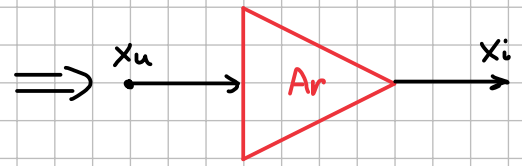
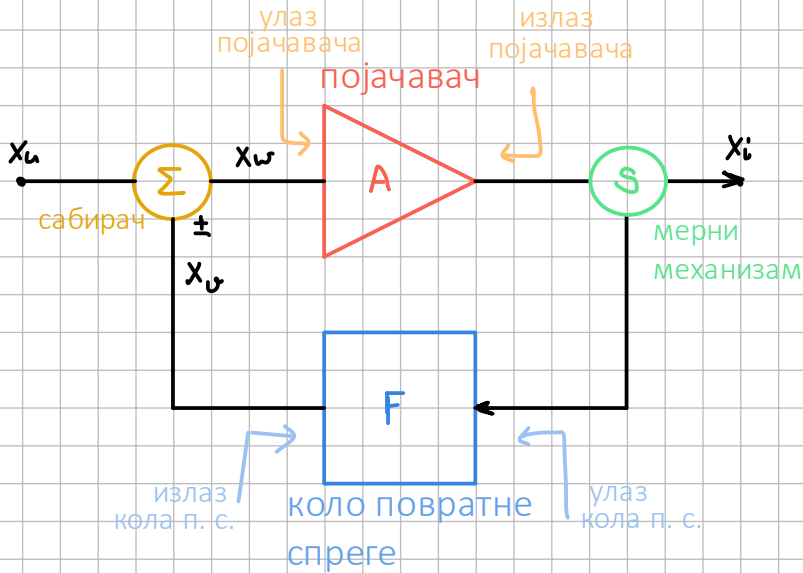


Повратна спрега



(величине означене са "x" могу бити напони или струје)

$$A_r = \frac{x_i}{x_u} = ?$$

$$x_i = A \cdot x_w$$

$$x_v = F \cdot x_i = AF \cdot x_w$$

$$x_w = x_u \pm x_v = x_u \pm AF \cdot x_w$$

$$x_w \mp AFx_w = x_u$$

$$\Rightarrow x_w = \frac{x_u}{1 \mp AF} \Rightarrow x_i = \frac{A}{1 \mp AF} \cdot x_u$$

$$\Rightarrow A_r = \frac{A}{1 \mp AF} \quad |AF| \gg 1 \Rightarrow A_r \approx \pm \frac{1}{F}$$

Предзнак "+": Негативна повратна спрега

Предзнак "-": Позитивна повратна спрега

A_r - појачање у затвореној петљи
(појачање са реакцијом)

A - појачање у отвореној петљи
(појачање без реакције)

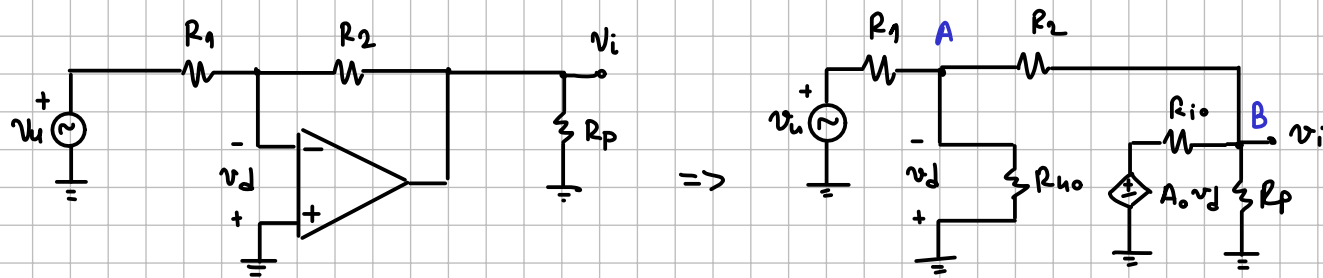
F - фактор повратне спреге

AF - кружно појачање

$1 \pm AF$ - функција реакције

Кола појачавача са повратном спрегом имају нису једноставна за анализу као класични транзисторски појачавачи, пошто између улаза и излаза имамо (најмање) две путање. Самим тим, није могуће наћи "ланцац" напона и струја којим бисмо могли повезати излазни напон, па морамо користити метод потенцијала чворова.

Пример - реални инвертујући појачавач:



$$A: \frac{-v_d - v_u}{R_1} + \frac{-v_d - v_i}{R_2} + \frac{-v_d}{R_{o0}} = 0$$

$$B: \frac{v_i - (-v_d)}{R_2} + \frac{v_i - A_o v_d}{R_{i0}} + \frac{v_i}{R_p} = 0$$

$$A: \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{o0}} \right) \cdot v_d + \frac{v_i}{R_2} = -\frac{v_u}{R_1}$$

$$B: \left(\frac{1}{R_2} - \frac{A_o}{R_{i0}} \right) v_d + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{i0}} + \frac{1}{R_p} \right) v_i = 0$$

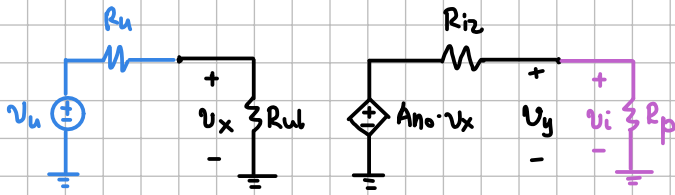
• • •

И најједноставнија кола могу дати гломазне системе једначина при чијем решавању се често поткрадају грешке.

Постоји метод којим се коло повратна спрега може раскинути и тиме би се једна путања уклонила што олакшава налажење "ланцац". Добијено коло назива се "коло са отвореном петљом", а полазно коло пре раскидања је "коло са затвореном петљом".

Основне топологије појачавача

Појачавач напона



$$A = \frac{v_i}{v_u} \left[\frac{V}{V} \right]$$

идеално:

реално:

$$R_{ul} \rightarrow \infty$$

$$R_{iz} \rightarrow 0$$

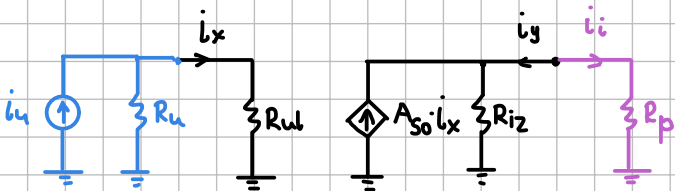
$$R_{ul} \gg$$

$$R_{iz} \ll$$

$$A = A_{n0}$$

$$A = A_{n0} \cdot \frac{R_p}{R_{iz} + R_p} \cdot \frac{R_{ul}}{R_u + R_{ul}}$$

Појачавач струје



$$A = \frac{i_i}{i_u} \left[\frac{A}{A} \right]$$

идеално:

реално:

$$R_{ul} \rightarrow 0$$

$$R_{iz} \rightarrow \infty$$

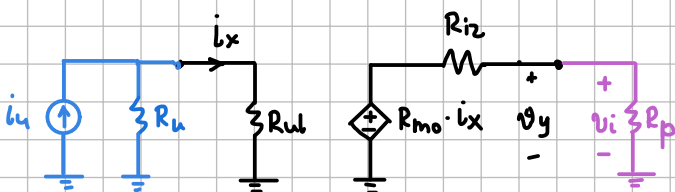
$$R_{ul} \ll$$

$$R_{iz} \gg$$

$$A = A_{s0}$$

$$A = A_{s0} \cdot \frac{R_{iz}}{R_{iz} + R_p} \cdot \frac{R_u}{R_u + R_{ul}}$$

Трансрезистансни појачавач



$$A = \frac{v_i}{i_u} \left[\Omega \right]$$

идеално:

реално:

$$R_{ul} \rightarrow 0$$

$$R_{iz} \rightarrow 0$$

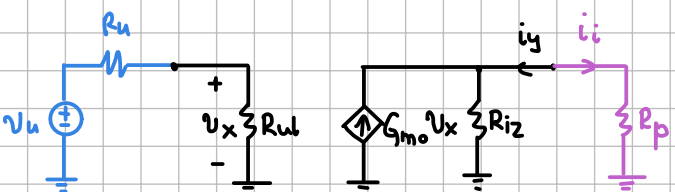
$$R_{ul} \ll$$

$$R_{iz} \ll$$

$$A = R_{m0}$$

$$A = R_{m0} \cdot \frac{R_p}{R_{iz} + R_p} \cdot \frac{R_u}{R_u + R_{ul}}$$

Транскондуктансни појачавач



$$A = \frac{i_i}{v_u} \left[S \right]$$

идеално:

реално:

$$R_{ul} \rightarrow \infty$$

$$R_{iz} \rightarrow \infty$$

$$R_{ul} \gg$$

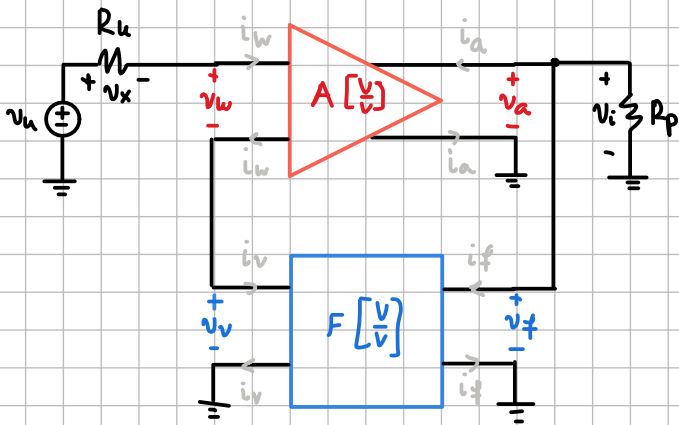
$$R_{iz} \gg$$

$$A = G_{m0}$$

$$A = G_{m0} \cdot \frac{R_{iz}}{R_{iz} + R_p} \cdot \frac{R_{ul}}{R_u + R_{ul}}$$

Типови повратне спреге

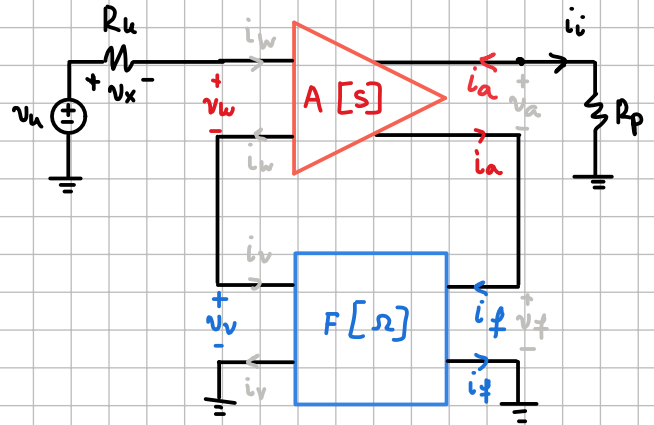
редно-напонска



$$v_w = v_u - v_x - v_v \quad \text{- редна спрега}$$

$$v_f = v_a = v_i \quad \text{- напонска спрега}$$

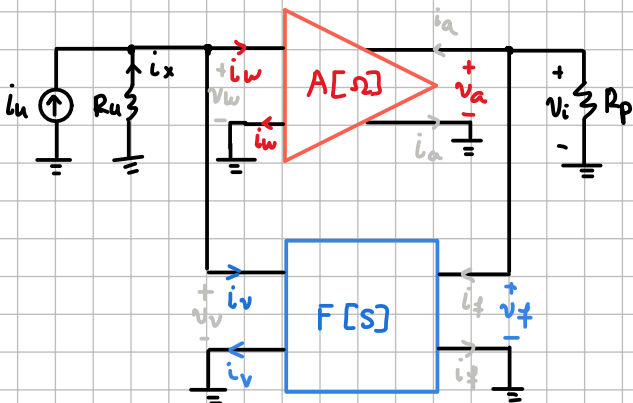
редно-струјна



$$v_w = v_u - v_x - v_v \quad \text{- редна спрега}$$

$$i_f = i_a = -i_i \quad \text{- струјна спрега}$$

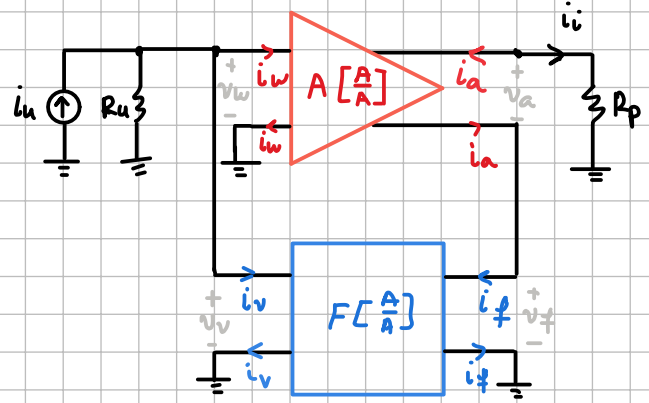
паралелно-напонска



$$i_w = i_u + i_x - i_v \quad \text{- паралелна спрега}$$

$$v_f = v_a = v_i \quad \text{- напонска спрега}$$

паралелно-струјна



$$i_w = i_u + i_x - i_v \quad \text{- паралелна спрега}$$

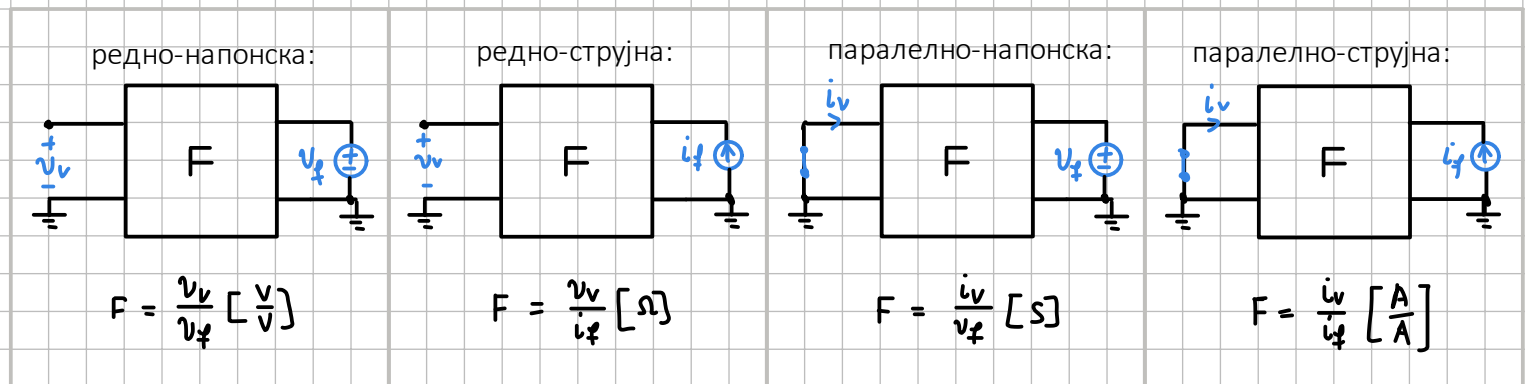
$$i_f = i_a = -i_i \quad \text{- струјна спрега}$$

Одређивање типа повратне спреге:

- Спрега је редна ако је излаз кола повратне спреге "редно" везан за улаз кола појачавача. Величина која се доставља суматору је напон. Може се уочити контура којој припадају улазна напонска побуда, враћени напон (тј. напон на излазу п.с. - v_v) и напон на суматору (v_w)
- Спрега је паралелна ако је излаз кола повратне спреге "паралелно" везан за улаз кола појачавача. Величина која се доставља суматору је струја. Може се уочити чвор у ком се састају улазна струјна побуда, враћена струја (тј. струја на излазу п.с. - i_v) и струја суматора (i_w)
- Спрега је напонска ако излаз појачавача, улаз кола повратне спреге и потрошач деле исти напон, тј. везани су "паралелно" ($v_f = v_a = v_i$). Величина која се узима са излаза је напон.
- Спрега је струјна ако кроз излаз појачавача, потрошач и улаз кола повратне спреге тече иста струја, тј. везани су "редно" ($i_f = i_a = i_i$). Величина која се узима са излаза је струја.

Анализа кола са повратном спрегом:

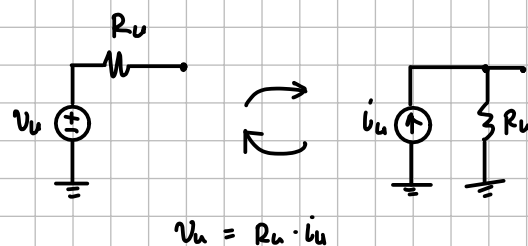
- Утврдимо са шеме (визуелно) шта чини коло појачавача, шта чини коло повратне спреге и који елемент се користи као суматор.
- Утврдимо са шеме (такође визуелно) који од четири типа повратне спреге се користи.
- У зависности од типа повратне спреге, одређујемо фактор повратне спреге F :



- Према типу спреге и типу преносне функције кола повратне спреге одређујемо и тип топологије појачавача:

- редно-напонска -> напонски појачавач
- редно-струјна -> транскондуктансни појачавач
- паралелно-напонска -> трансимпедансни појачавач
- паралелно-струјна -> струјни појачавач

- Потребно је видети да ли улазна побуда одговара типу појачавача. Ако су улазна и враћена величина напони (напонски и транскондуктансни појачавач, односно редна спрега) онда генератор на улазу мора бити напонски. Ако су улазна и враћена величина струје (струјни и трансимпедансни појачавач, односно паралелна спрега) генератор на улазу мора бити струјни. У случају да побуда није одговарајућа, потребно је да улазни генератор трансформишемо у еквивалентни струјни или напонски у зависности од случаја.



- Формирамо еквивалентно коло без реакције (без утицаја повратне спреге) према правилима датим у табели на наредној страни. Коло се формира испитивањем утицаја кола повратне спреге на улаз и излаз појачавача. Утицај тј. оптерећење се моделује тако што направимо две "копије" кола повратне спреге, један крај сваке од копија вежемо за улаз, односно излаз појачавача, а други крај остављамо отвореним или краткоспојамо у зависности од тога како спрега оптерећује улаз/излаз појачавача (односно, у зависности од типа спреге). Ако је спрега везана паралелно за неки улаз/излаз, оптерећење улаза/излаз се смањује, па ову копију краткоспајамо на другом крају. Ако је спрега везана редно, оптерећење се повећава и то моделујемо отвореном везом на другом крају копије.

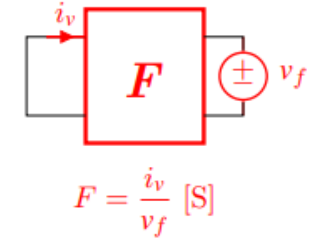
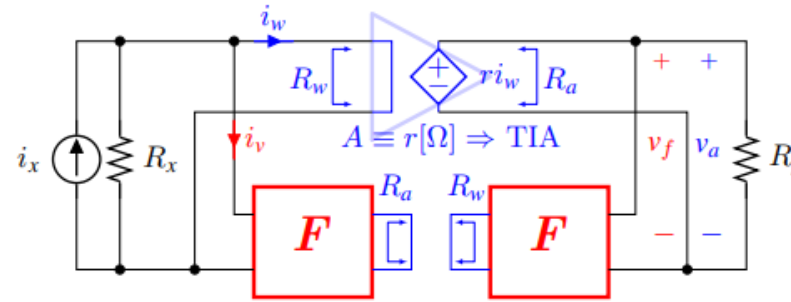
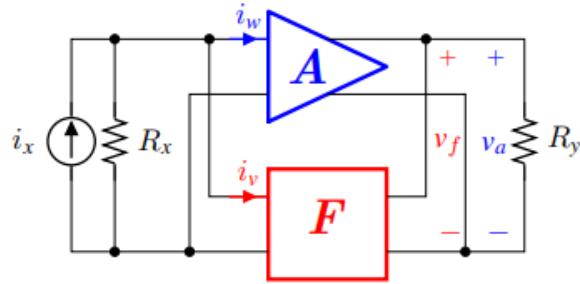
Tip

Topologija

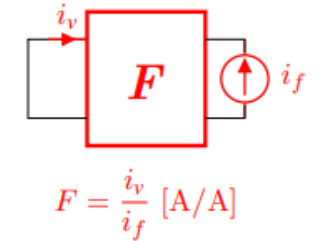
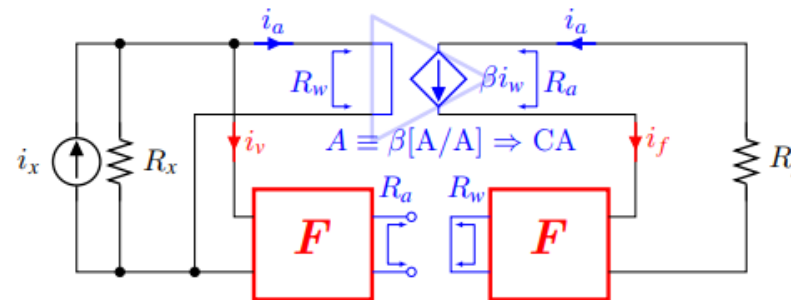
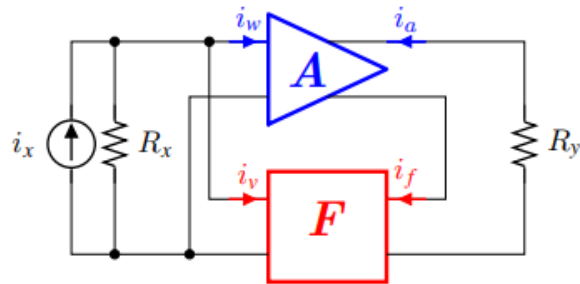
“Otvorena” petlja

Koeficijent povratne sprege

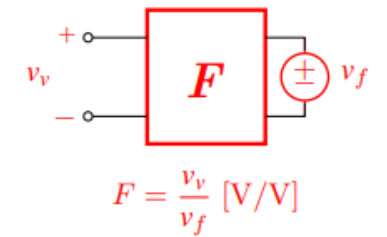
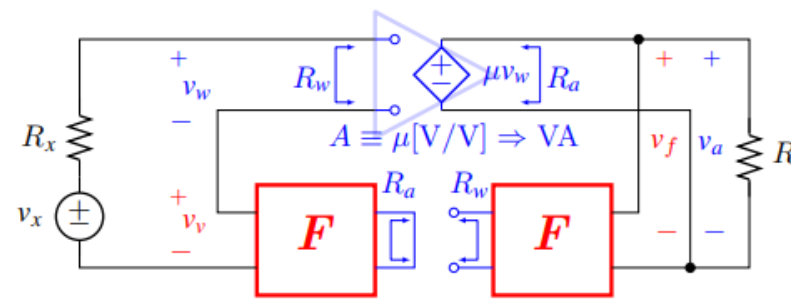
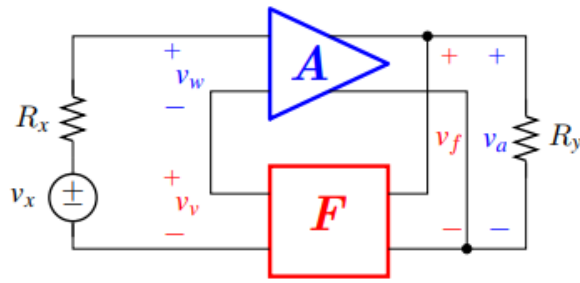
Paralelno-Naponska
Trans-Impedance
Amplifier



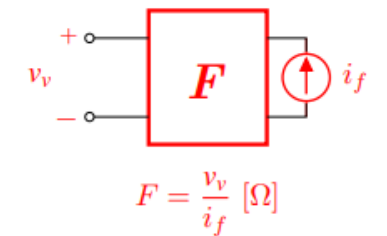
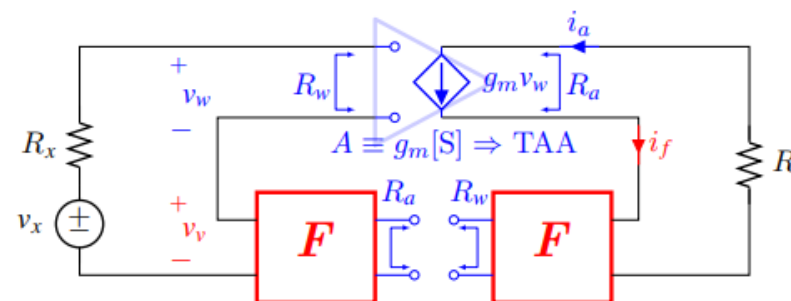
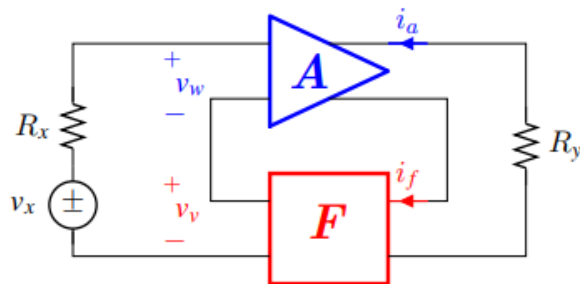
Paralelno-Strujna
Current
Amplifier



Redno-Naponska
Voltage
Amplifier



Redno-Strujna
Trans-Admittance
Amplifier



- Појачање у отвореној петљи потом налазимо класичном анализом кола за мале сигнале и налажењем односа одговарајућих величина.
- Када нађемо појачање у отвореној петљи и коефицијент повратне спреге, лако налазимо појачање у затвореној петљи применом већ изведене формуле. Пошто се бавимо само колима са негативном повратном спрегом, предзнак ће увек бити "+":

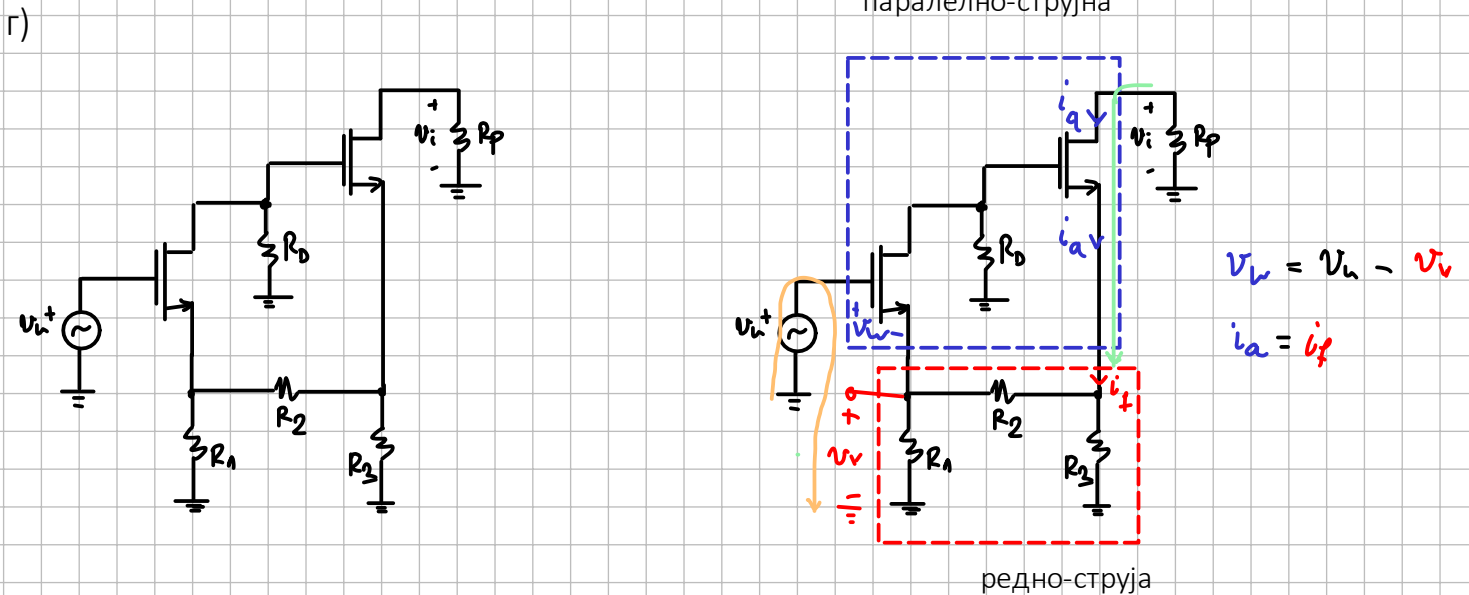
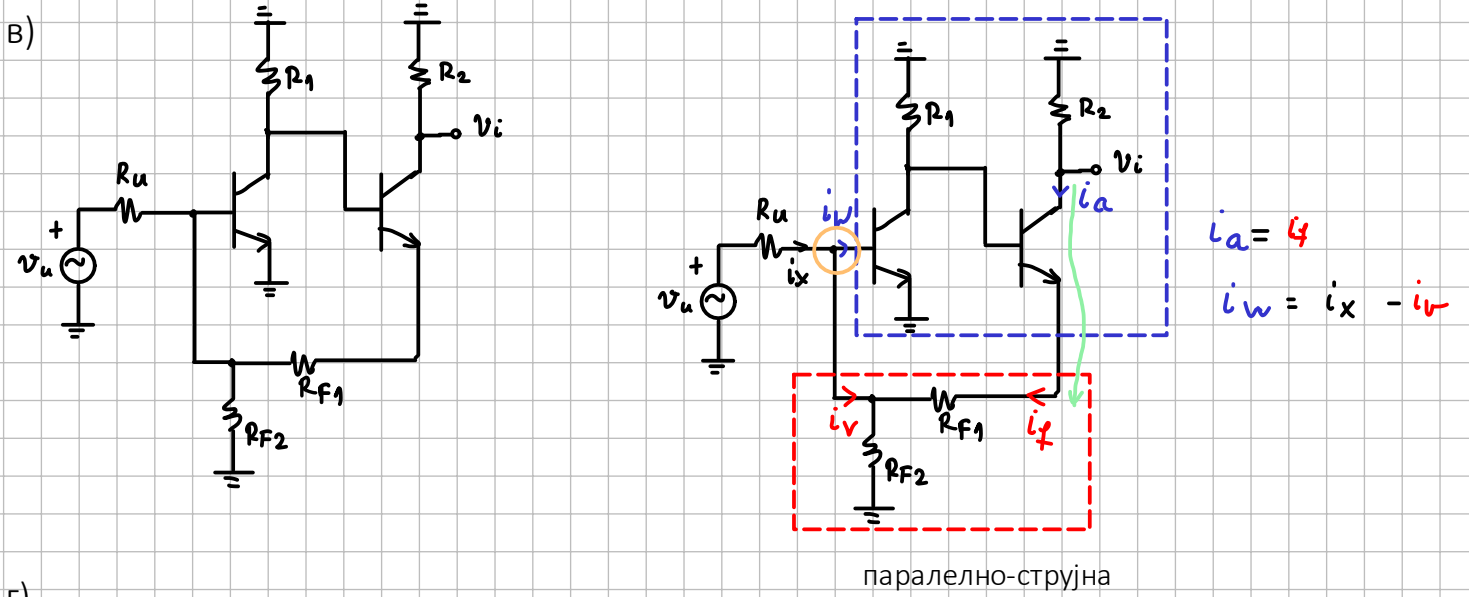
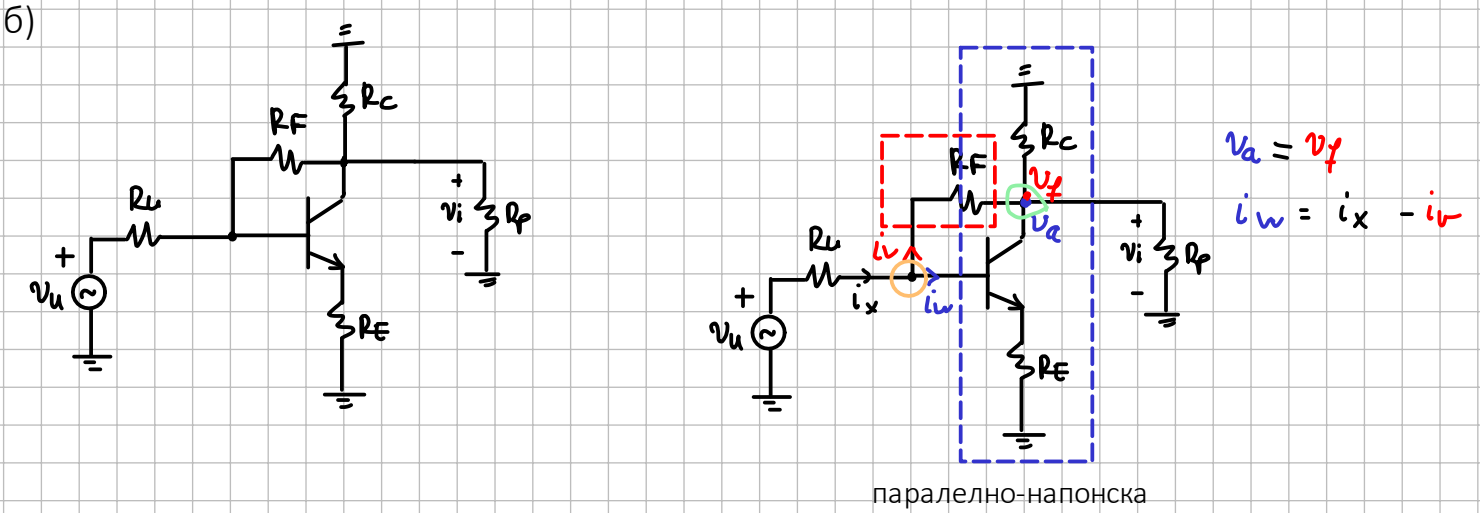
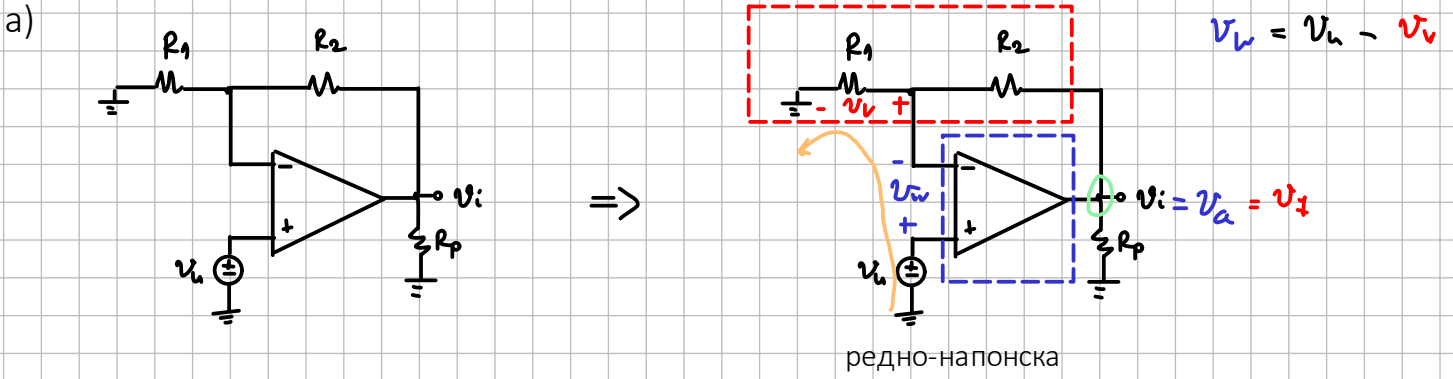
$$A_v = \frac{A}{1 + AF}$$

- Фактор $1 + AF$ има утицај на многе карактеристике појачавача са повратном и можемо га искористити за налажење улазне и излазне отпорности кола у затвореној петљи. Прво за коло без реакције одређујемо улазну и излазну отпорност на класичан начин (тестним генератором или пресликавањима импеданси) а потом добијене отпорности множимо или делимо фактором $1 + AF$ да бисмо добили улазну и излазну отпорност кола са реакцијом. Да ли множимо или делимо зависи од типа спреге. Повратна спрега увек побољшава отпорности-велике отпорности се увећавају (множе се), а мале се умањују (деле се).

тип спреге	R_{ulv}	R_{izv}
редно-напонска	$(1 + AF) R_{ul}$	$\frac{R_{iz}}{1 + AF}$
редно-струјна	$(1 + AF) R_{ul}$	$(1 + AF) R_{iz}$
паралелно-напонска	$\frac{R_{ul}}{1 + AF}$	$\frac{R_{iz}}{1 + AF}$
паралелно-струјна	$\frac{R_{ul}}{1 + AF}$	$(1 + AF) R_{iz}$

- Повратна спрега увек позитивно утиче на улазну и излазну отпорност са реакцијом, нпр. у колима где је идеално да улазна отпорност буде велика, повратна спрега ће повећати улазну отпорност за фактор $1 + AF$, и обрнуто.

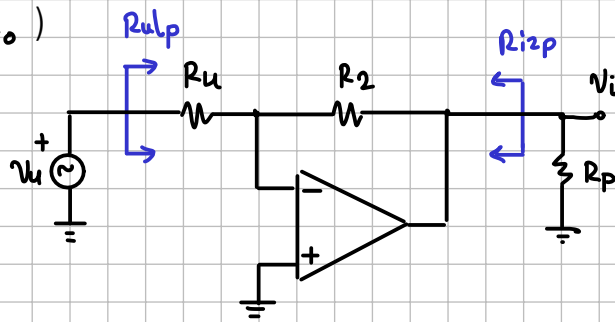
1. Одредити тип повратне спреге употребљене у следећим појавачавима:
(дате су шеме за мале сигнале)



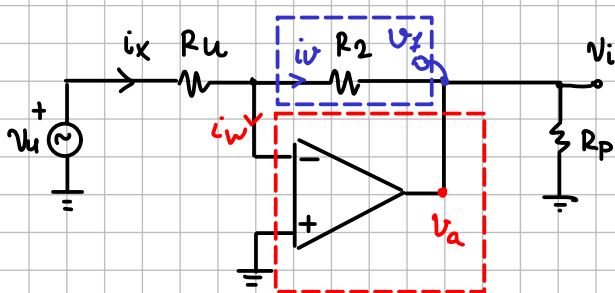
2. Инвертујући појачавач је имплементиран помоћу реалног ОП (коначне вредности R_{u0}, R_{i0}, A_0)

Одредити:

- а) Тип повратне спреге
- б) Фактор повратне спреге
- в) Појачање кола са отвореном петљом
- г) Појачање кола са затвореном петљом
- д) Улазну и излазну отпорност кола са отвореном петљом.



а)



паралелно-напонска спрега

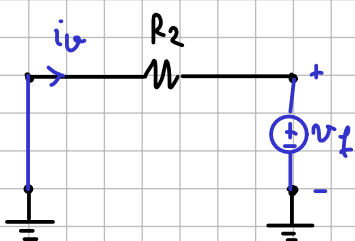
$$i_w = i_x - i_v \quad v_a = v_f$$

Коло повратне спреге - транскондуктанса

Појачавач - трасрезистансни

у идеалном случају $\Rightarrow R_{ul} \rightarrow 0 \quad R_{iz} \rightarrow 0$

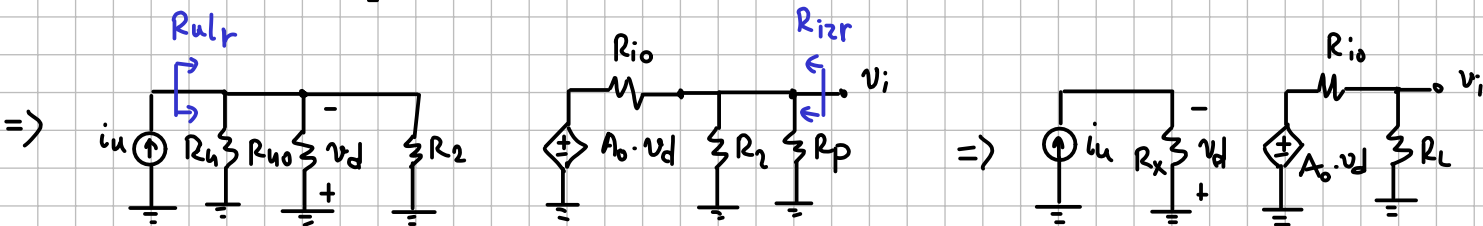
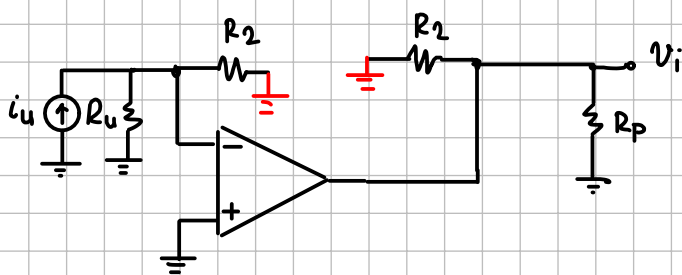
б)



$$F = \frac{v_f}{v_a} = -\frac{1}{R_2} = \dots$$

в)

Коло без реакције:



$$A = \frac{v_i}{i_u} = \frac{v_i}{A_0 \cdot v_d} \cdot A_0 \cdot \frac{v_d}{i_u} = \frac{R_L}{R_{i0} + R_L} \cdot A_0 \cdot (-R_x) = \dots$$

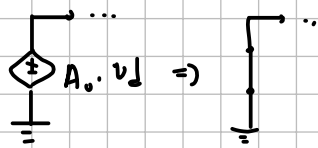
$$R_x = R_{u0} \parallel R_{u0} \parallel R_2 = \dots$$

$$R_L = R_2 \parallel R_p = \dots$$

i)

$$A_r = \frac{A}{1 + AF} = \dots$$

g) $R_{ulr} = R_u \parallel R_2 \parallel R_{uo} = \dots$

$R_{izr} \rightarrow i_u = 0 \Rightarrow v_d = 0 \Rightarrow$  $\Rightarrow R_{izr} = R_p \parallel R_{io} \parallel R_2 = \dots$

$$R_{ulp} = \frac{R_{ulr}}{1 + AF} = \dots \quad R_{izp}' = \frac{R_{izr}}{1 + AF} = \dots$$

R_{izp} не укључује R_p , док га R_{izp}' укључује.

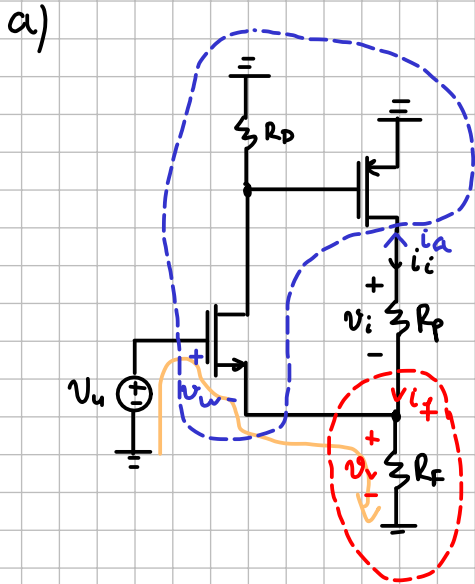
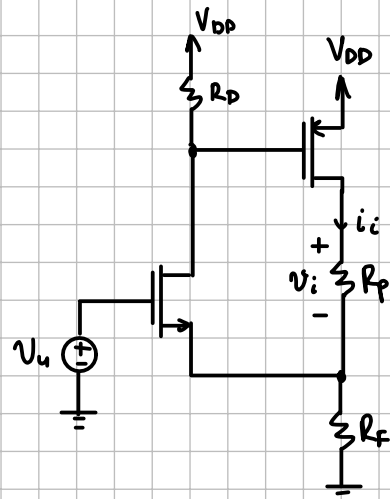
$$R_{izp}' = R_p \parallel R_{izr}$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{R_{izp}'} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_{izr}}$$

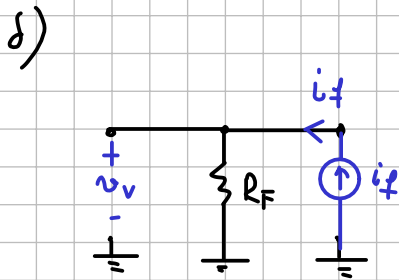
$$\frac{1}{R_{izr}} = \frac{1}{R_p} - \frac{1}{R_{izp}'} \Rightarrow R_{izr} = \frac{1}{\frac{1}{R_p} - \frac{1}{R_{izp}'}} = \dots$$

3. За дато коло појачвача са негативном повратном спрегом одредити: ($V_A \rightarrow \infty$)

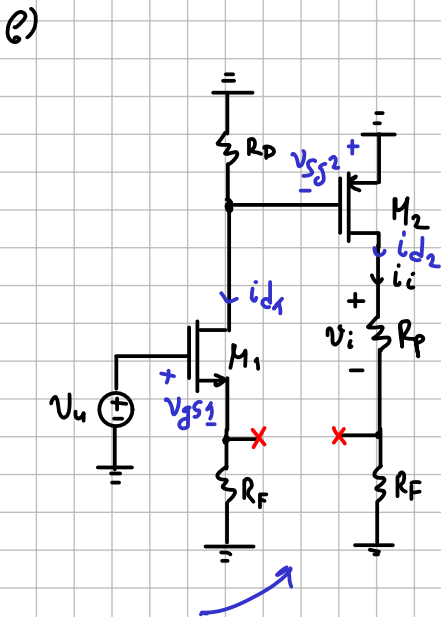
- а) Тип спреге
- б) Фактор спреге
- в) Појачање у отвореној и затвореној петљи



редно-струјна



$$F = \frac{v_f}{i_f} = R_F$$



$$A = \frac{i_o}{v_u} = \frac{i_o}{v_{gs2}} \cdot \frac{v_{gs2}}{i_{d1}} \cdot \frac{i_{d1}}{v_{gs1}} \cdot \frac{v_{gs1}}{v_u}$$

$$v_u = v_{gs1} + R_F \cdot g_{m1} \cdot v_{gs1} \Rightarrow \frac{v_{gs1}}{v_u} = \frac{1}{1 + g_{m1} R_F}$$

$$A = g_{m2} \cdot (-R_D) \cdot g_{m1} \cdot \frac{1}{1 + g_{m1} R_F}$$

транскондуктансни појачавач
($R_{u1} \rightarrow \infty, R_{i2} \rightarrow \infty$)

г)

$$A_n = \frac{A}{1 + AF} = \dots$$

$$A_{nr} = \frac{v_i}{v_u} = \frac{v_i}{i_i} \cdot \frac{i_i}{v_u} = \frac{v_i}{i_i} \cdot A_n = R_F \cdot A_n = \dots$$

За вежбу:

- Задаци из приручника (15.3. Анализа кола са повратном спрегом, страна 153-157)
- II колоквијум 2016/17. модул ТЕЛ, задатак 3.
- Септембар 2017/18. модул УС, задатак 1.