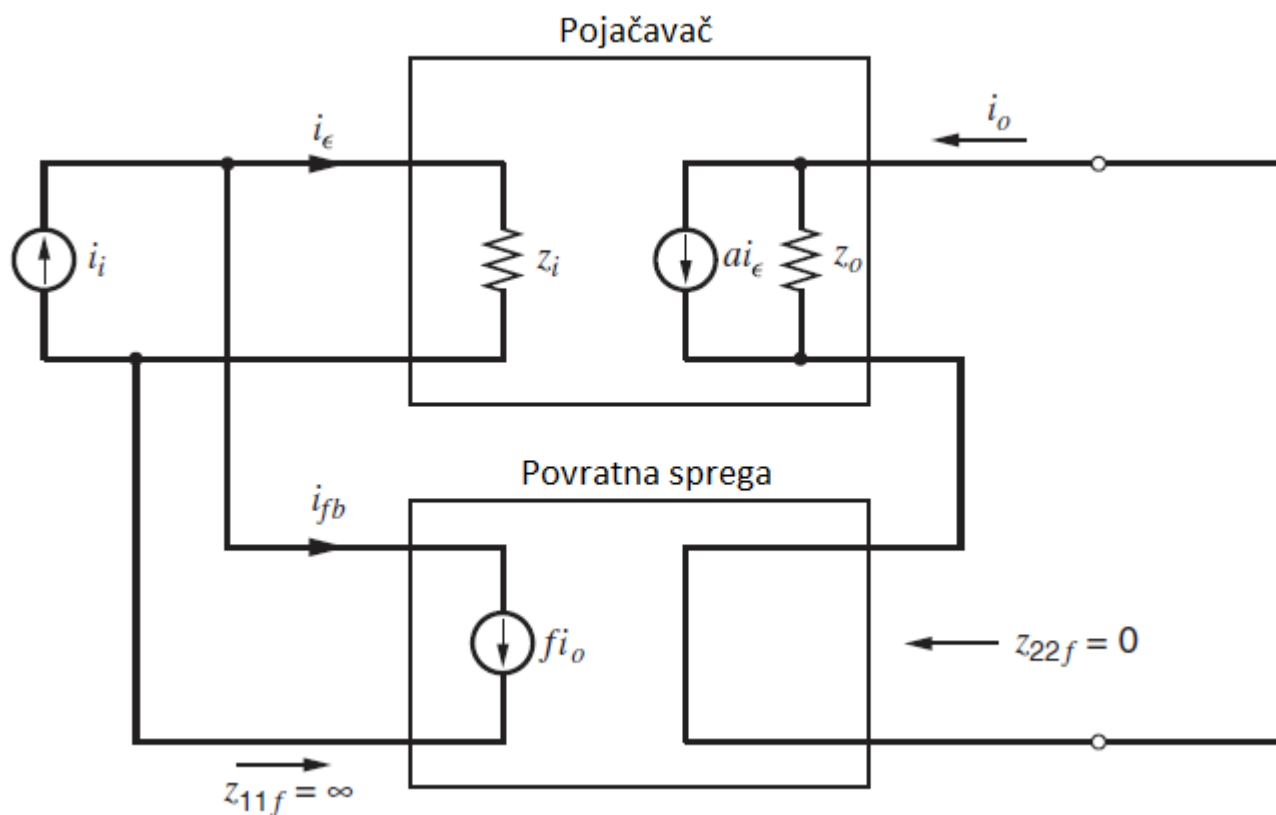
Strujna sprega potrošača, pojačavača i povratne sprege na izlazu (3 tačke, od kojih dve pripadaju jednom elementu).

Vraćena veličina u kolo povratne sprege je struja.

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



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

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

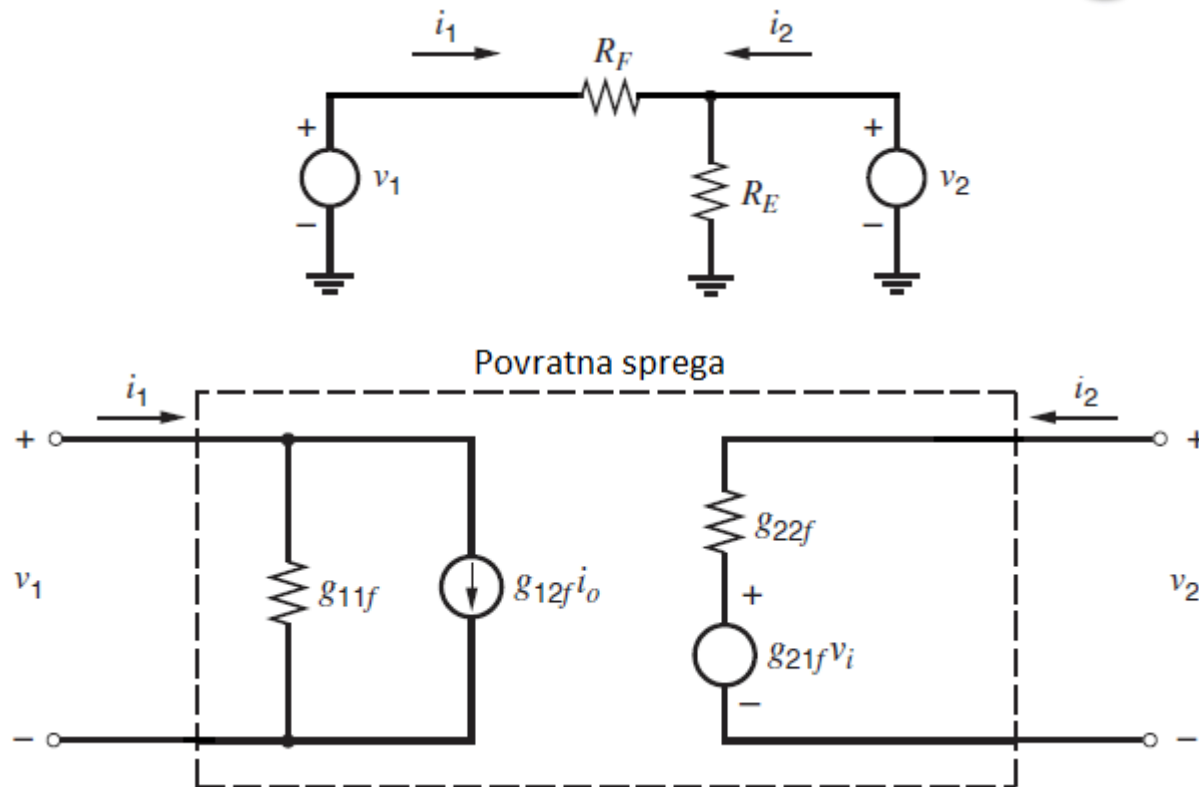
$$g_{11} = \left. \frac{i_1}{v_1} \right|_{i_2 = 0}$$

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

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

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

Ekvivalentni četvoropol za kolo povratne sprege



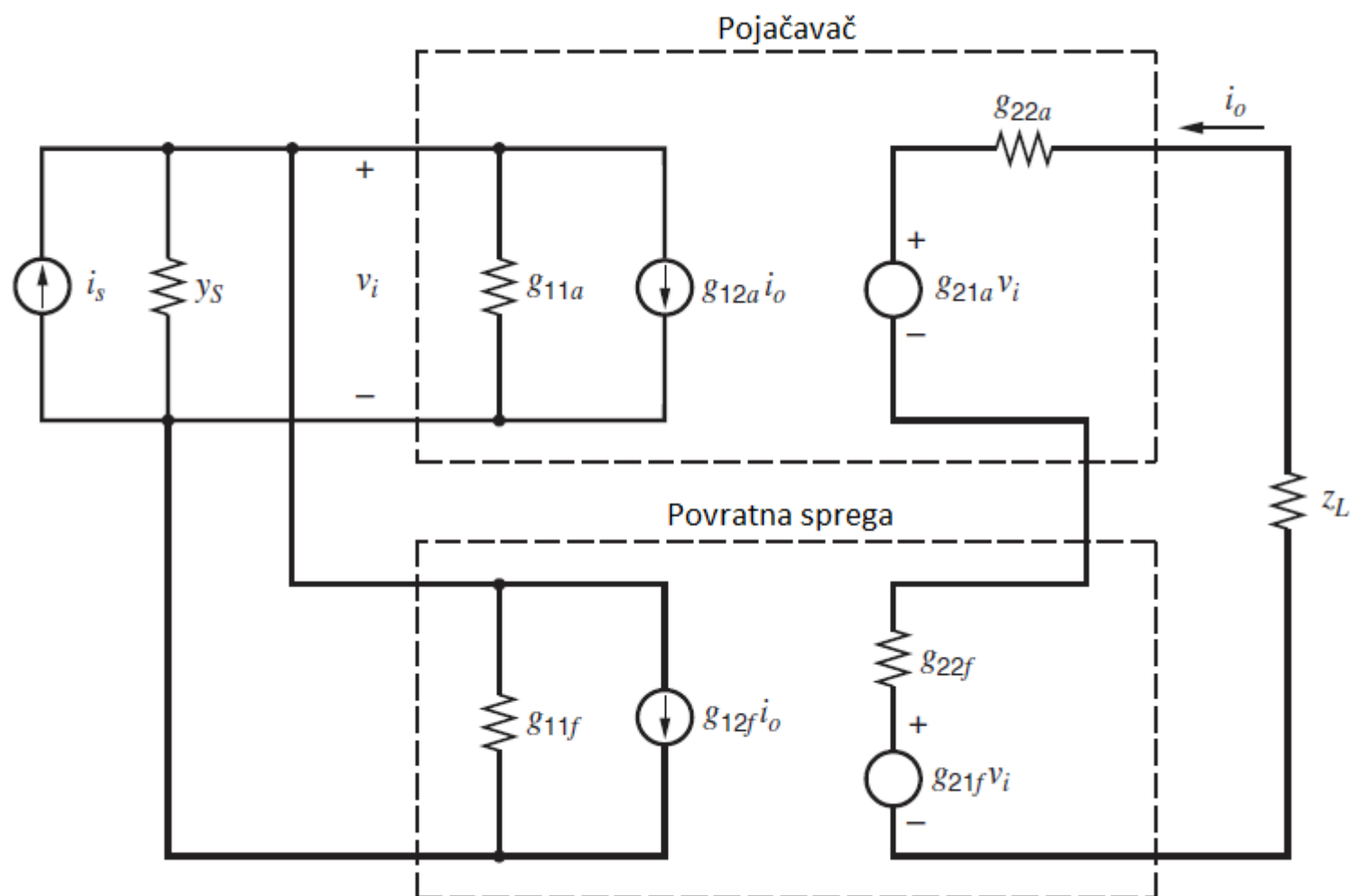
$$g_{11f} = \left. \frac{i_1}{v_1} \right|_{i_2=0} = \frac{1}{R_F + R_E}$$

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

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

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

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

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

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

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

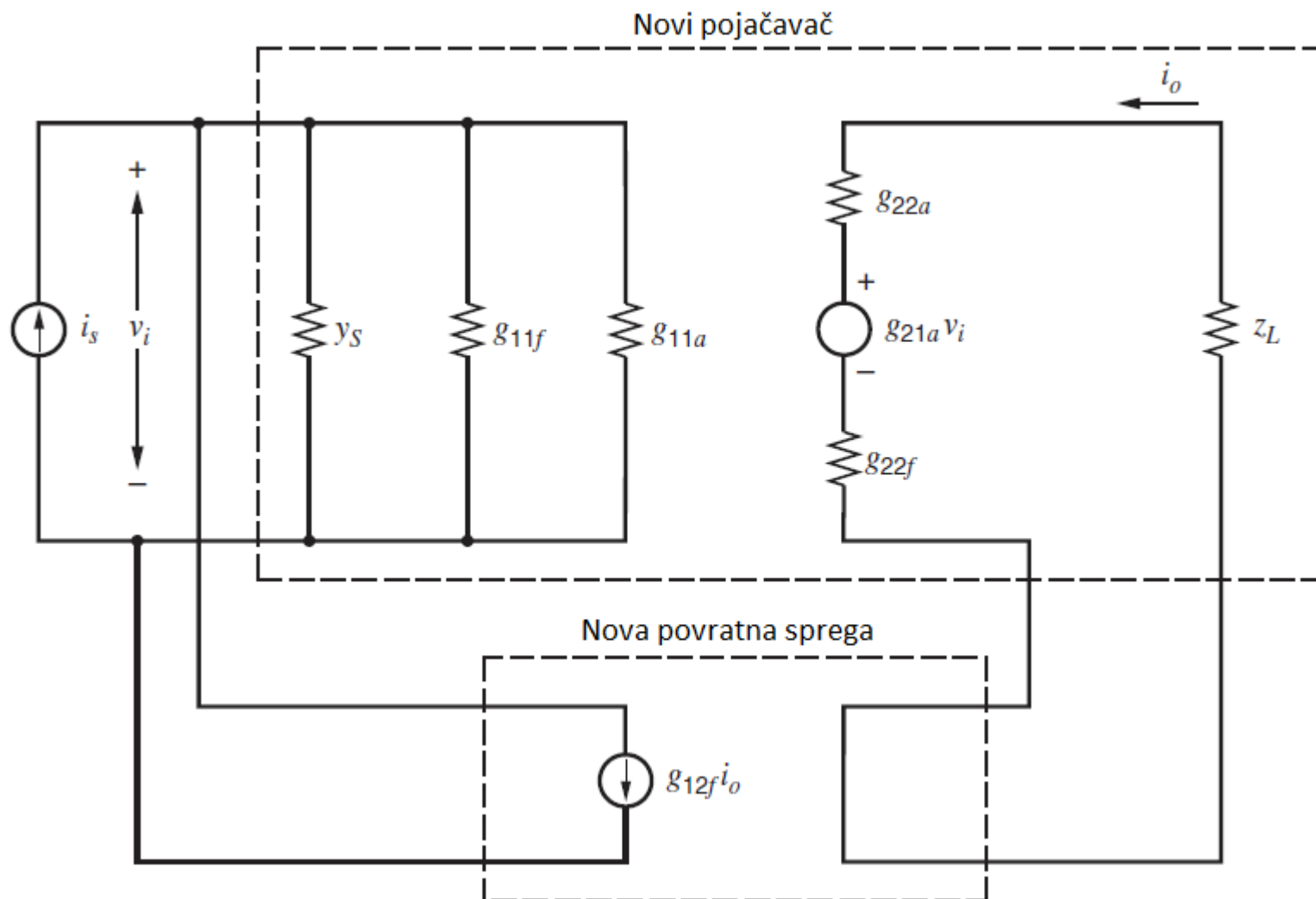
$$|g_{21a}| \gg |g_{21f}|$$

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

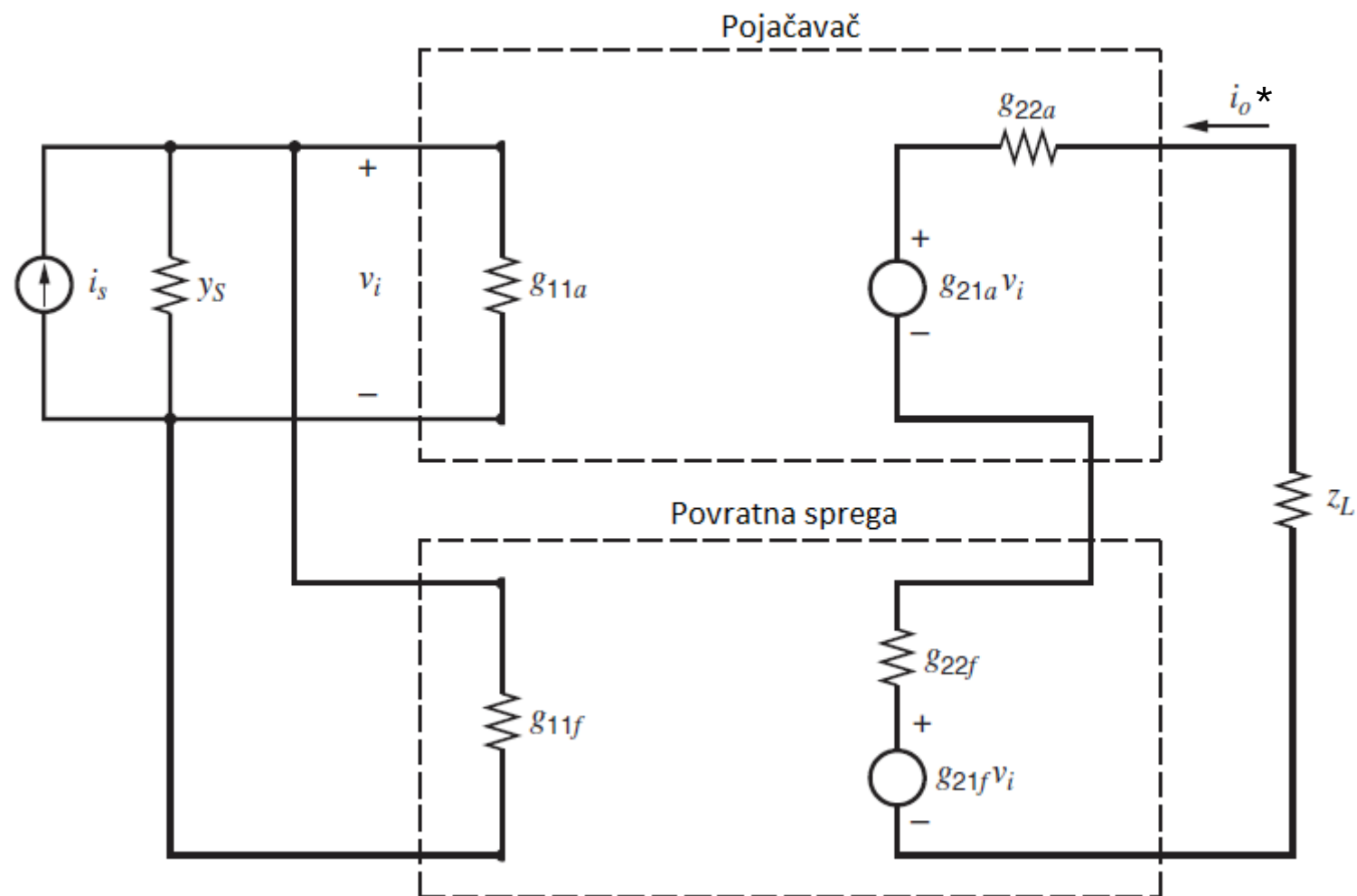
$$a = -\frac{g_{21a}}{y_i z_o}$$

$$f = g_{12f}$$

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 $\beta A = -af$.

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

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

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

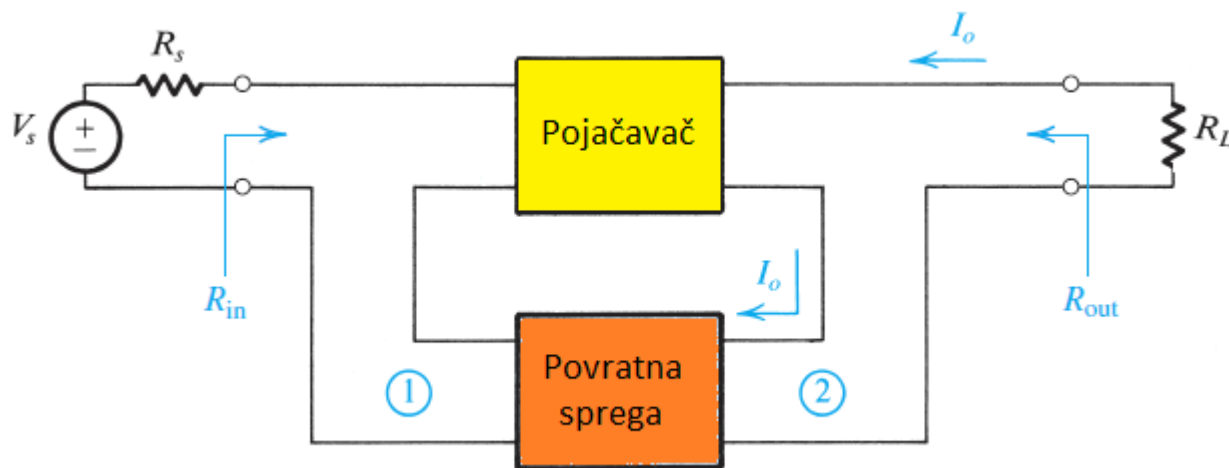
$$z_o = z_L + g_{22a} + g_{22f}$$

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

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

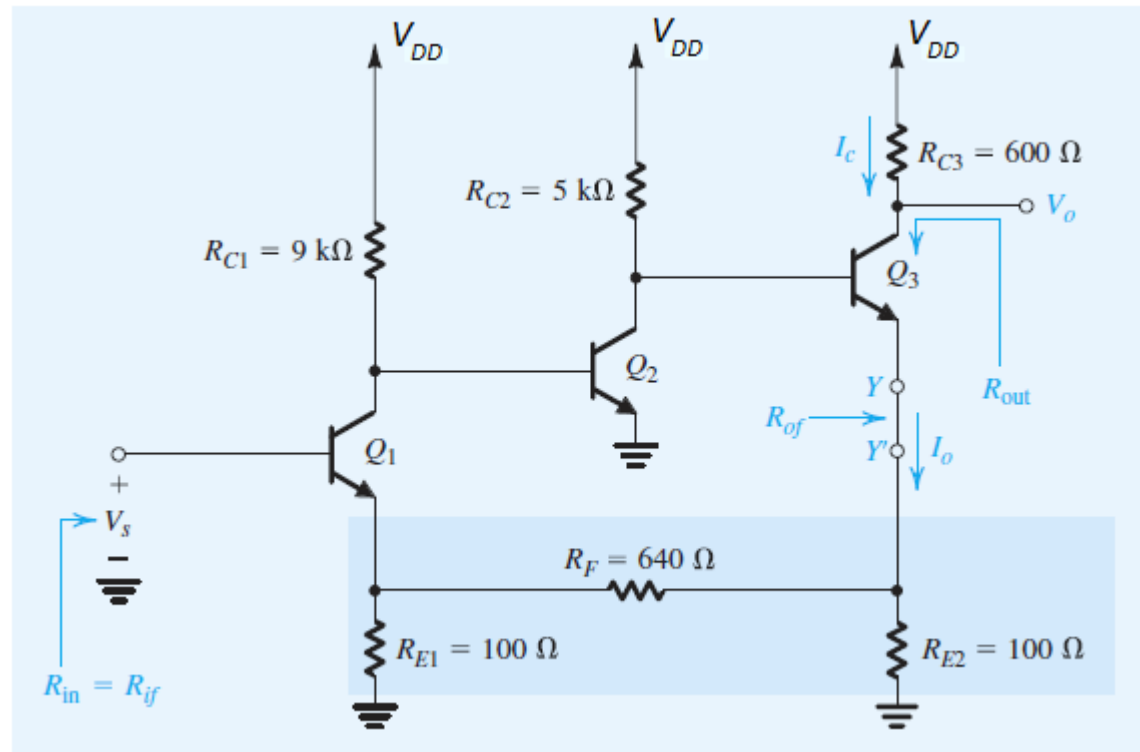
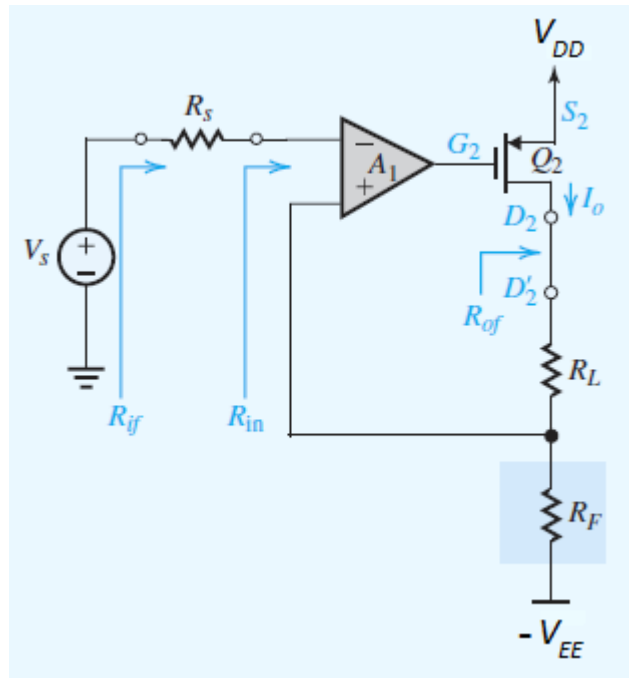
$$\frac{i_o}{i_s} = \frac{a}{1 + af} = A$$

Redno-strujna negativna povratna sprega

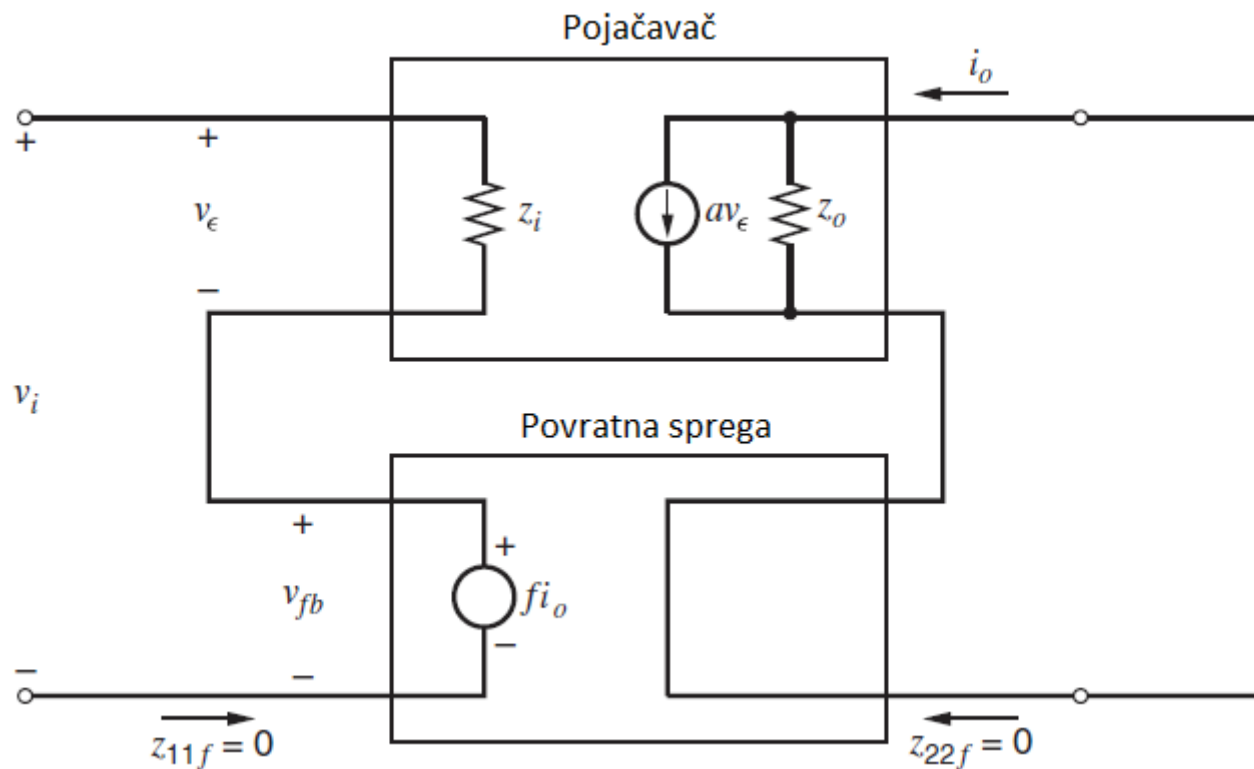


Redna sprega generatora, pojačavača i povratne sprege na ulazu (3 tačke, od kojih dve pripadaju jednom elementu).
Strujna sprega potrošača, pojačavača i povratne sprege na izlazu (3 tačke, od kojih dve pripadaju jednom elementu).
Vraćena veličina u kolo povratne sprege je struja.

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



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

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

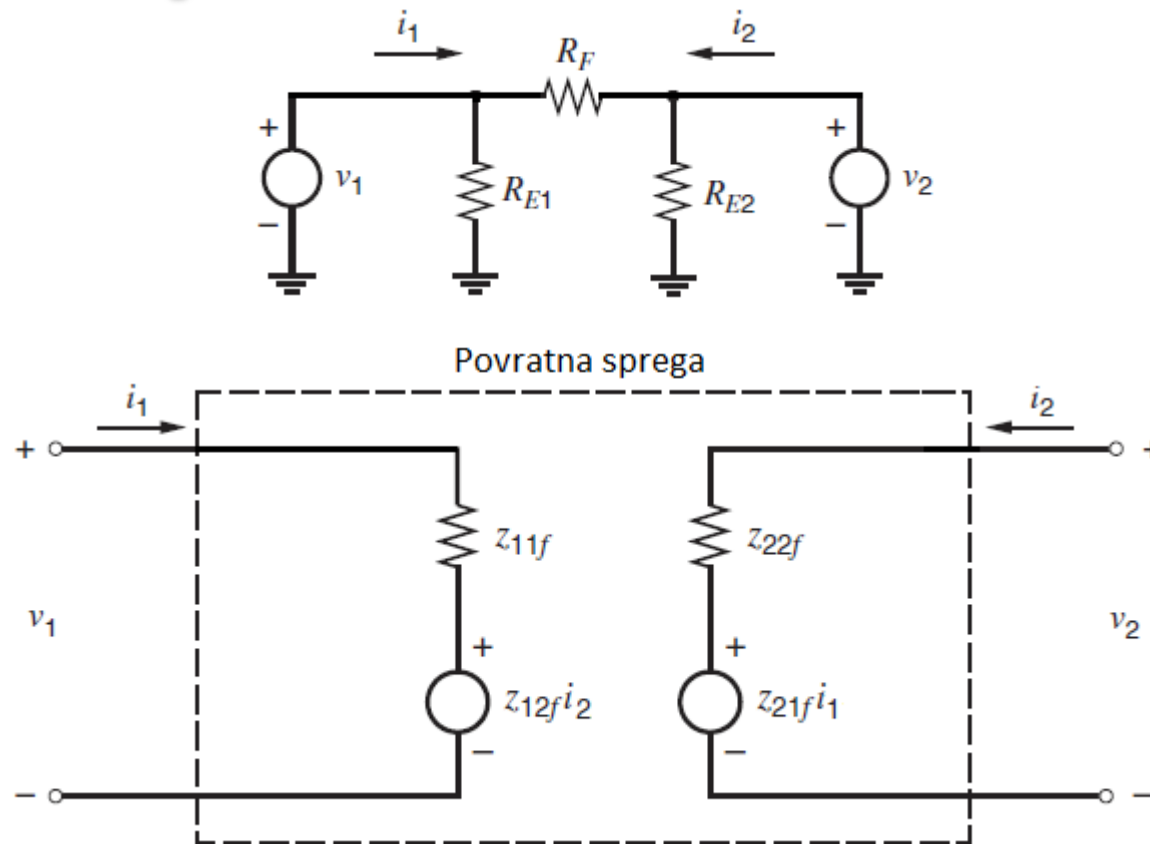
$$z_{11} = \frac{v_1}{i_1} \Big|_{i_2 = 0}$$

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

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

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

Ekvivalentni četvoropol za povratnu spregu



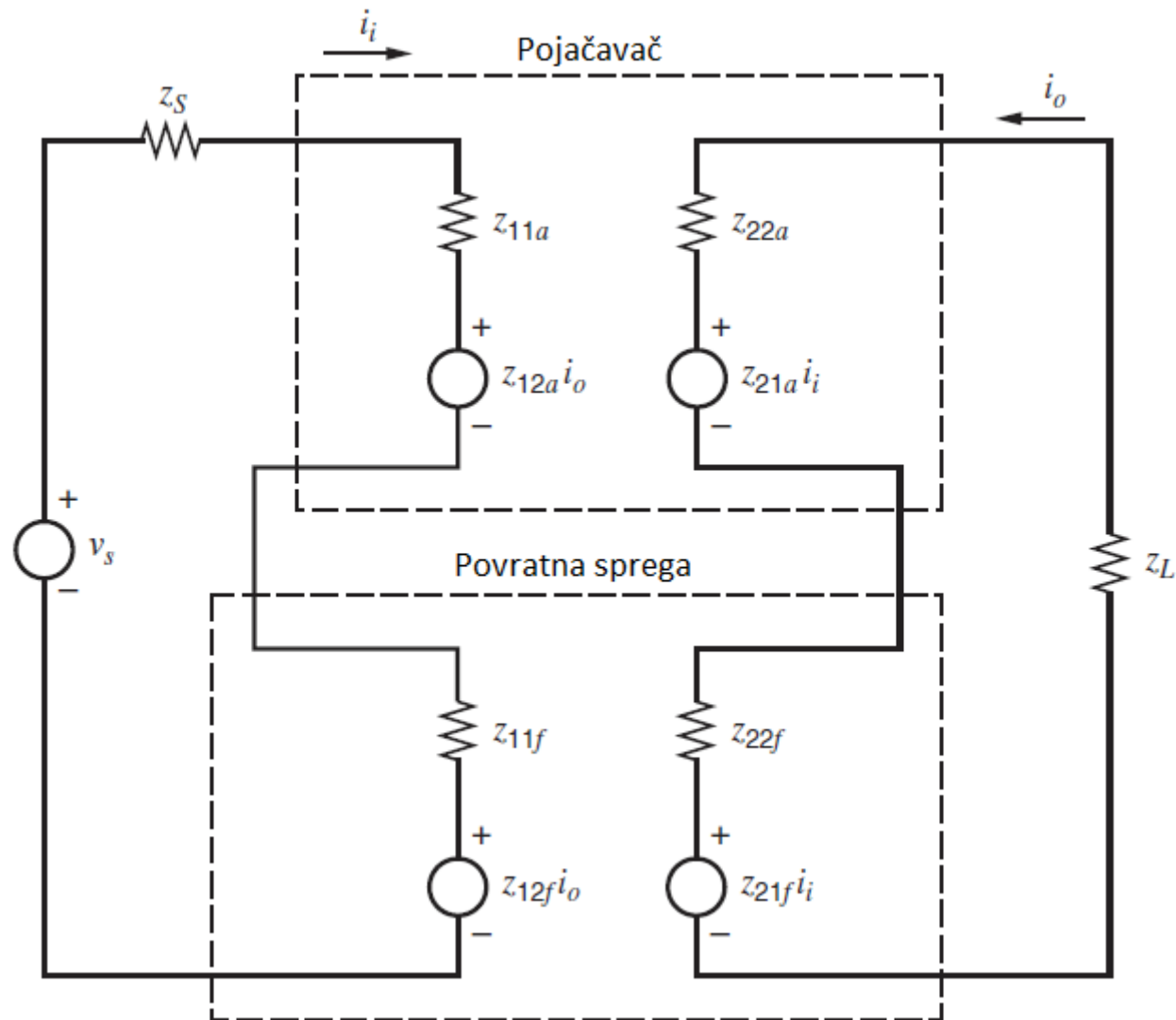
$$z_{11f} = \left. \frac{v_1}{i_1} \right|_{i_2=0} = R_{E1} || (R_F + R_{E2})$$

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

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

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

Izračunavanje pojačanja redno-strujne NPS



Izračunavanje pojačanja redno-strujne NPS

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

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

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

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

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

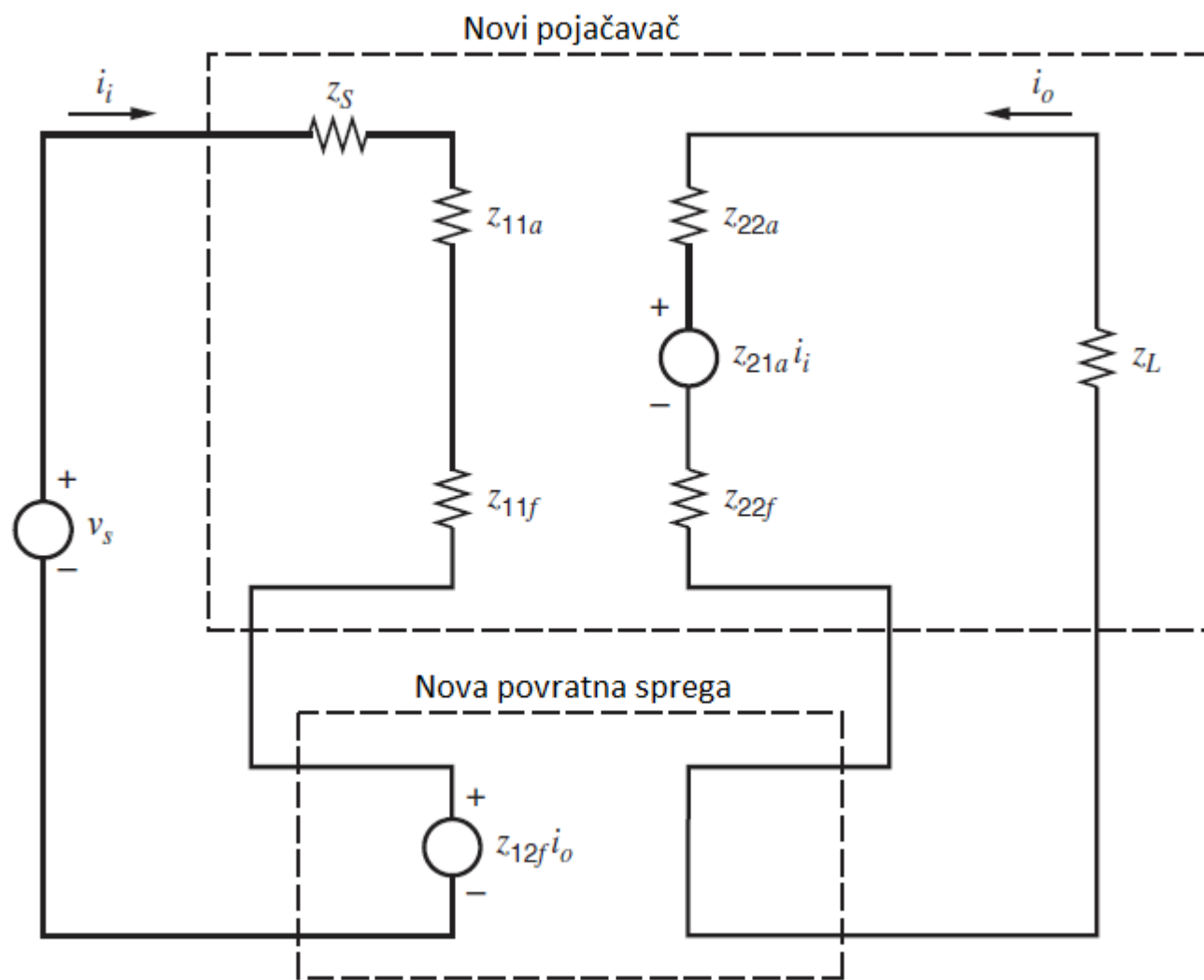
$$|z_{21a}| \gg |z_{21f}|$$

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

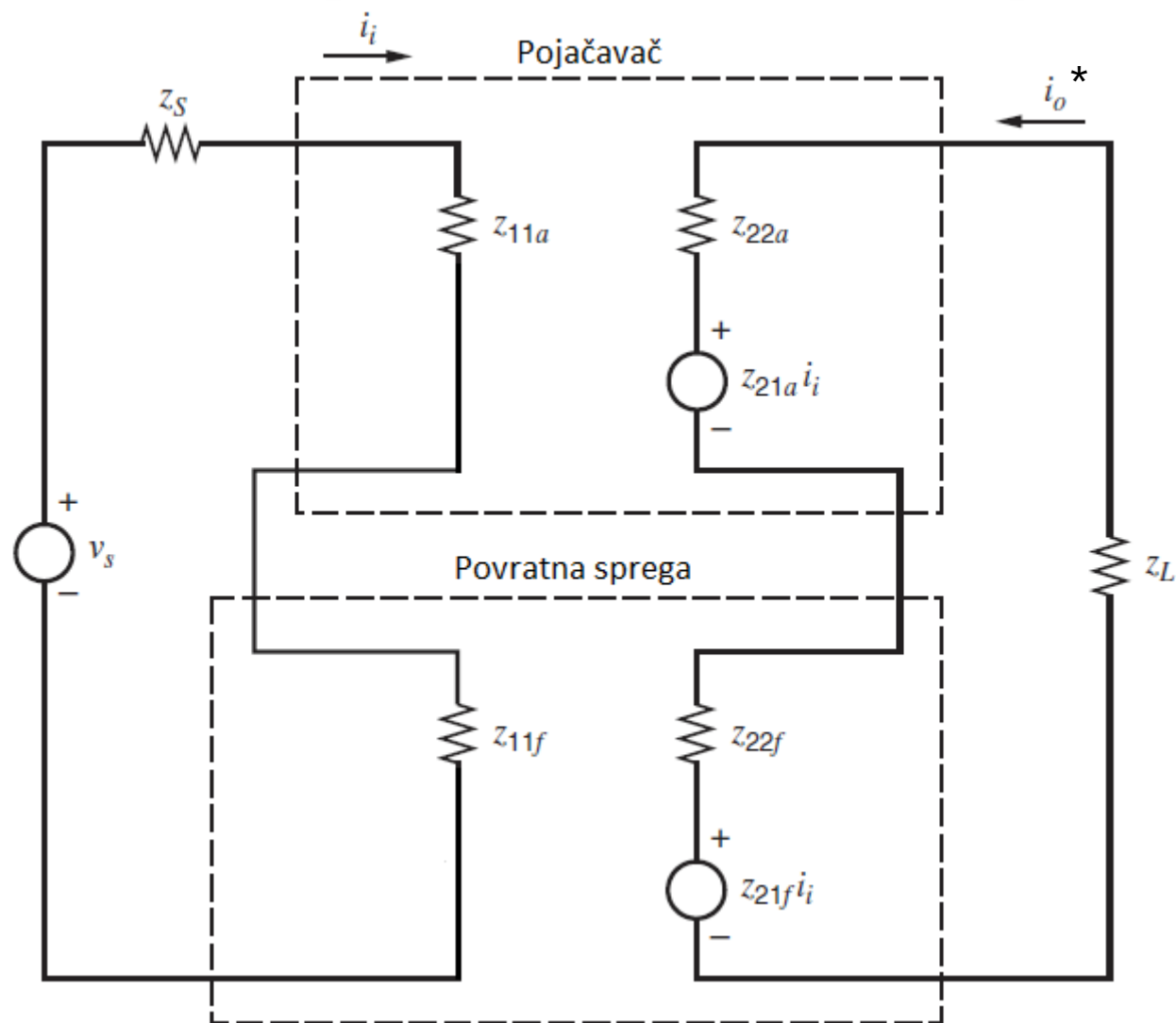
$$a = -\frac{z_{21a}}{z_i z_o}$$

$$f = z_{12f}$$

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 $\beta A = -af$.

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

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

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

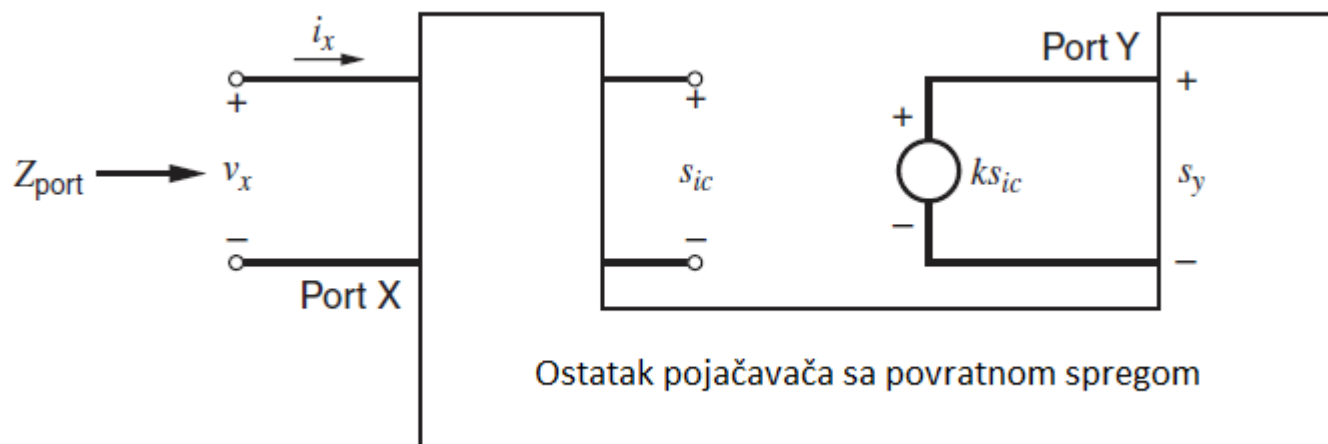
$$z_o = z_L + z_{22a} + z_{22f}$$

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

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

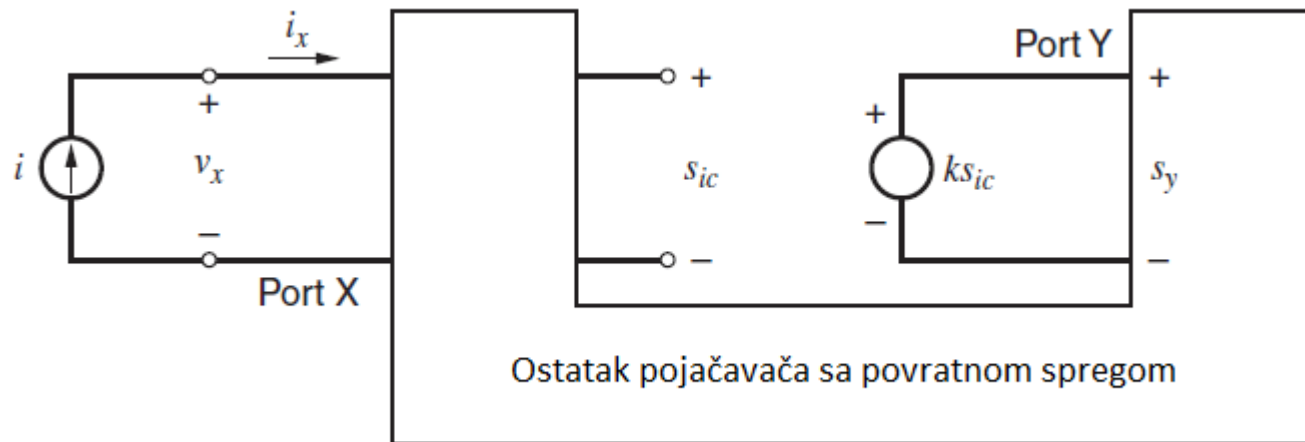
$$\frac{i_o}{v_s} = \frac{a}{1 + af} = A$$

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



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

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



Naponi u kolu odgovaraju superpoziciji napona i struja generatora:

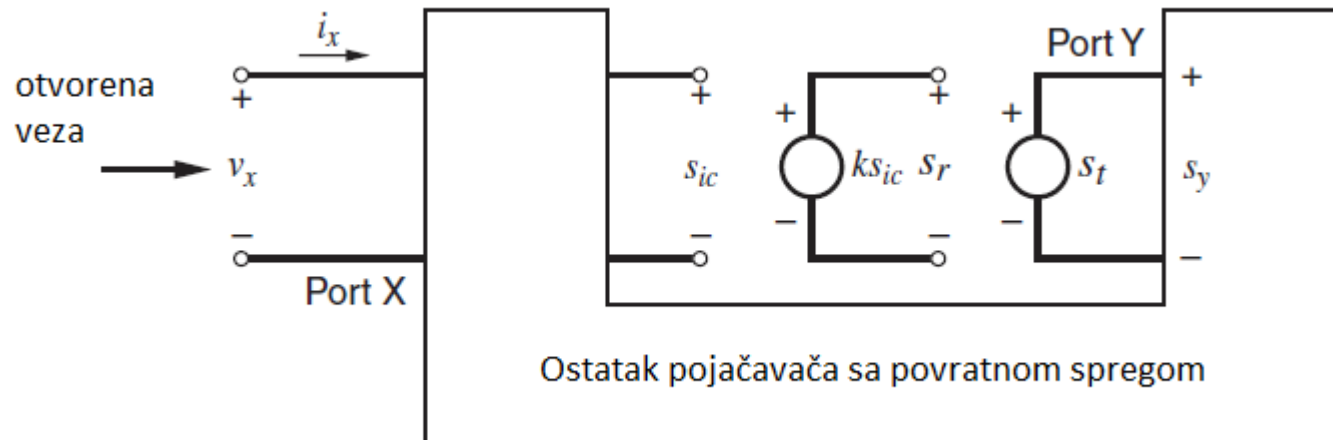
$$v_x = a_1 i_x + a_2 s_y$$

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

$$s_y = k s_{ic}$$

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

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.

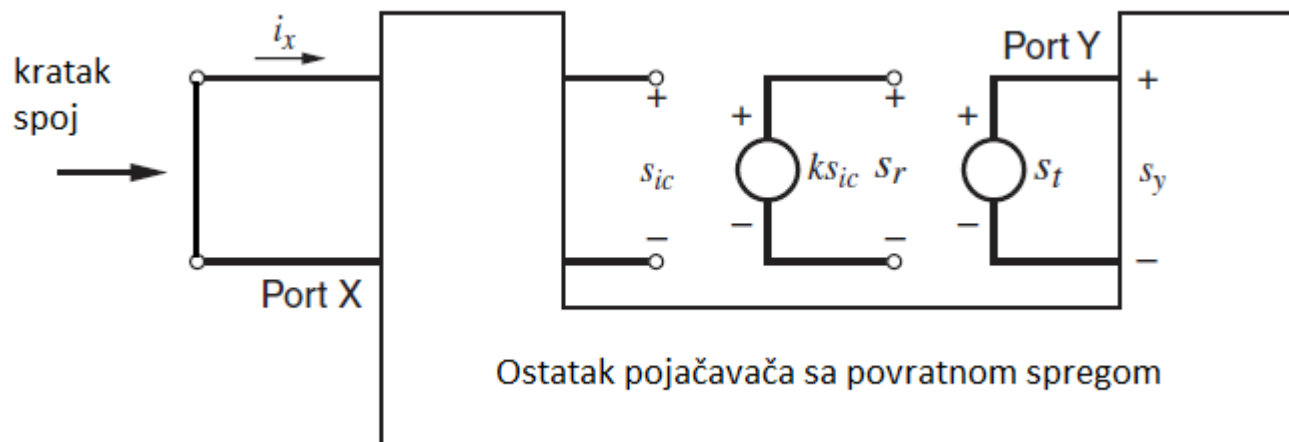
$$s_y = s_t$$

$$s_{ic} = a_4 s_t$$

$$s_r = ks_{ic}$$

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

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.

$$s_y = s_t$$

$$0 = a_1 i_x + a_2 s_y$$

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

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

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

$$s_r = ks_{ic}$$

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

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

Ulazna impedansa za anulirano pojačanje i povratnu spregu je:

$$k = 0$$

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

$$v_x = a_1 i_x$$

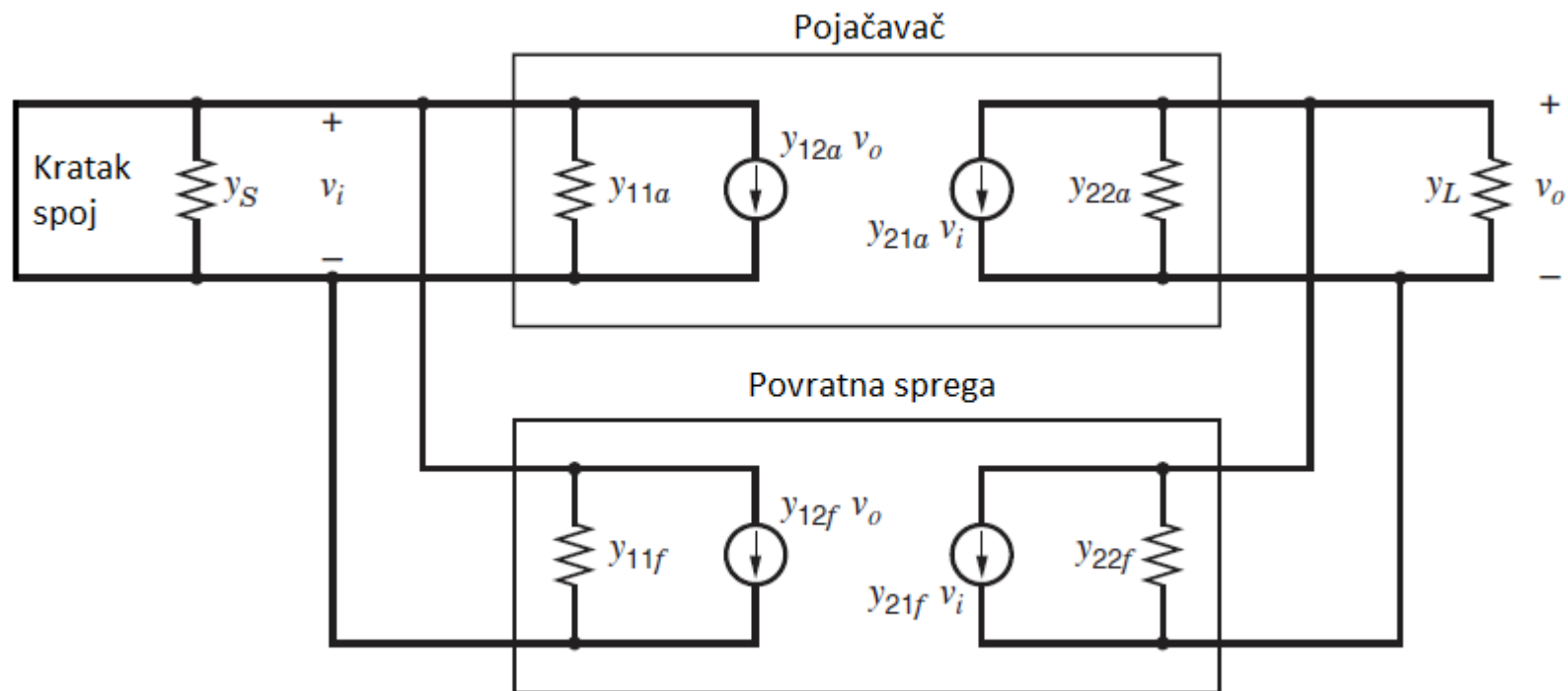
$$Z_{\text{port}}(k = 0) = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{k=0} = \left. \frac{v_x}{i_x} \right|_{s_y=0} = a_1$$

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

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

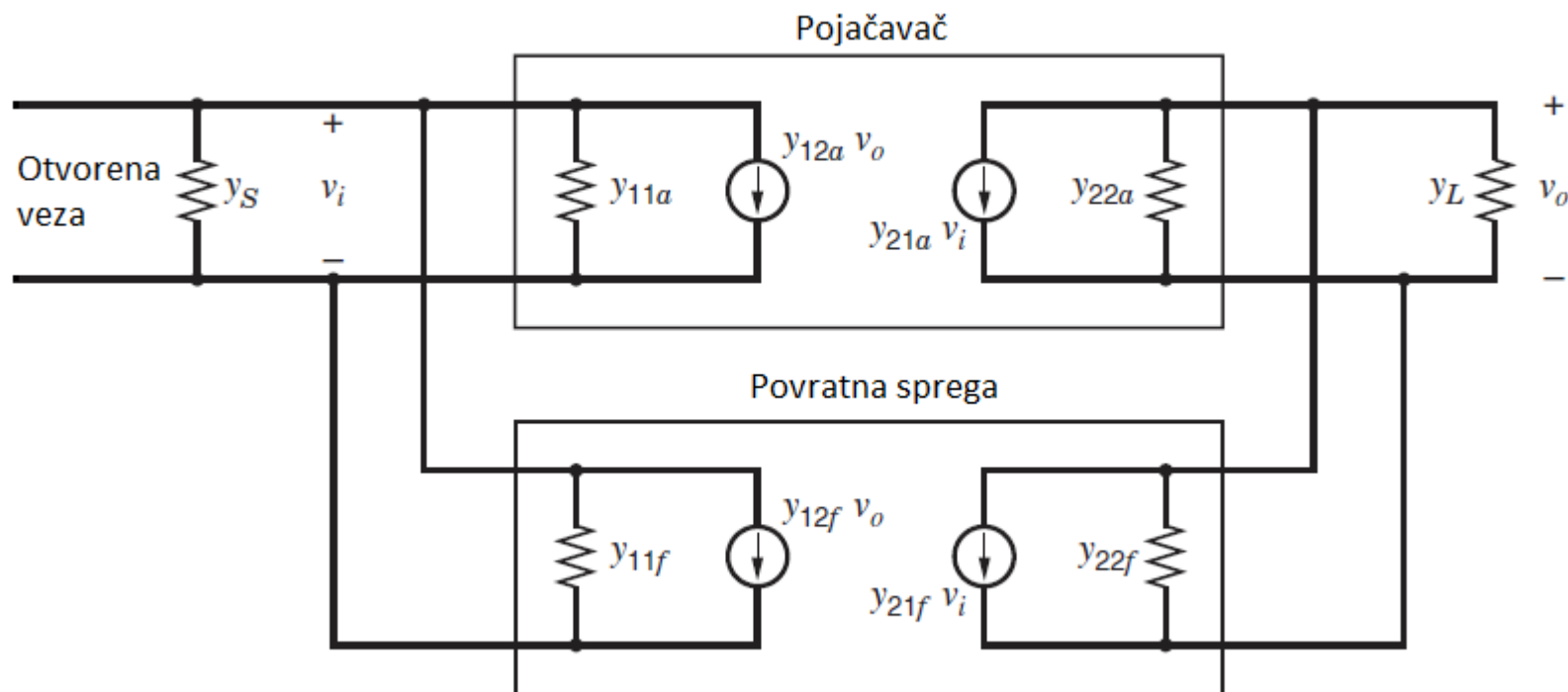
$$Z_{\text{port}} = Z_{\text{port}}(k = 0) \frac{1 - \beta A_{\text{KS}}}{1 - \beta A_{\text{OV}}}$$

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



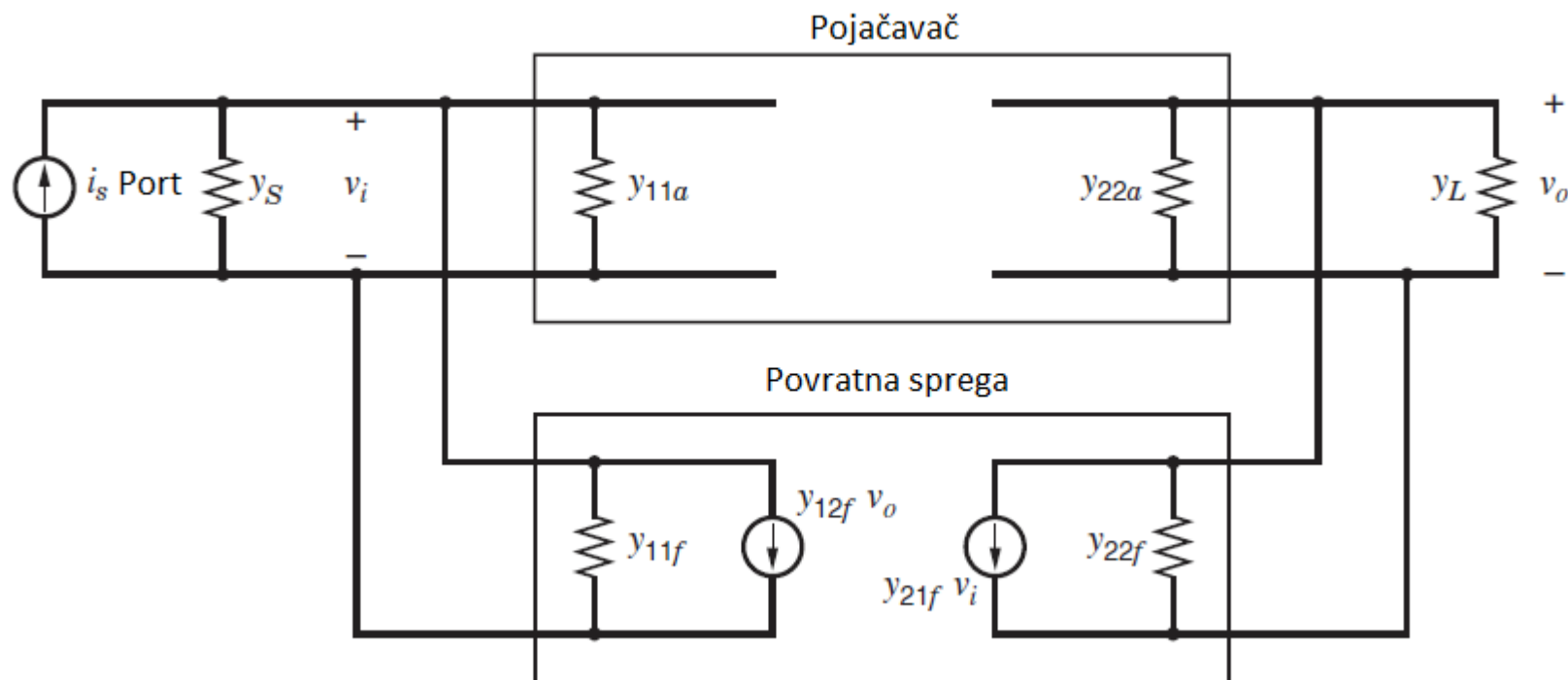
$$\beta A_{KS} = 0$$

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



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

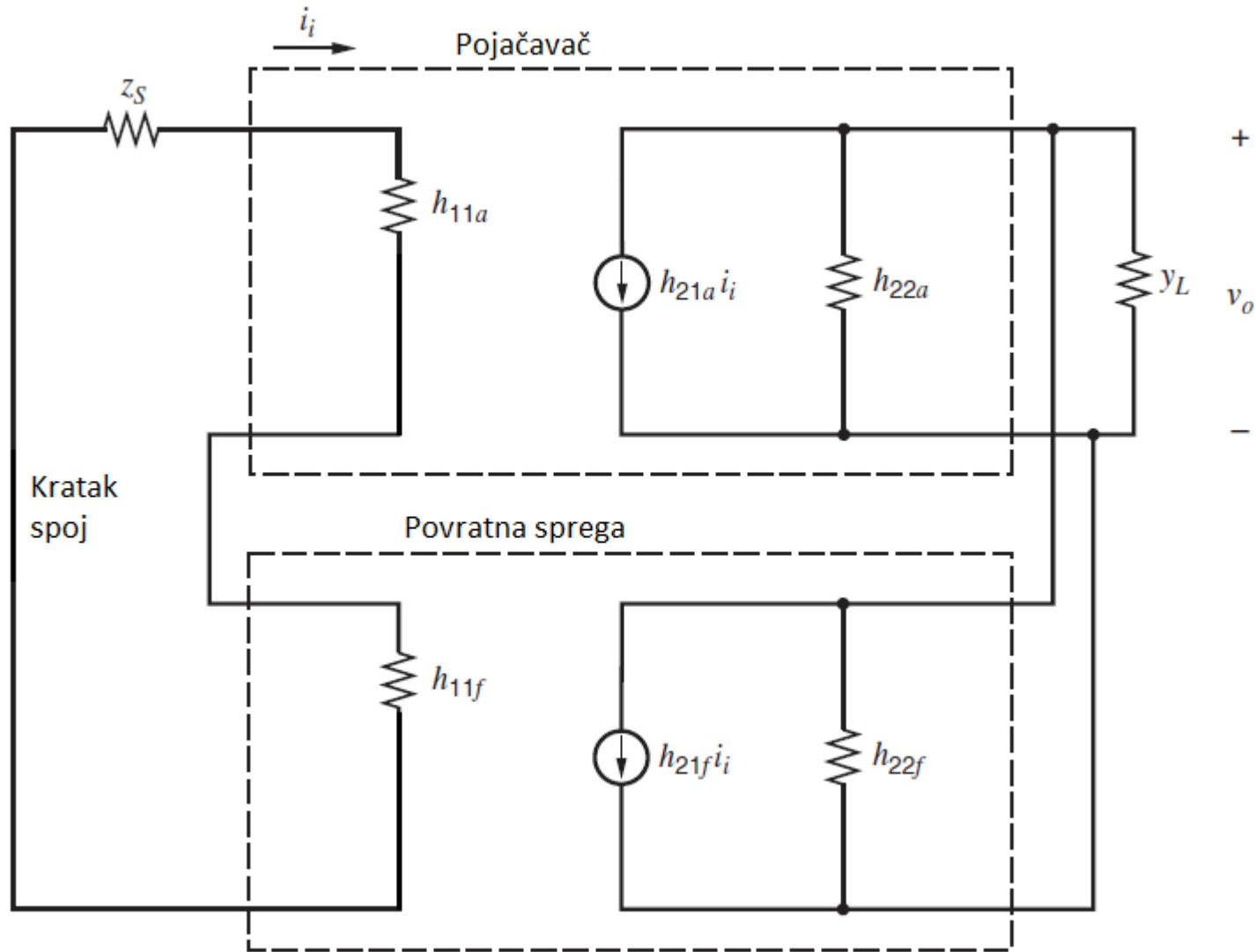
Blackman-ova formula za ulaznu Z_i impedansu paralelno-naponske NPS



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

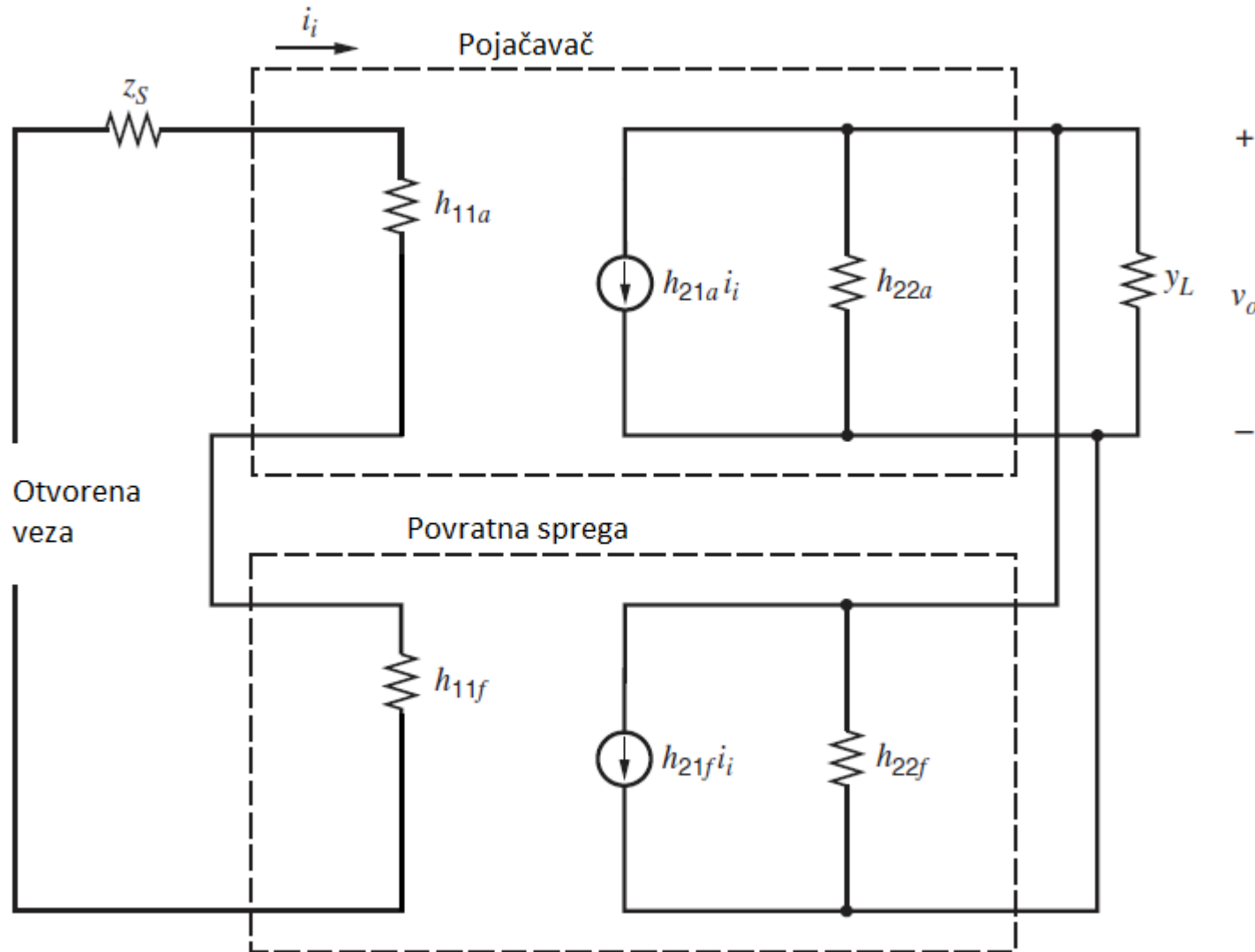
$$Z_{\text{port}} = Z_{\text{port}}(k = 0) \frac{1}{1 - \beta A}$$

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



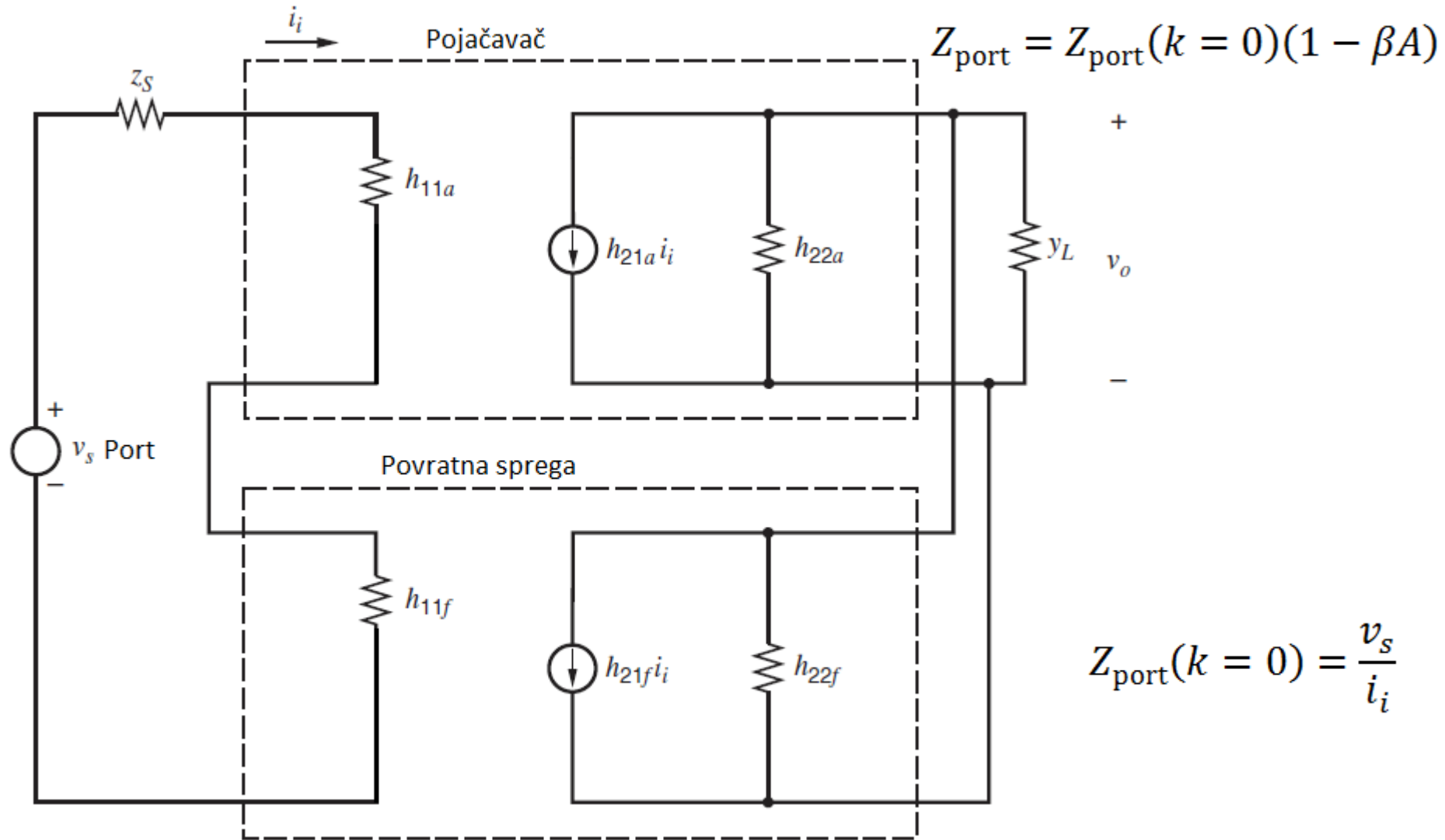
$$\beta A_{KS} = \beta A$$

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

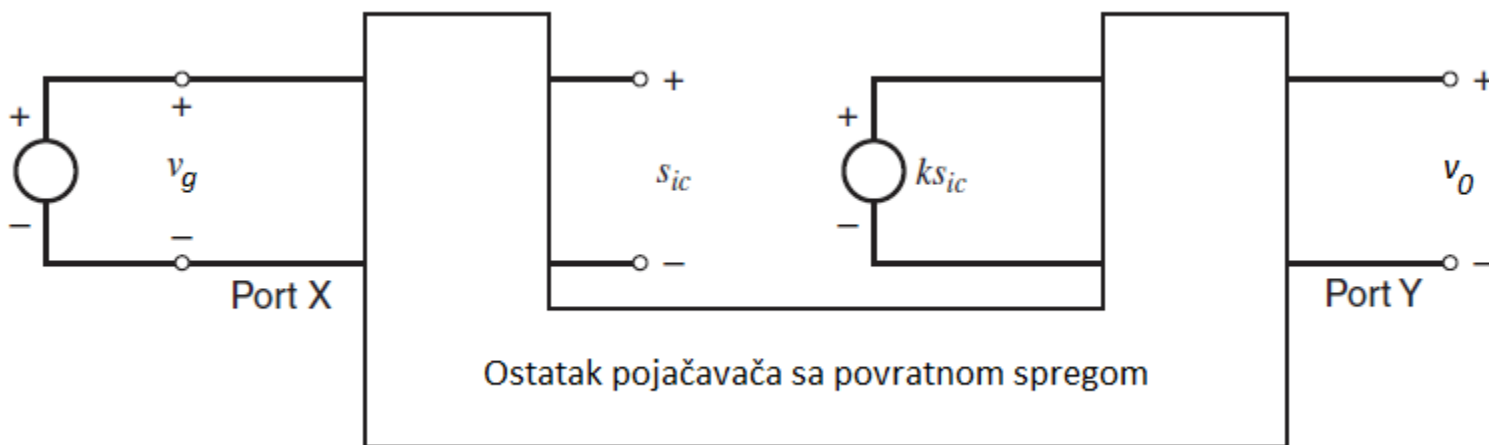


$$\beta A_{OV} = 0$$

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

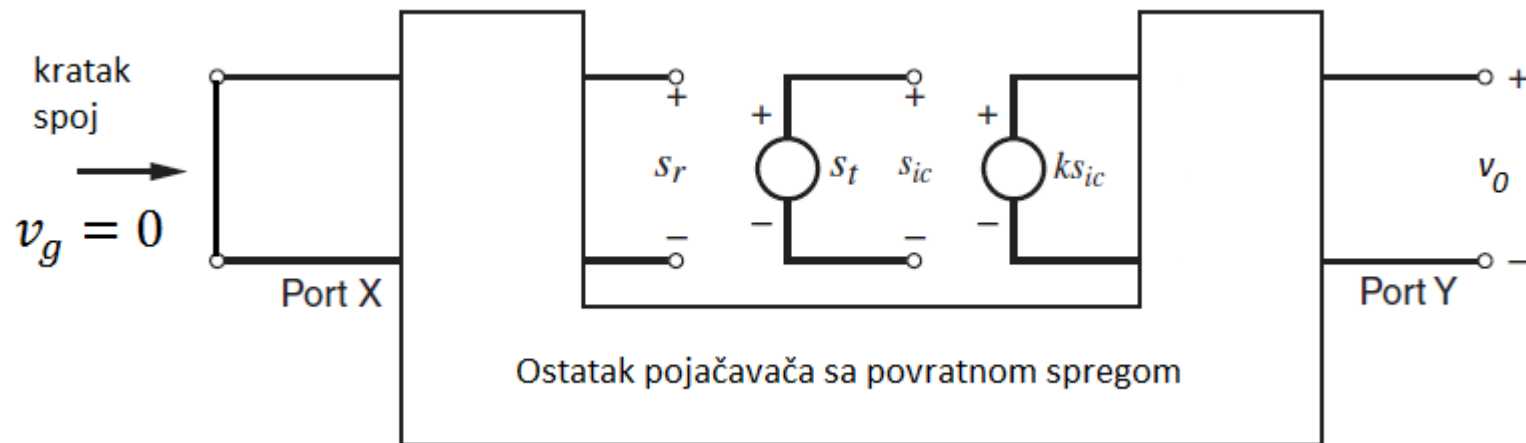
Pojačanje sa reakcijom se definiše kao:

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

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

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

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:

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

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

Osnovi analogne elektronike

IV semestar

NEGATIVNA POVRATNA SPREGA