

Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za elektroniku, mikroelektroniku,
računalne i inteligentne sustave

Elektronika 2

Željko Butković

5. Pojačala s povratnom vezom

Povratna veza

U sustavu s povratnom vezom → informacija ili signal vraća s izlaza na ulaz, gdje se uspoređuje s ulaznom veličinom

Povratna veza omogućuje regulaciju sustava

Sustavi s povratnom vezom prisutni su u tehnici, ali i u drugim područjima poput fizike, ekonomije biologije i sl

Povratna veza → pozitivna ili negativna.

- ❑ negativna povratna veza → smanjuje izlazni signal

- ❑ pozitivna povratna veza → povećava izlazni signal

U elektronici se primjenjuju obje vrste povratne veze

Negativna povratna veza u pojačalima

U pojačalima → negativna povratna veza → smanjuje izlazni signal i pojačanje pojačala, ali osigurava niz poboljšanja:

- ❑ stabilizira pojačanje, tj. čini ga neosjetljivijim na promjene parametra sklopa i radnih uvjeta, kao što je npr. promjena temperature,
- ❑ smanjuje nelinearna izobličenja, čime se postiže bolja linearnost pojačala,
- ❑ povećava širinu frekvencijskog pojasa pojačala,
- ❑ djeluje na ulaznu i izlaznu impedanciju sklopa, čime se stvarna pojačala mogu približiti karakteristikama idealnih pojačala.

Primjer pojačala s povratnom vezom

Pojačalo u spoju zajedničkog emitera s emitterskom degeneracijom

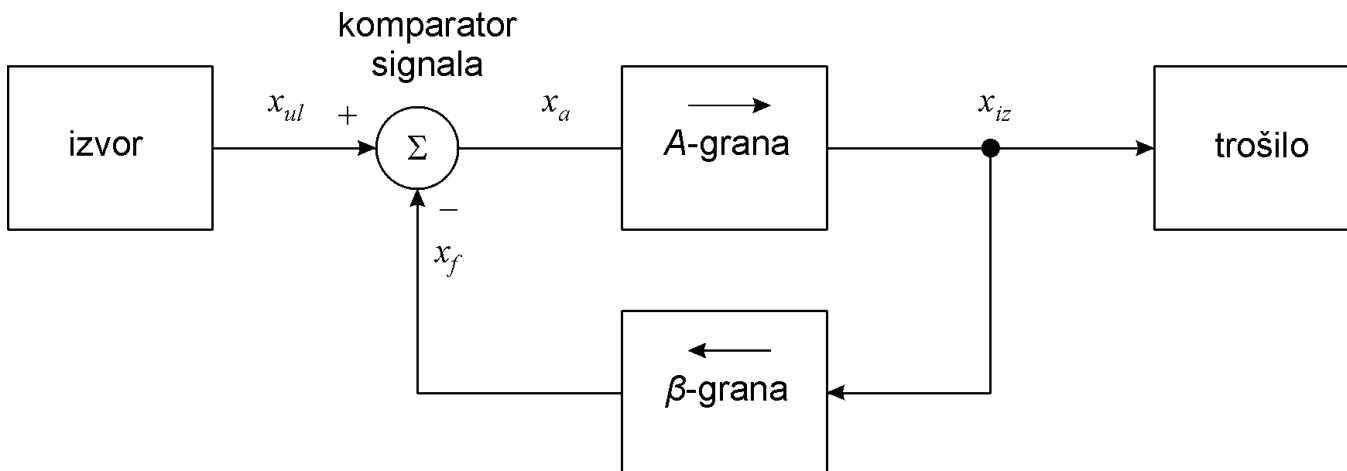
Preko otpornika R_E dio izlaznog signala vraća se na ulaz

Naponsko pojačanje

$$A_V \approx - \frac{R_C \parallel R_T}{R_E}$$

Pojačanje se po iznosu smanjuje u odnosu na pojačanje pojačala bez degeneracije, ali postaje stabilnije, jer ne ovisi o parametrima tranzistora, čije se vrijednosti rasipaju i podložne su temperaturnoj promjeni.

Struktura pojačala s povratnom vezom (1)



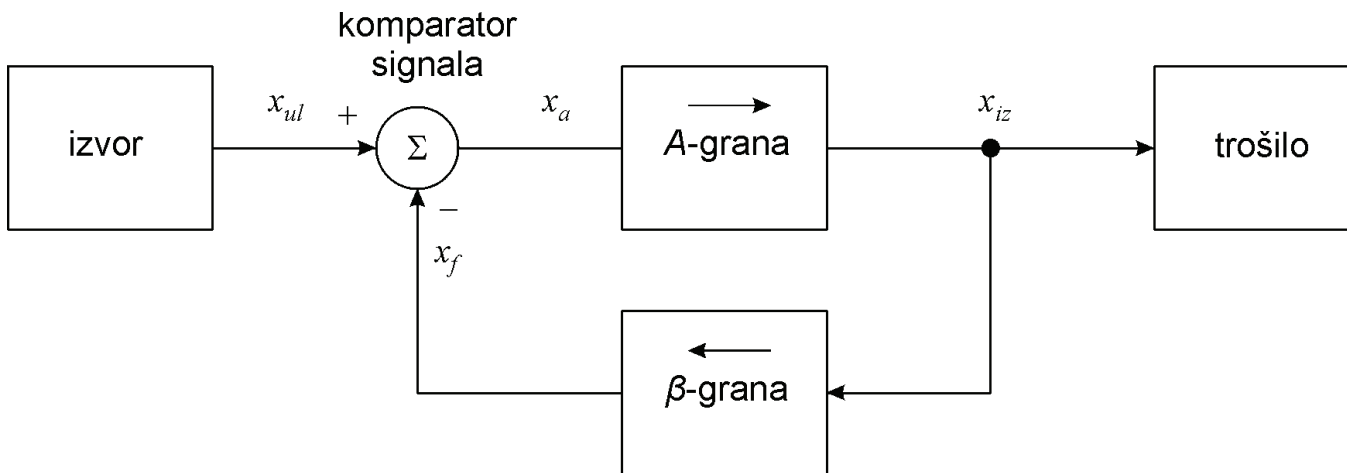
A-grana \rightarrow osnovno pojačalo bez povratne veze

pojačanje A-grane $\rightarrow A = x_{iz}/x_a$

β -grana \rightarrow grana povratne veze

koeficijent povratne veze $\rightarrow \beta = x_f/x_{iz}$

Struktura pojačala s povratnom vezom (2)



$x_{iz} \rightarrow$ **uzorak**, $x_f \rightarrow$ **povratni signal**

komparator signala $\rightarrow x_a = x_{ul} - x_f$

pojaćanje pojačala s povratnom vezom $\rightarrow A_f = \frac{x_{iz}}{x_{ul}} = \frac{A}{1 + \beta A}$

$\beta A \rightarrow$ **pojaćanje u petlji povratne veze**

$F = 1 + \beta A \rightarrow$ **faktor povratne veze**

Stabilizacija pojačanja

Promjena pojačanja A osnovnog pojačala izaziva manju promjenu pojačanja A_f pojačala s povratnom vezom.

$$d A_f = \frac{d A}{(1 + \beta A)^2} \rightarrow \frac{d A_f}{A_f} = \frac{1}{1 + \beta A} \frac{d A}{A} = \frac{1}{F} \frac{d A}{A}$$

Primjer 5.1

U pojačalu s povratnom vezom pojačanje osnovnog pojačala $A = 10^4$, a koeficijent povratne veze $\beta = 0,01$. Kolika će biti relativna promjena pojačanja A_f pojačala s povratnom vezom, ako se pojačanje osnovnog pojačala A smanji za 20%?

Linearizacija prijenosne karakteristike pojačala

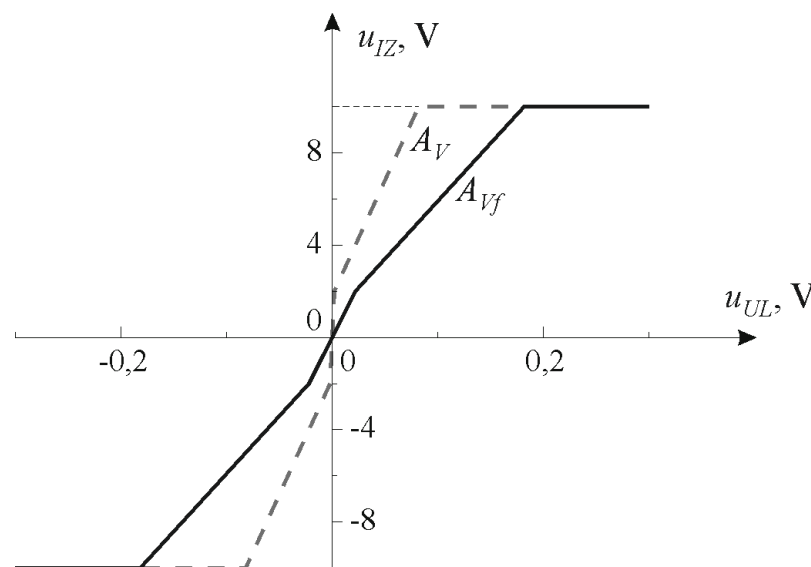
Primjer 5.2

Pojačalo radi s naponima napajanja $U_{PP} = 10 \text{ V}$ i $U_{NN} = -10 \text{ V}$. Prijenosna karakteristika naponskog pojačanja A_V pojačala bez povratne veze može se aproksimirati po odsječcima:

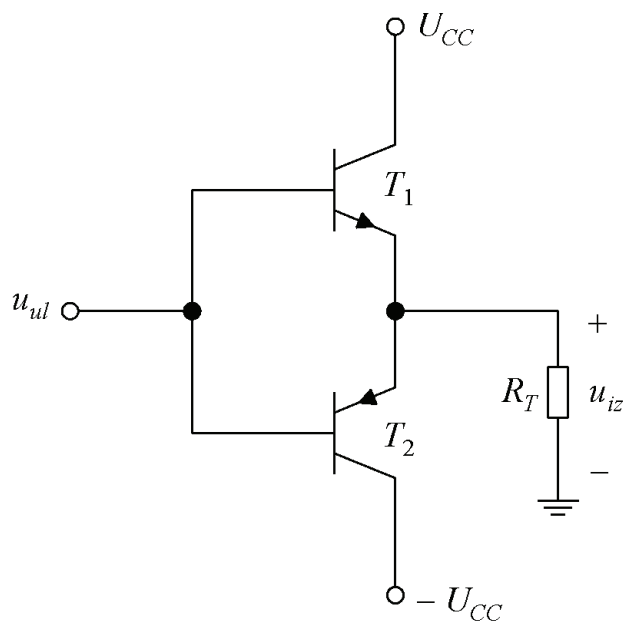
za $|u_{IZ}| < 2 \text{ V} \rightarrow A_{V1} = 1000$

za $2 \text{ V} < |u_{IZ}| < 10 \text{ V} \rightarrow A_{V1} = 100$.

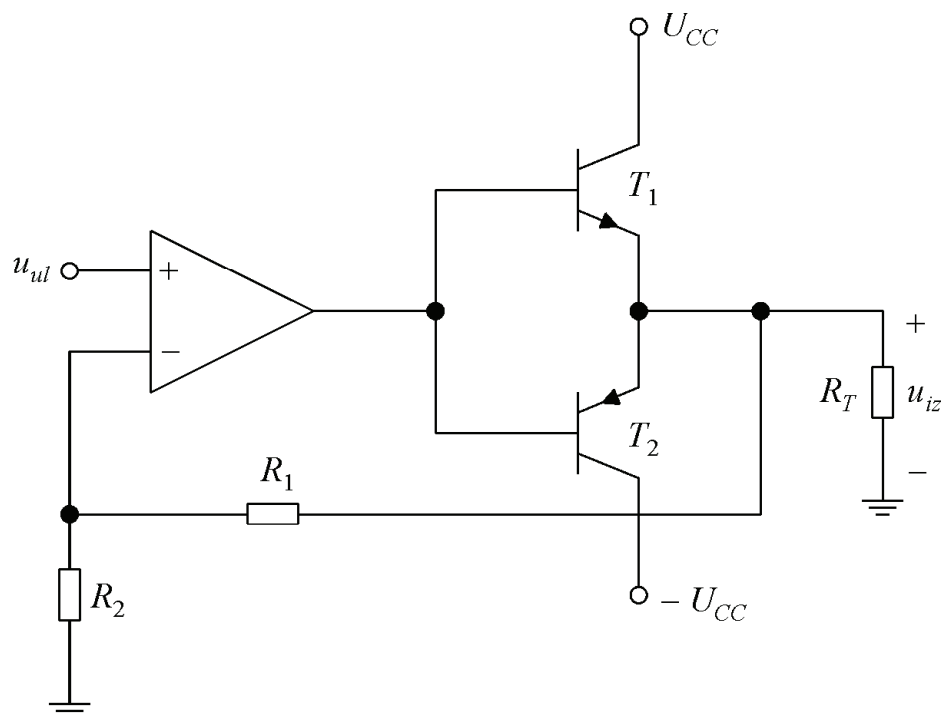
Odrediti prijenosnu karakteristiku naponskog pojačanja A_{Vf} pojačala s povratnom vezom koje kao osnovno pojačalo sadrži gore navedeno pojačalo i za koje je koeficijent povratne veze $\beta = 0,01$.



Linearizacija prijenosne karakteristike izlaznog pojačala (1)

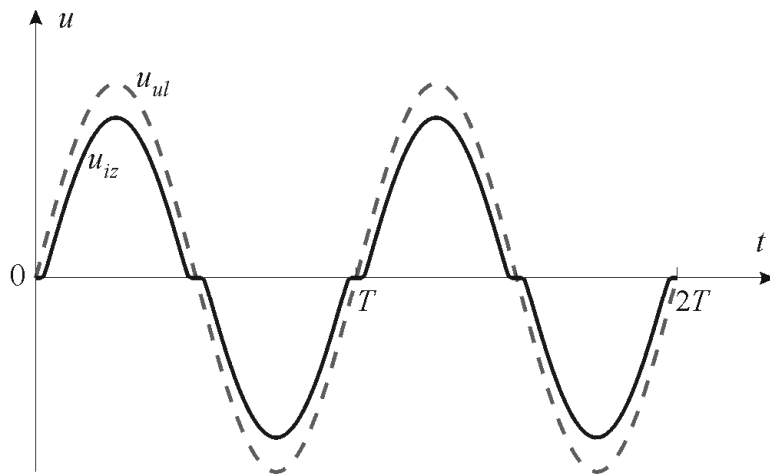


Izlazno protutaktno pojačalo klase B

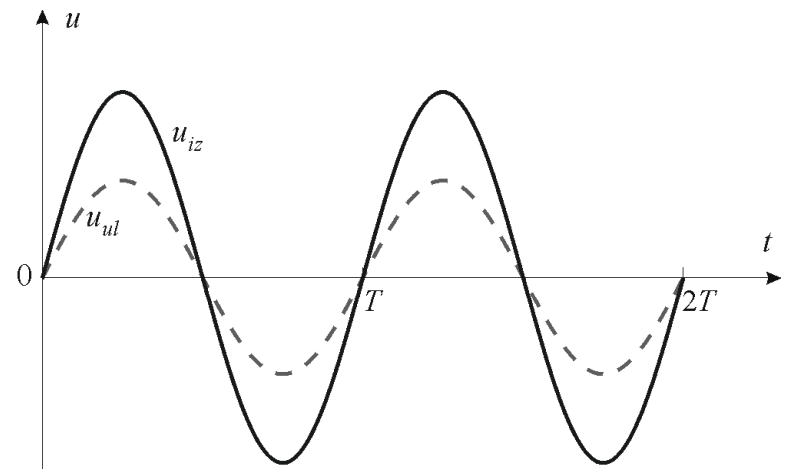


Uključenje povratne veze

Linearizacija prijenosne karakteristike izlaznog pojačala (2)



Izlazno protutaktno pojačalo klase B



Uključenje povratne veze

Proširenje frekvencijskog pojasa – visoke frekvencije

Frekvencijski odziv osnovnog pojačala i koeficijenta povratne veze

$$A(j\omega) = \frac{A_0}{1 + j\omega/\omega_g} \quad \beta = \beta_0 \neq f(j\omega)$$

Frekvencijski odziv pojačala s povratnom vezom

$$A_f(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 + \beta A(j\omega)} \rightarrow A_f(j\omega) = \frac{A_{0f}}{1 + j\omega/\omega_{gf}}$$

$$A_{0f} = \frac{A_0}{1 + \beta A_0} \quad \omega_{gf} = \omega_g (1 + \beta A_0)$$

$$A_{0f} \omega_{gf} = A_0 \omega_g$$

Proširenje frekvencijskog pojasa – niske frekvencije

Frekvencijski odziv osnovnog pojačala i koeficijenta povratne veze

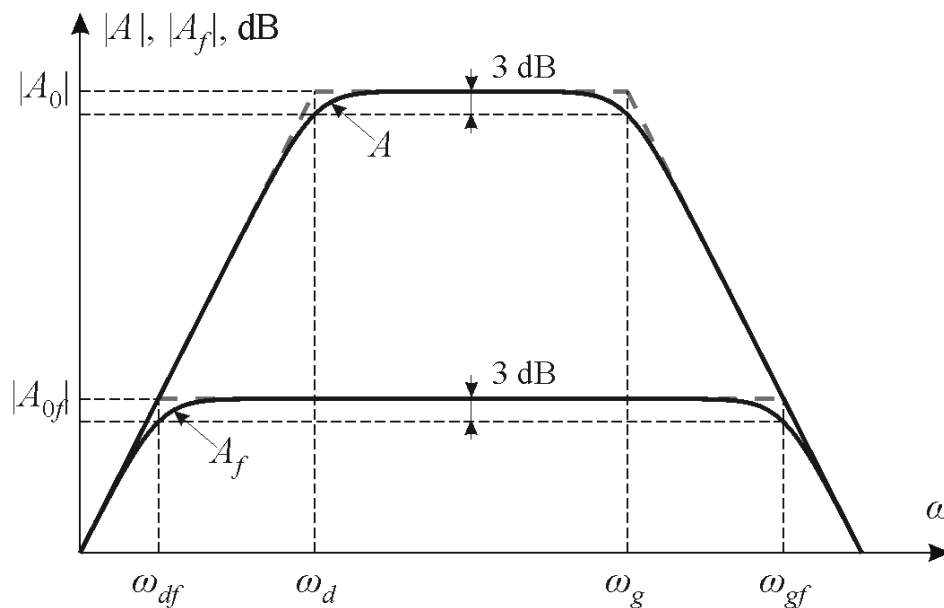
$$A(j\omega) = A_0 \frac{j\omega/\omega_d}{1 + j\omega/\omega_d} \quad \beta = \beta_0 \neq f(j\omega)$$

Frekvencijski odziv pojačala s povratnom vezom

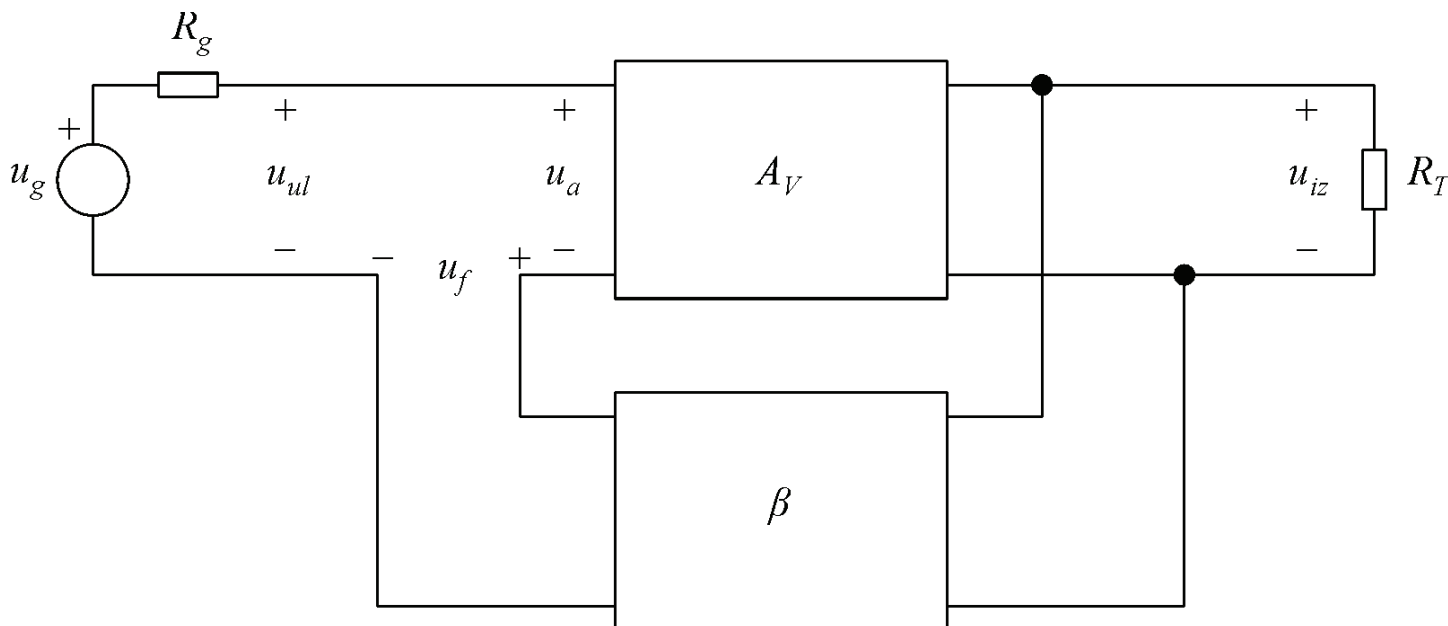
$$A_f(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 + \beta A(j\omega)} \rightarrow A_f(j\omega) = A_{0f} \frac{j\omega/\omega_{df}}{1 + j\omega/\omega_{df}}$$

$$A_{0f} = \frac{A_0}{1 + \beta A_0} \quad \omega_{df} = \frac{\omega_d}{1 + \beta A_0}$$

Proširenje frekvencijskog pojasa

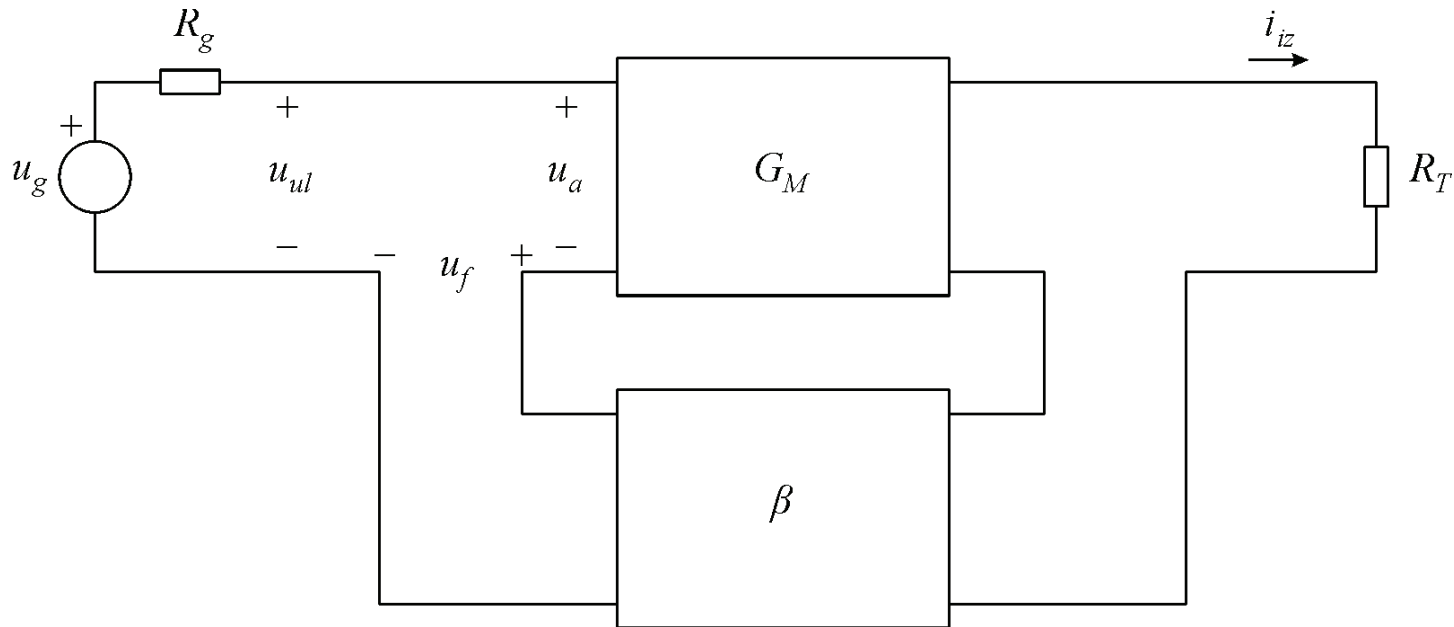


Naponska-serijska povratna veza



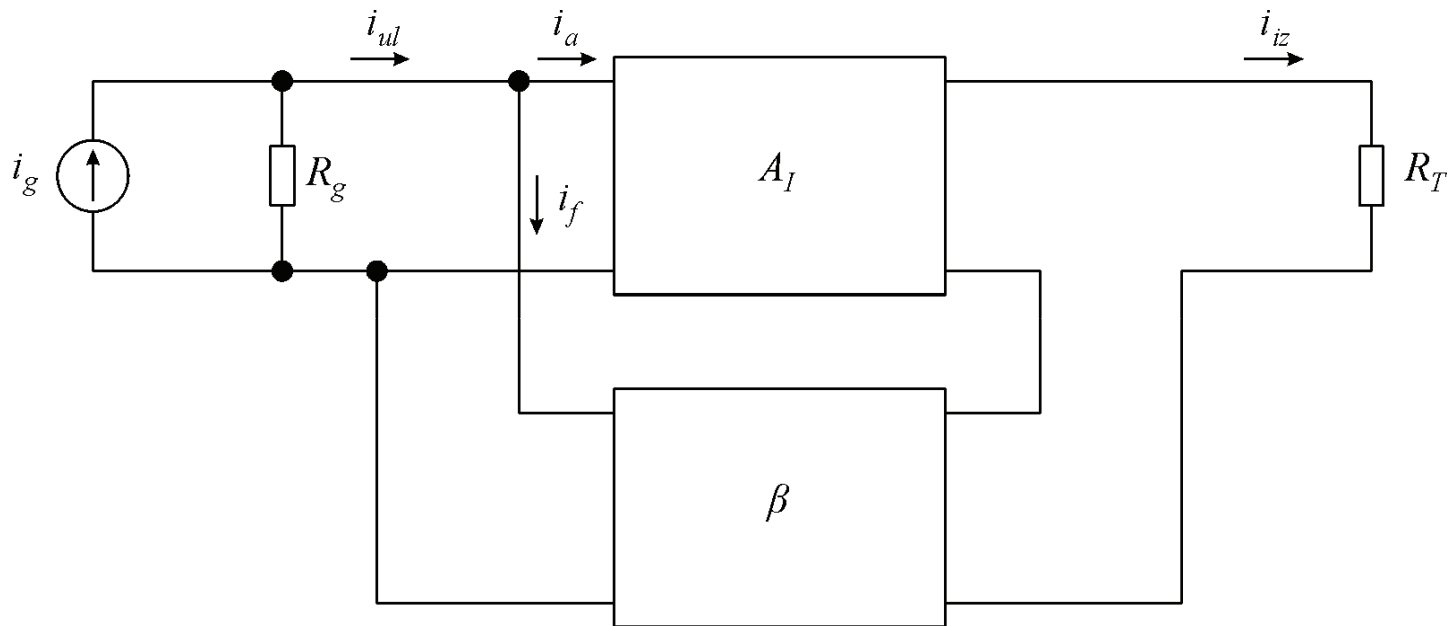
$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_a} \quad \beta = \frac{u_f}{u_{iz}} \quad u_a = u_{ul} - u_f \quad A_{Vf} = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{A_V}{1 + \beta A_V}$$

Strujna-serijska povratna veza



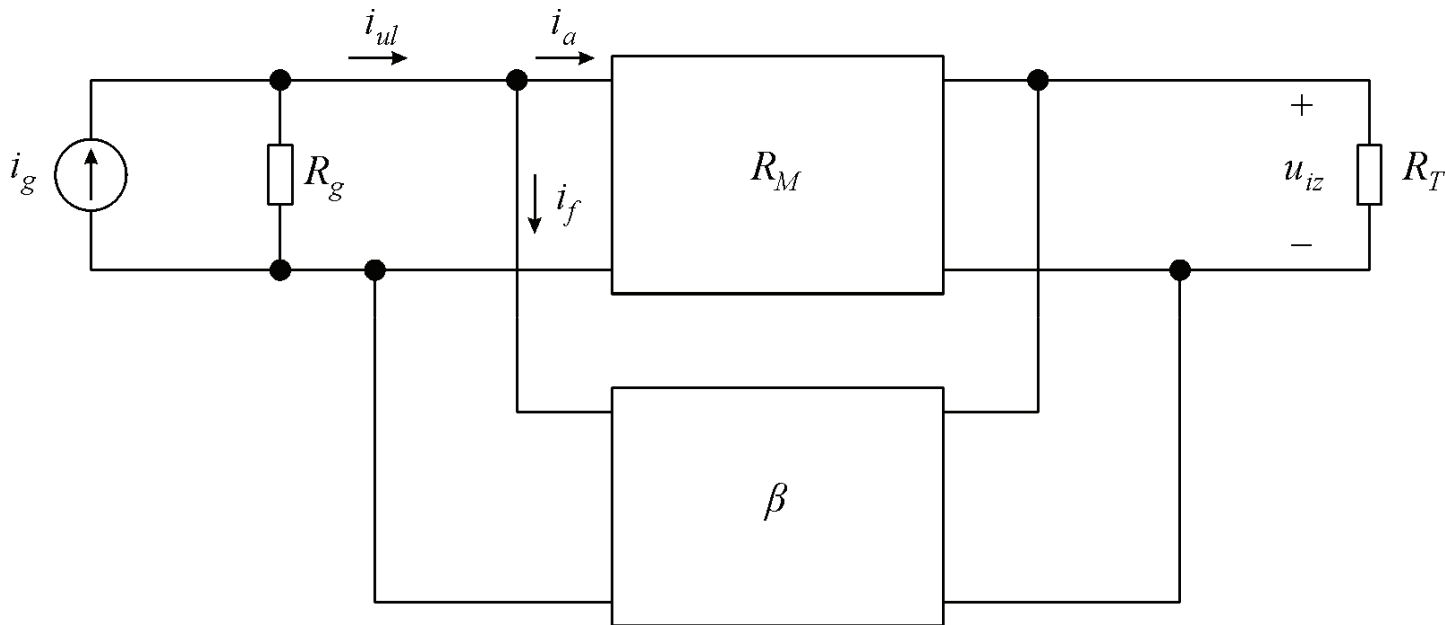
$$G_M = \frac{i_{iz}}{u_a} \quad \beta = \frac{u_f}{i_{iz}} \quad u_a = u_{ul} - u_f \quad G_{Mf} = \frac{i_{iz}}{u_{ul}} = \frac{G_M}{1 + \beta G_M}$$

Strujna-paralelna povratna veza



$$A_I = \frac{i_{iz}}{i_a} \quad \beta = \frac{i_f}{i_{iz}} \quad i_a = i_{ul} - i_f \quad A_{If} = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} = \frac{A_I}{1 + \beta A_I}$$

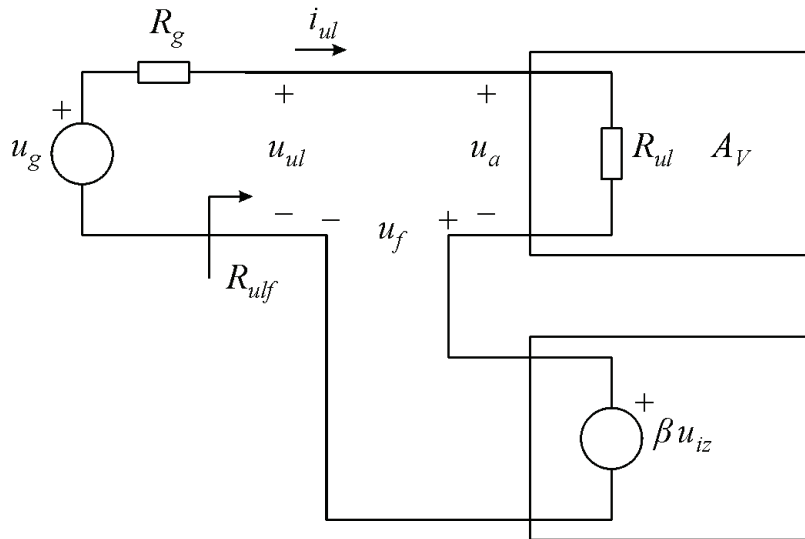
Naponska-paralelna povratna veza



$$R_M = \frac{u_{iz}}{i_a} \quad \beta = \frac{i_f}{u_{iz}} \quad i_a = i_{ul} - i_f \quad R_{Mf} = \frac{u_{iz}}{i_{ul}} = \frac{R_M}{1 + \beta R_M}$$

Utjecaj serijske povratne veze na ulazni otpor

Naponska-serijska povratna veza



$$R_{ul} = \frac{u_a}{i_{ul}} \quad u_f = \beta u_{iz}$$

$$R_{ulf} = \frac{u_{ul}}{i_{ul}} = \frac{u_{ul}}{u_a/R_{ul}} = R_{ul} \frac{u_a + u_f}{u_a} =$$

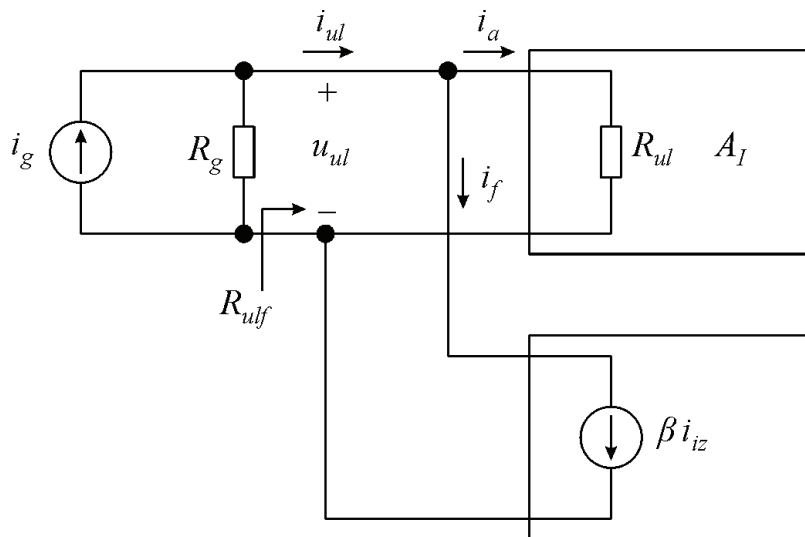
$$= R_{ul} \left(1 + \frac{u_f}{u_a} \frac{u_{iz}}{u_{iz}} \right) = R_{ul} (1 + \beta A_V)$$

Strujna-serijska povratna veza – $A_V \rightarrow G_M$, $u_f = \beta i_{iz}$

$$R_{ulf} = \frac{u_{ul}}{i_{ul}} = R_{ul} \left(1 + \frac{u_f}{i_{iz}} \frac{i_{iz}}{u_a} \right) = R_{ul} (1 + \beta G_M)$$

Utjecaj paralelne povratne veze na ulazni otpor

Strujna-paralelna povratna veza



$$R_{ul} = \frac{u_{ul}}{i_a} \quad i_f = \beta i_{iz}$$

$$\frac{1}{R_{ulf}} = \frac{i_{ul}}{u_{ul}} = \frac{i_{ul}}{R_{ul} i_a} = \frac{1}{R_{ul}} \frac{i_a + i_f}{i_a} =$$

$$= \frac{1}{R_{ul}} \left(1 + \frac{i_f}{i_a} \frac{i_{iz}}{i_a} \right) = \frac{1}{R_{ul}} (1 + \beta A_I)$$

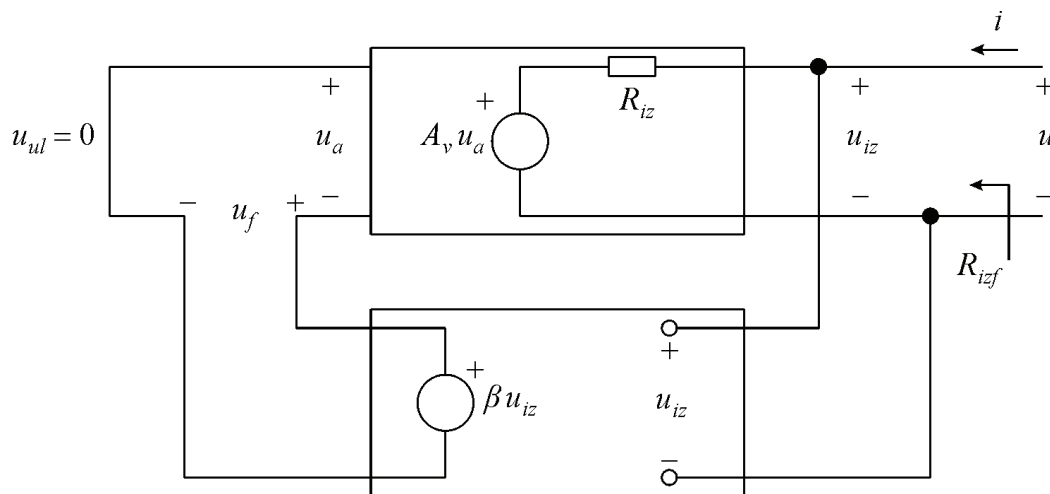
$$R_{ulf} = \frac{R_{ul}}{1 + \beta A_I}$$

Naponska-paralelna povratna veza – $A_I \rightarrow R_M$, $i_f = \beta u_{iz}$

$$\frac{1}{R_{ulf}} = \frac{i_{ul}}{u_{ul}} = \frac{1}{R_{ul}} \left(1 + \frac{i_f}{u_{iz}} \frac{u_{iz}}{i_a} \right) = \frac{1}{R_{ul}} (1 + \beta R_M) \rightarrow R_{ulf} = \frac{R_{ul}}{1 + \beta R_M}$$

Utjecaj naponske povratne veze na izlazni otpor

Naponska-serijska povratna veza



$$A_v = \lim_{R_T \rightarrow \infty} A_v$$

$$i = \frac{u - A_v u_a}{R_{iz}}$$

$$u_a = -u_f = -\beta u_{iz} = -\beta u$$

$$i = \frac{u + \beta A_v u}{R_{iz}}$$

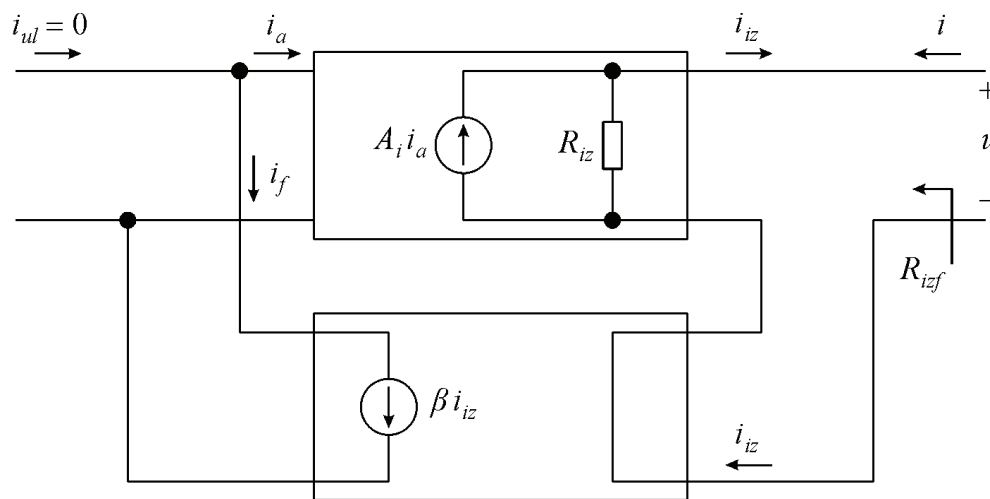
$$R_{izf} = \frac{u}{i} = \frac{R_{iz}}{1 + \beta A_v}$$

Naponska-paralelna povratna veza

$$R_{izf} = \frac{u}{i} = \frac{R_{iz}}{1 + \beta R_m} \quad R_m = \lim_{R_T \rightarrow \infty} R_m$$

Utjecaj strujne povratne veze na izlazni otpor

Strujna-paralelna povratna veza



$$A_i = \lim_{R_T \rightarrow 0} A_I$$

$$i_a = -i_f = -\beta i_{iz} = \beta i$$

$$u = R_{iz} (i + A_i i_a) = \\ = R_{iz} (i + \beta A_i i)$$

$$R_{izf} = \frac{u}{i} = R_{iz} (1 + \beta A_i)$$

Strujna-serijska povratna veza

$$R_{izf} = \frac{u}{i} = R_{iz} (1 + \beta G_m) \quad G_m = \lim_{R_T \rightarrow 0} G_M$$

Utjecaj vrsta povratnih veza na svojstva pojačala

Za jake povratne veze $\rightarrow \beta A \gg 1$

Naponska-serijska

$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 + \beta A_v} \rightarrow \frac{1}{\beta}$$

$$R_{ulf} = R_{ul} (1 + \beta A_v) \rightarrow \infty$$

$$R_{izf} = \frac{R_{iz}}{1 + \beta A_v} \rightarrow 0$$

Strujna-paralelna

$$A_{if} = \frac{A_i}{1 + \beta A_i} \rightarrow \frac{1}{\beta}$$

$$R_{ulf} = \frac{R_{ul}}{1 + \beta A_i} \rightarrow 0$$

$$R_{izf} = R_{iz} (1 + \beta A_i) \rightarrow \infty$$

Strujna-serijska

$$G_{mf} = \frac{G_M}{1 + \beta G_M} \rightarrow \frac{1}{\beta}$$

$$R_{ulf} = R_{ul} (1 + \beta G_M) \rightarrow \infty$$

$$R_{izf} = R_{iz} (1 + \beta G_m) \rightarrow \infty$$

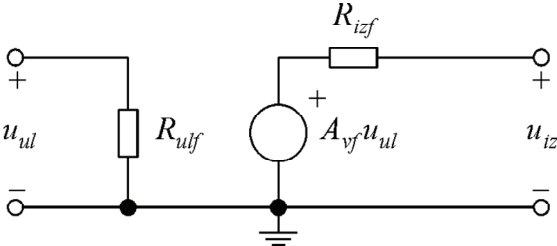
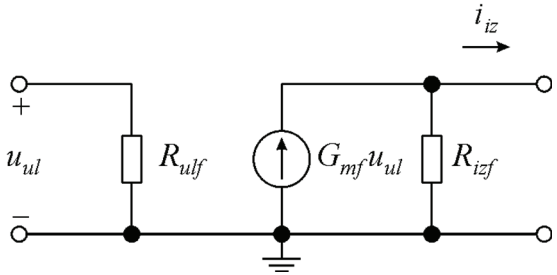
Naponska-paralelna

$$R_{mf} = \frac{R_M}{1 + \beta R_M} \rightarrow \frac{1}{\beta}$$

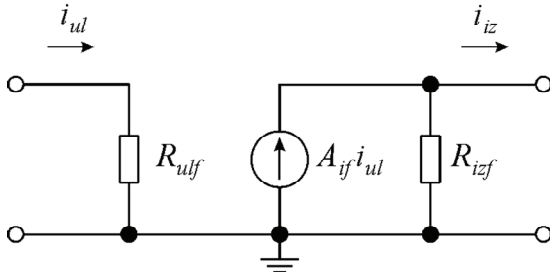
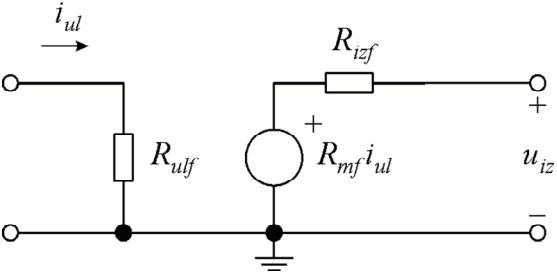
$$R_{ulf} = \frac{R_{ul}}{1 + \beta R_M} \rightarrow 0$$

$$R_{izf} = \frac{R_{iz}}{1 + \beta R_m} \rightarrow 0$$

Modeli pojačala s povratnom vezom (1)

Vrsta povratne veze	Model pojačala s povratnom vezom	Tip pojačala	Idealno pojačalo
Naponska-serijska		Naponsko pojačalo	$R_{ulf} \rightarrow \infty$ $R_{izf} \rightarrow 0$
Strujna-serijska		Strminsko pojačalo	$R_{ulf} \rightarrow \infty$ $R_{izf} \rightarrow \infty$

Modeli pojačala s povratnom vezom (2)

Vrsta povratne veze	Model pojačala s povratnom vezom	Tip pojačala	Idealno pojačalo
Strujna-paralelna		Strujno pojačalo	$R_{ulf} \rightarrow 0$ $R_{izf} \rightarrow \infty$
Naponska-paralelna		Otporno pojačalo	$R_{ulf} \rightarrow 0$ $R_{izf} \rightarrow 0$

Postupak analize pojačala s povratnom vezom (1)

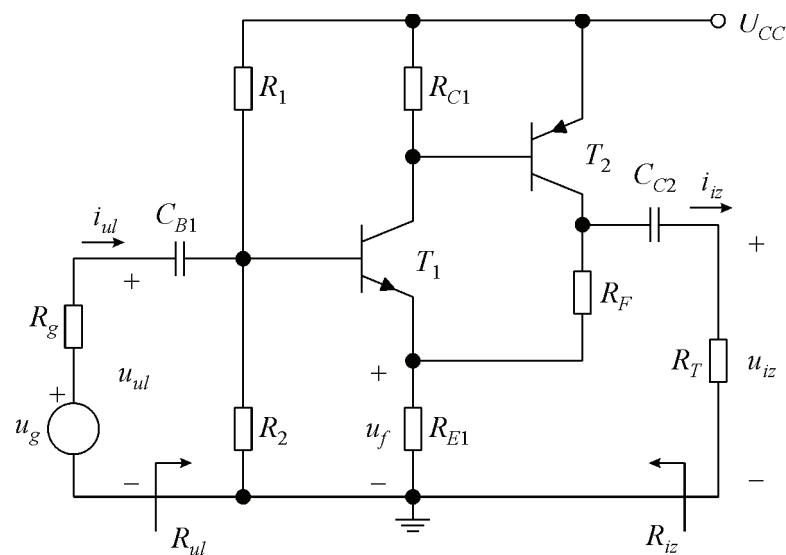
Karakteristika	Vrsta povratne veze			
	Naponska-serijska	Strujna-serijska	Strujna-paralelna	Naponska-paralelna
Uzorak x_{iz}	napon	struja	struja	napon
Povratni signal x_f	napon	napon	struja	struja
Uvjet za određivanje ulaznog kruga*	$u_{iz} = 0$	$i_{iz} = 0$	$i_{iz} = 0$	$u_{iz} = 0$
Uvjet za određivanje izlaznog kruga*	$i_{ul} = 0$	$i_{ul} = 0$	$u_{ul} = 0$	$u_{ul} = 0$
* Opisani postupak određuje osnovno pojačalo bez povratne veze uz opterećenje elemenata β -grane.				

Postupak analize pojačala s povratnom vezom (2)

Karakteristika	Vrsta povratne veze			
	Naponska-serijska	Strujna-serijska	Strujna-paralelna	Naponska-paralelna
$A = x_{iz}/x_a$	$A_V = u_{iz}/u_a$	$G_M = i_{iz}/u_a$	$A_I = i_{iz}/i_a$	$R_M = u_{iz}/i_a$
$\beta = x_f/x_{iz}$	u_f/u_{iz}	u_f/i_{iz}	i_f/i_{iz}	i_f/u_{iz}
A_f	$A_{Vf} = \frac{A_V}{1 + \beta A_V}$	$G_{Mf} = \frac{G_M}{1 + \beta G_M}$	$A_{If} = \frac{A_I}{1 + \beta A_I}$	$R_{Mf} = \frac{R_M}{1 + \beta R_M}$
R_{ulf}	$R_{ul} (1 + \beta A_V)$	$R_{ul} (1 + \beta G_M)$	$R_{ul} / (1 + \beta A_I)$	$R_{ul} / (1 + \beta R_M)$
R_{izf}	$R_{iz} / (1 + \beta A_V)$	$R_{iz} (1 + \beta G_m)$	$R_{iz} (1 + \beta A_i)$	$R_{iz} / (1 + \beta R_m)$

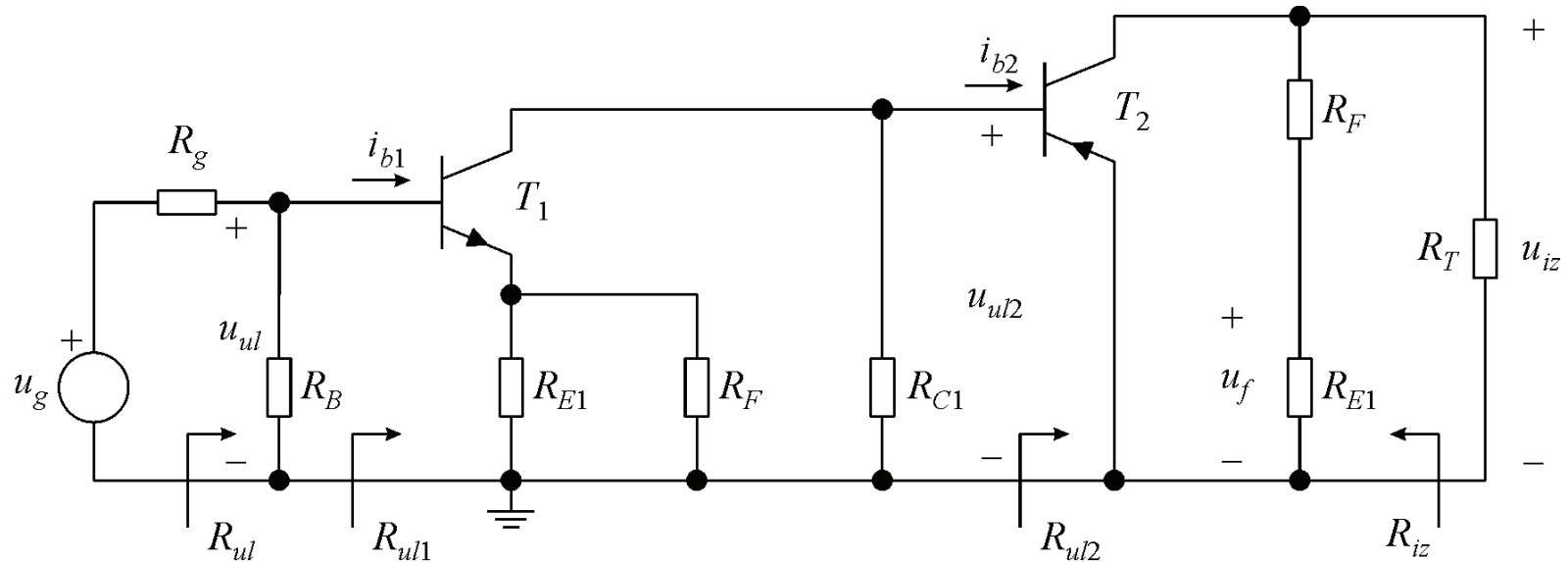
Primjer 5.3 (1)

Primjenom postupka za analizu pojačala s povratnom vezom odrediti pojačanja $A_{Vf} = u_{iz}/u_{ul}$, $A_{If} = i_{iz}/i_{ul}$, te otpore R_{ulf} i R_{izf} pojačala na slici. Analizu provesti u području srednjih frekvencija. Zadano je: $U_{CC} = 15\text{ V}$, $R_g = 500\ \Omega$, $R_1 = 360\text{ k}\Omega$, $R_2 = 40\text{ k}\Omega$, $R_{C1} = 1,4\text{ k}\Omega$, $R_{E1} = 500\ \Omega$, $R_F = 4,5\text{ k}\Omega$ i $R_T = 5\text{ k}\Omega$. Parametri oba bipolarna tranzistora su $\beta \approx h_{fe} = 100$ i $U_\gamma = 0,7\text{ V}$. Za oba tranzistora zanemariti porast struja kolektora s naponima u_{CE} u normalnom aktivnom području. Naponski ekvivalent temperature $U_T = 25\text{ mV}$.



Primjer 5.3 (2)

A-grana

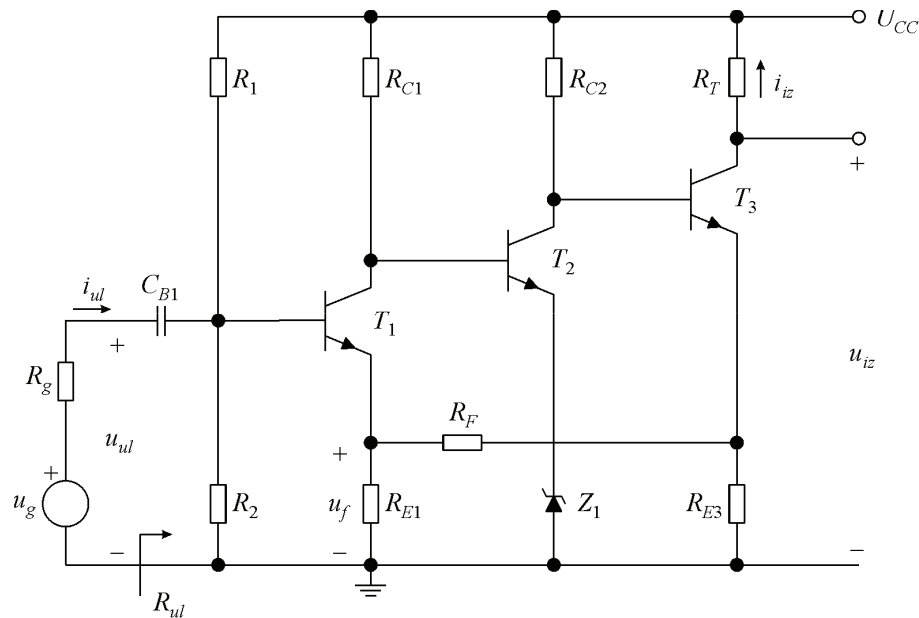


Primjer 5.4 (1)

Primjenom postupka za analizu pojačala s povratnom vezom odrediti pojačanja

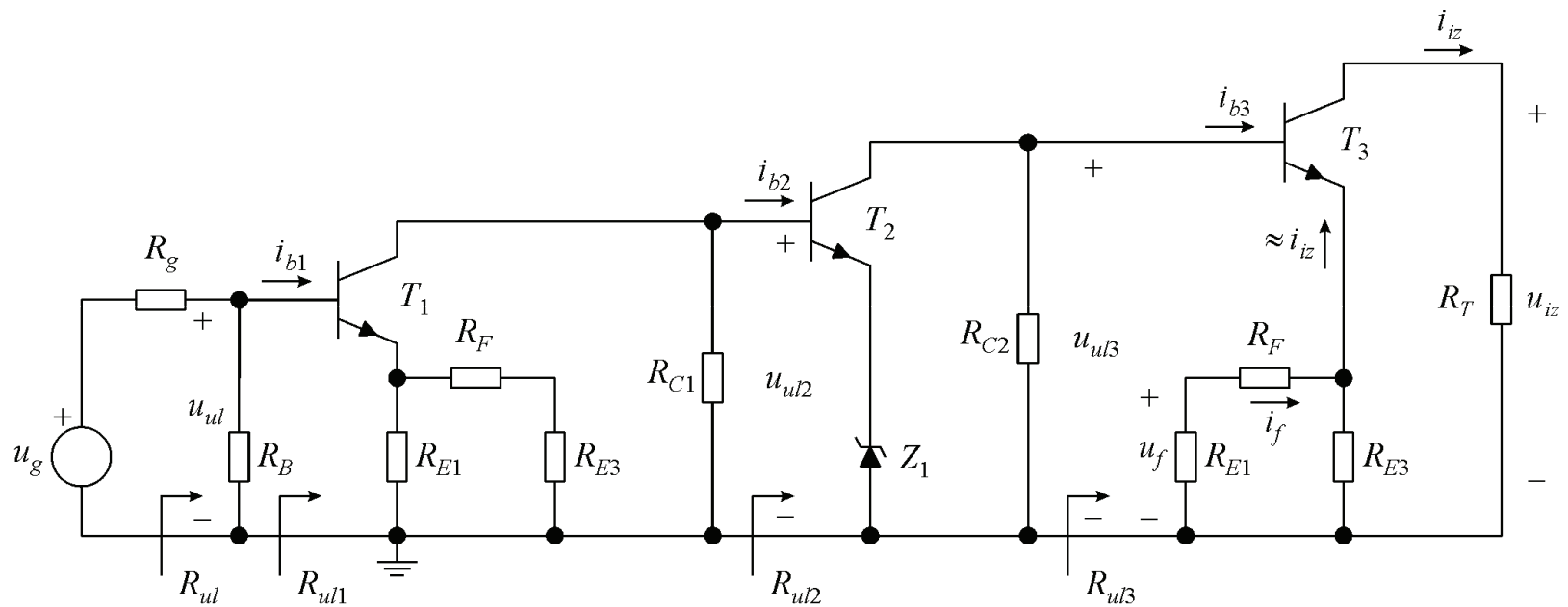
$A_{Vf} = u_{iz}/u_{ul}$, $A_{If} = i_{iz}/i_{ul}$, $G_{Mf} = i_{iz}/u_{ul}$, te otpor R_{ulf} pojačala na slici. Analizu provesti u području srednjih frekvencija. Zadano je: $U_{CC} = 12\text{ V}$, $R_g = 500\ \Omega$, $R_1 = 150\text{ k}\Omega$, $R_2 = 25\text{ k}\Omega$, $R_{C1} = 6\text{ k}\Omega$, $R_{E1} = 500\ \Omega$, $R_{C2} = 4\text{ k}\Omega$, $R_F = 20\text{ k}\Omega$, $R_{E3} = 500\ \Omega$ i

$R_T = 500\ \Omega$. Parametri bipolarnih tranzistora su jednaki i iznose $\beta \approx h_{fe} = 100$ i $U_\gamma = 0,7\text{ V}$. Za sve tranzistore zanemariti porast struja kolektora s naponima u_{CE} u normalnom aktivnom području. Parametri Zenerove diode su $U_Z = 3,5\text{ V}$ i $r_Z = 10\ \Omega$. Naponski ekvivalent temperature $U_T = 25\text{ mV}$.



Primjer 5.4 (2)

A-grana



Primjer 5.5 (1)

Primjenom postupka za analizu pojačala s povratnom vezom odrediti pojačanja

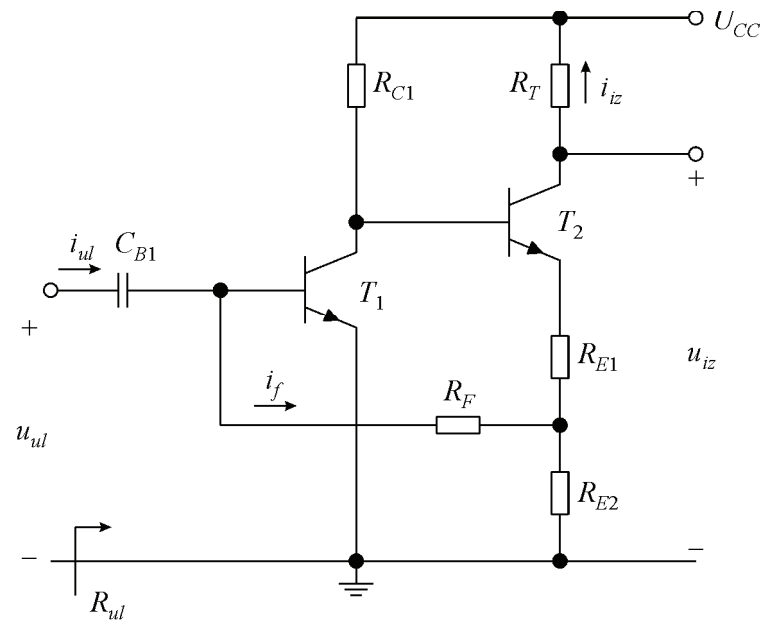
$A_{Vf} = u_{iz}/u_{ul}$, $A_{If} = i_{iz}/i_{ul}$, te otpor R_{ulf} pojačala na slici. Analizu provesti u području srednjih frekvencija. Zadano je: $U_{CC} = 15 \text{ V}$, $R_{C1} = 6 \text{ k}\Omega$, $R_F = 15 \text{ k}\Omega$,

$R_{E1} = 1 \text{ k}\Omega$, $R_{E2} = 500 \text{ }\Omega$ i

$R_T = 2 \text{ k}\Omega$. Parametri bipolarnih tranzistora su jednaki i iznose

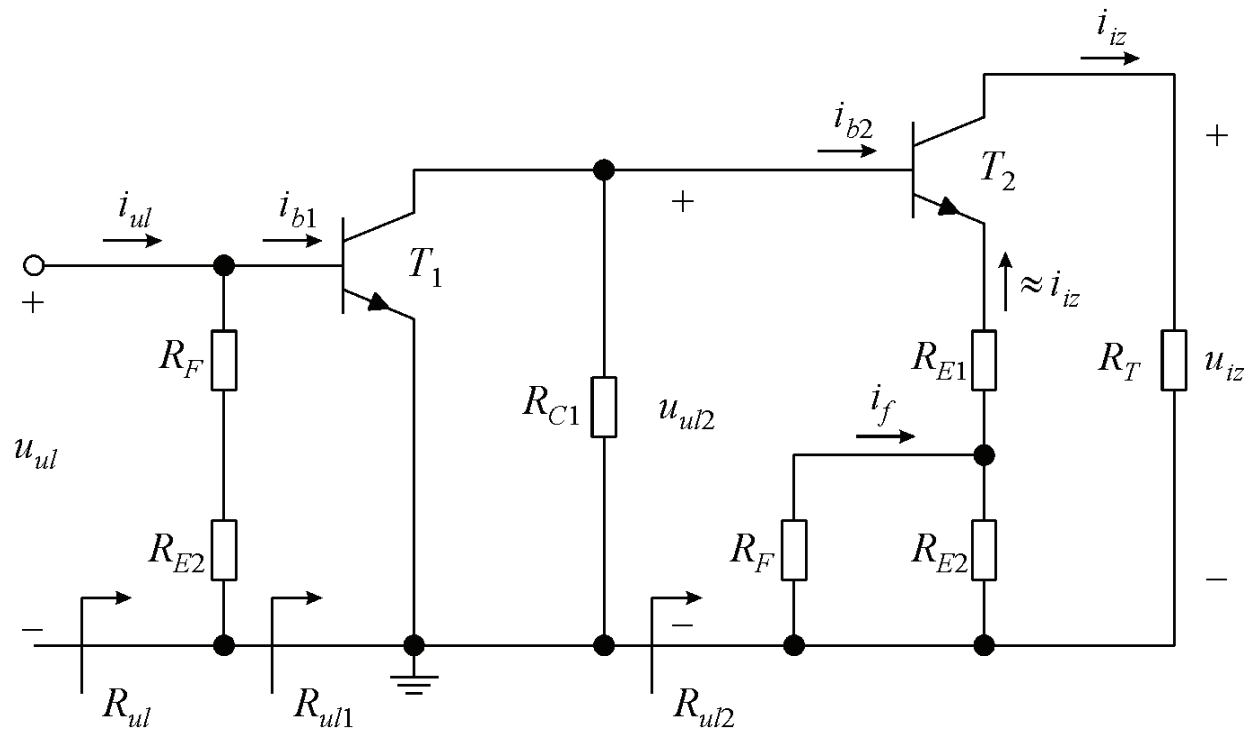
$\beta \approx h_{fe} = 100$ i $U_\gamma = 0,7 \text{ V}$. Za oba tranzistora zanemariti porast struja kolektora s naponima u_{CE} u normalnom aktivnom području. Naponski ekvivalent temperature

$U_T = 25 \text{ mV}$.



Primjer 5.5 (2)

A-grana



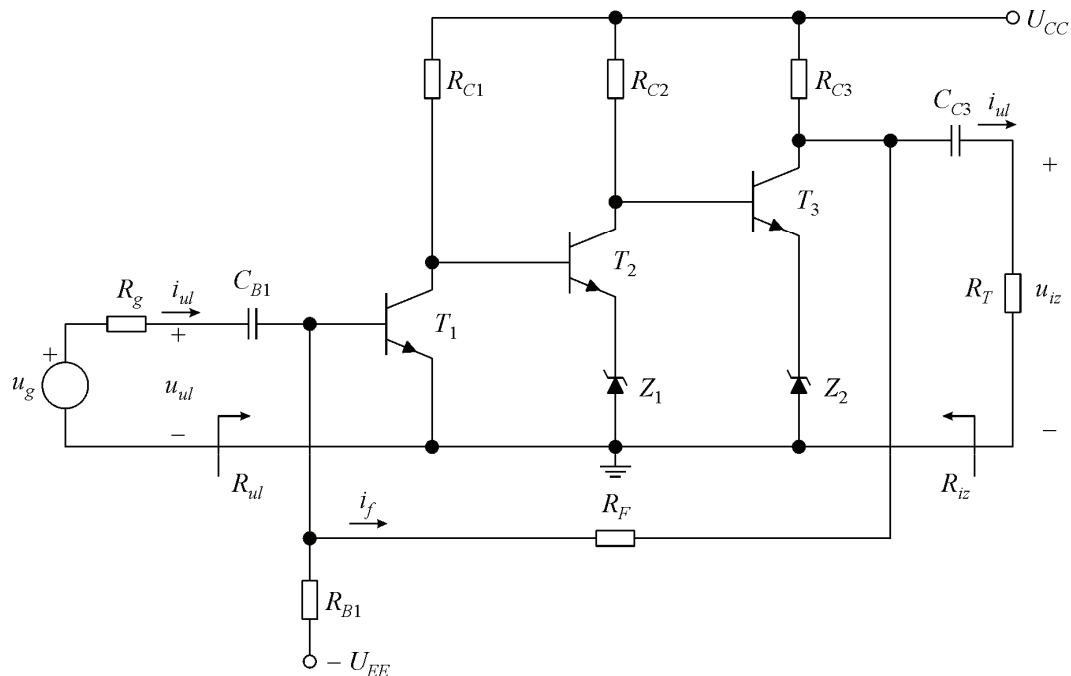
Primjer 5.6 (1)

Primjenom postupka za analizu pojačala s povratnom vezom odrediti pojačanja

$A_{Vf} = u_{iz}/u_{ul}$ i $A_{If} = i_{iz}/i_{ul}$, te otpore R_{ulf} i R_{izf} pojačala na slici. Analizu provesti u području srednjih frekvencija. Zadano je: $U_{CC} = U_{EE} = 12\text{ V}$, $R_{C1} = 8\text{ k}\Omega$, $R_{C2} = 3\text{ k}\Omega$, $R_{C3} = 1\text{ k}\Omega$, $R_{B1} = 15\text{ k}\Omega$, $R_F = 10\text{ k}\Omega$ i $R_T = 10\text{ k}\Omega$. Parametri bipolarnih tranzistora su jednaki i iznose

$\beta \approx h_{fe} = 100$ i $U_\gamma = 0,7\text{ V}$.

Za sve tranzistore zanemariti porast struja kolektora s naponima u_{CE} u normalnom aktivnom području. Parametri Zenerovih dioda su $U_{Z1} = 3\text{ V}$, $U_{Z2} = 6\text{ V}$ i $r_Z = 10\text{ }\Omega$. Naponski ekvivalent temperature $U_T = 25\text{ mV}$.



Primjer 5.6 (2)

A-grana

